

# Estudo da Estabilidade da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu pela Seção Transversal da Estaca 122+00 por Método de Confiabilidade Estrutural

Tereza Rachel Mafioleti<sup>1</sup>  
Anselmo Chaves Neto<sup>2</sup>  
Josiele Patias<sup>3</sup>  
Luiz Albino Teixeira Júnior<sup>4</sup>  
Sheila Regina Oro<sup>5</sup>

## Resumo

O presente trabalho é uma abordagem de Confiabilidade Estrutural para a análise da Estabilidade de Barragens de Aterro. A análise tem por base o *First Order Reliability Method* (FORM) e visa a obtenção da probabilidade de ruptura do talude. A função que descreve o desempenho da estrutura é o Fator de Segurança. Duas expressões de Fator de Segurança são utilizadas: Bishop Simplificado e Janbu. As variáveis aleatórias são a coesão efetiva e o ângulo de atrito interno efetivo da argila compactada do corpo da barragem. Para a aplicação deste método é utilizada a seção transversal localizada na Estaca 122+00 da Barragem de Terra da Margem Esquerda da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Anteriormente a esta análise é necessária a realização de uma retroanálise dos coeficientes de permeabilidade de projeto dos materiais da barragem. Os Fatores de Segurança calculados durante o desenvolvimento do FORM consideram as condições de fluxo dadas pela retroanálise. Os Índices de Confiabilidade obtidos para os Fatores de Segurança de Bishop Simplificado e Janbu estão dentro do intervalo recomendado para barragens de terra. A probabilidade de ruptura em ambos os casos é inferior a 0,01 %.

**Palavras-chave:** Estabilidade de Barragens de Aterro, Fator de Segurança, Confiabilidade Estrutural, *First Order Reliability Method* (FORM), Índice de Confiabilidade.

## 1 Introdução

A ocorrência dos diversos escorregamentos de massa de solos em superfícies inclinadas naturais e artificiais a partir do século XIX motivou estudos sobre a estabilidade de taludes no início do século XX no mundo todo (TERZAGHI, 1950). Tais estudos resultaram no Método do Equilíbrio Limite, que calcula um Fator de Segurança (FS) para a estrutura e que foi criado pelos suecos ao observarem o deslizamento do Cais de Gotemburgo ocorrido em 1916 (CHENG e LAU, 2008). Um resultado inicial, conhecido mundialmente, foi publicado por FELLENIUS (1936). Depois deste, surgiram diversas hipóteses e aperfeiçoamentos ao Método do Equilíbrio Limite que deram

origem a diferentes métodos de cálculo do Fator de Segurança, dentre os quais estão: BISHOP (1955), JANBU *et al.* (1956), LOWE e KARAFIATH (1960), MORGENSTERN e PRICE (1965), SPENCER (1967), JANBU (1973), SARMA (1973).

De acordo com EL RAMLY *et al.* (2002), os valores das variáveis envolvidas no cálculo do FS estão sujeitos a variabilidade. Tais valores são obtidos dos ensaios geotécnicos que simulam as condições de campo, e têm a sua variabilidade atribuída a diversos fatores, dentre eles: diferentes interpretações na realização dos ensaios, falhas humanas nos ensaios, e a variabilidade espacial inerente das propriedades do solo, pois as amostras são coletadas em diversos locais distintos. Uma vez que o Fator de Segurança é

1 Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, mafioleti@utfpr.edu.br

2 Professor da Universidade Federal do Paraná, anselmo@ufpr.br

3 Divisão de Engenharia Civil e Arquitetura – Itaipu Binacional, jpatias@itaipu.org.br

4 Professor da Universidade da Integração Latino Americana, luiz.junior@unila.edu.br

5 Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sheilaro@utfpr.edu.br

definido como uma função de variáveis que podem ser interpretadas como aleatórias, o mesmo está sujeito a variabilidade (RODRIGUES, 2010).

Preocupações com a variabilidade dos dados no estudo da estabilidade das estruturas de engenharia deram origem aos métodos que abordam a Confiabilidade Estrutural e tiveram os seus primeiros resultados, de repercussão mundial, publicados a partir da década de 60. Podem-se citar, como exemplos os seguintes trabalhos: CORNELL (1969), HASOFER e LIND (1974), SHINOZUKA (1983), ANG e TANG (1984) e MELCHERS (1987). A Confiabilidade Estrutural apresenta um Índice de Confiabilidade para a estrutura e, definida uma falha indesejada, aponta a probabilidade de ocorrência de tal falha, em qualquer fase da vida da estrutura (MELCHERS, 1987). Os problemas de caráter geotécnico estiveram presentes desde o início do desenvolvimento das técnicas de Confiabilidade Estrutural. Materiais didáticos sobre análise probabilística da estabilidade de estruturas de terra podem ser encontrados em BAECHEER e CHRISTIAN (2003) e em PHOON (2008).

O trabalho apresenta um estudo probabilístico da estabilidade do talude da Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI) para a Seção da Estaca 122+00. O algoritmo de Confiabilidade Estrutural *First Order Reliability Method* (FORM) foi utilizado para a obtenção do Índice de Confiabilidade e da probabilidade de falha. Considerou-se falha como sendo a ruptura simulada do talude de jusante da referida estaca. A falha foi definida pelas funções dos Fatores de Segurança de Bishop Simplificado e de Janbu.

No caso das barragens, o aterro, usado para conter um reservatório, está sujeito a tensões devidas a cargas hidráulicas que variam ao longo dos anos de operação. Anteriormente a análise da estabilidade, o fluxo pelo maciço e fundação foi modelado considerando as condições de operações atuais.

Em setembro de 2010 entrou em vigor no Brasil a Lei nº. 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Tal legislação estabelece que o empreendedor, responsável pela barragem, obriga-se a prover os recursos necessários à garantia da segurança estrutural (BRASIL, 2010). Desde a sua construção, a UHI apresenta um plano de segurança que compreende ações periódicas tais como: medições dos instrumentos instalados na estrutura e fundação, inspeções dos instrumentos e da estrutura, elaboração de relatórios, reuniões com consultores, plano de ação e emergência, entre outros. Com seus procedimentos, Itaipu extrapola os requisitos mínimos previstos pela Lei para um empreendimento com as suas características (NEUMANN JÚNIOR *et al.*, 2011). Além das medidas

citadas, estudos têm sido desenvolvidos por pesquisadores em Itaipu, visando à segurança da barragem.

A análise da estabilidade da BTME para as condições de operação da UHI encontrada até o presente momento foi realizada na época de projeto, de maneira determinística, pelo cálculo dos Fatores de Segurança de Bishop Simplificado e de Janbu. Atualmente, com as medições dos aparelhos instalados, é possível descrever as condições do aterro e sua fundação de maneira mais próxima da real. Essas informações são úteis para a realização de análises da estabilidade estrutural com ferramentas tanto de cunho determinístico como probabilístico. Resultados de estudos que consideram as alterações das tensões devidas à carga hidráulica e à variabilidade dos parâmetros de resistência do solo que compõem o aterro são importantes para a complementação das medidas que visam à segurança.

## 2 *First Order Reliability Method* (FORM)

De acordo com MELCHERS (1987) para a verificação da confiabilidade de uma estrutura pelo método FORM, primeiramente é necessária a definição da falha a ser considerada na análise. Então define-se uma função que descreva essa falha, para a qual seja possível identificar valores correspondentes ao desempenho satisfatório ou insatisfatório. Tal função é denominada função do estado limite. No caso da avaliação da estabilidade do talude deste estudo, a função escolhida foi o Fator de Segurança (abordado na Seção 2.1) e a falha considerada foi a ruptura simulada.

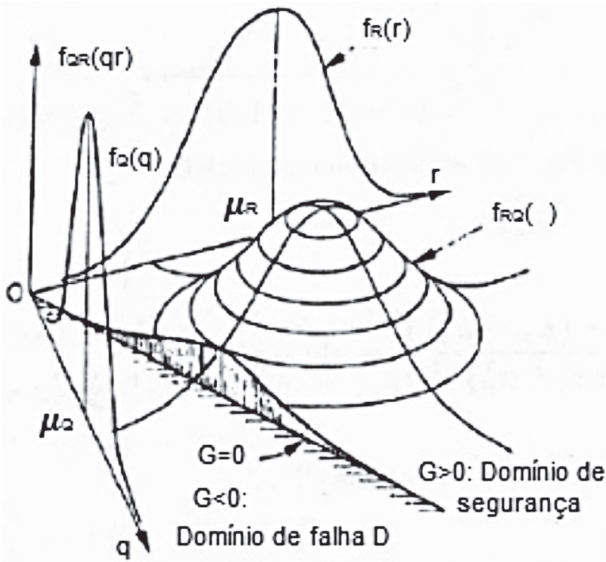
Se  $\underline{X}$  for o vetor das variáveis aleatórias da função do estado limite  $G(\underline{X})$  tal que a falha, ou seja, a violação do estado limite ocorra quando  $G(\underline{X}) < 0$  (região de falha) e  $f_{\underline{X}}(\underline{x})$  for a função de densidade de probabilidade (*f.d.p.*) conjunta de  $\underline{X}$ , então a probabilidade de falha ( $p_f$ ) é dada pelo cálculo da integral múltipla (ANG E TANG, 1984):

$$p_f = P[G(\underline{X}) < 0] = \int_{G(\underline{X}) < 0} \dots \int f_{\underline{X}}(\underline{x}) d\underline{x} \quad (1)$$

Para o caso bivariado, em que as variáveis são normais e independentes, verifica-se na Figura 1 que a probabilidade de falha é o volume sob a superfície normal bivariada na região de falha ( $G(\underline{X}) < 0$ ).

Muitas vezes, as funções de densidade de probabilidade das variáveis aleatórias são desconhecidas. Mesmo nos casos em que são conhecidas e em que é possível determinar a *f.d.p.* conjunta, o cálculo analítico da Equação 1 é inviável. O FORM é uma alternativa para superação dessas dificuldades, uma

vez que para a sua utilização, as variáveis podem ter quaisquer distribuições, serem independentes ou não, e não é necessário o conhecimento da *f.d.p.* conjunta (ANG e TANG, 1984).



**Figura 1** – Função densidade probabilidade conjunta das variáveis resistente e atuante.

Fonte: MELCHERS (1987).

Os passos iterativos do FORM são os seguintes (ANG e TANG, 1984):

**I.** O procedimento ocorre no espaço reduzido, no qual as variáveis são normais padronizadas e independentes. Se  $\underline{X}$  for o vetor de variáveis aleatórias normais não correlacionadas,  $[\sigma_x]$  a matriz diagonal dos desvios padrões estimados de  $\underline{X}$  e  $\underline{\mu_x}$  o vetor das médias estimadas de  $\underline{X}$ , então escreve-se o vetor das variáveis aleatórias padronizadas  $\underline{z}$ , ou seja, com média zero e desvio padrão igual a 1.

$$\underline{z} = [\sigma_x]^{-1} \cdot (\underline{X} - \underline{\mu_x}) \quad (2)$$

Para os casos em que existe dependência entre as variáveis, realiza-se uma transformação do vetor  $\underline{X}$  no vetor  $\underline{z}$  não correlacionado e padronizado com o auxílio da matriz T dos autovetores da matriz de correlação estimada normalizados (ANG e TANG, 1984; BAECHER e CHRISTIAN, 2003):

$$\underline{X} = [\sigma_x] \cdot T \cdot \underline{z} + \underline{\mu_x} \quad (3)$$

O ponto  $\underline{z}$  inicial equivale aos valores médios das variáveis em  $\underline{X}$ , e, portanto, é a origem do espaço reduzido. O  $\underline{z}$  obtido no final da análise é chamado ponto de projeto e corresponde aos valores mais

prováveis que as variáveis aleatórias devem assumir para a ocorrência do mau desempenho.

**II.** Escreve-se a função do estado limite  $G(\underline{X})$  no espaço reduzido e iguala-se a zero, obtendo-se a equação do estado limite  $g(\underline{z})=0$  que indica a superfície de falha. O ponto de projeto é o ponto da superfície de falha que está mais próximo da origem do espaço reduzido.

**III.** Um novo ponto de projeto  $\underline{z}^*$  é escrito em função do Índice de Confiabilidade  $\beta$  e dos cossenos diretores:

$$\underline{z}^* = -\underline{\alpha} \cdot \beta \quad (4)$$

onde  $\underline{\alpha}$  é o vetor dos cossenos diretores obtido da seguinte forma:

$$\underline{\alpha} = \frac{[\sigma_z] \cdot \frac{\partial g}{\partial z}}{\left\| [\sigma_z] \cdot \frac{\partial g}{\partial z} \right\|} \quad (5)$$

tal que  $[\sigma_z]$  é a matriz diagonal dos desvios padrões de  $\underline{z}$  dados pelas raízes dos autovalores da matriz de correlação estimada de  $\underline{X}$ , e  $\frac{\partial g}{\partial z}$  é o vetor das derivadas parciais de  $g$  em relação às variáveis de  $\underline{z}$ .

**IV.** Escreve-se a equação do estado limite em função do novo ponto de projeto,  $g(\underline{z}^*) = 0$ . Pela Equação 4 observa-se que a variável nesta equação é o Índice de Confiabilidade  $\beta$ . Assim, um Índice de Confiabilidade é obtido das raízes de  $g(\beta)$ .

**V.** Um novo ponto de projeto é obtido da expressão (4). O processo repete-se a partir de III, até que a diferença entre dois índices de confiabilidade sucessivos seja menor que um valor pré-determinado. Finalizado o processo iterativo, obtêm-se os valores do ponto de projeto no espaço original pela expressão (3), e a probabilidade de falha  $p_f$ :

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

de forma que  $\Phi$  é a função densidade acumulada da variável normal padrão.

## 2.1 Função do estado limite

Os Fatores de Segurança de Bishop Simplificado e Janbu dados pelo método do equilíbrio limite foram adotados como funções que descrevem o desempenho da estrutura. O método do equilíbrio limite leva em consideração as seguintes hipóteses: a superfície de ruptura tem forma circular, o solo se

fragmenta em fatias (ou lamelas), a ruptura ocorre de forma brusca sem deformações e o FS é o mesmo ao longo de toda a superfície de ruptura. A análise, feita bidimensionalmente em uma seção transversal da barragem, considera o equilíbrio das forças e dos momentos em uma superfície de ruptura circular a partir de suas fatias (Figura 2). O método é dito simplificado quando é tratado apenas o equilíbrio das forças ou dos momentos (CHENG e LAU, 2008).

Na Figura 2,  $x$  é a distância horizontal do centro da fatia ao eixo de rotação,  $R$  é o raio do círculo de ruptura,  $P$  é o peso atuante na fatia,  $X_n, X_{n+1}$  são, respectivamente, as forças de cisalhamento verticais nas seções  $n$  e  $n + 1$ ,  $E_n, E_{n+1}$  são, respectivamente, as forças horizontais nas seções  $n$  e  $n+1$ ,  $\alpha$  é o ângulo que a força normal faz com a vertical,  $\ell$  é o comprimento do arco da base da fatia, e  $b$  é a largura da fatia.

O Fator de Segurança de Bishop Simplificado é definido pela razão entre momento resistente  $M_R$  e momento atuante  $M_A$ .

$$FS = \frac{M_R}{M_A} \tag{7}$$

Para que a estrutura esteja estável é necessário que FS seja maior que 1 (o que equivale a afirmar que o momento resistente é maior que o atuante). Se  $FS = 1$ , significa que a estrutura está na eminência da ruptura, e se  $FS < 1$ , então a ruptura é certa. Uma vez definido que o Fator de Segurança descreve a função do estado limite para o problema em questão, a falha ou ruptura ocorre quando  $FS < 1$ .

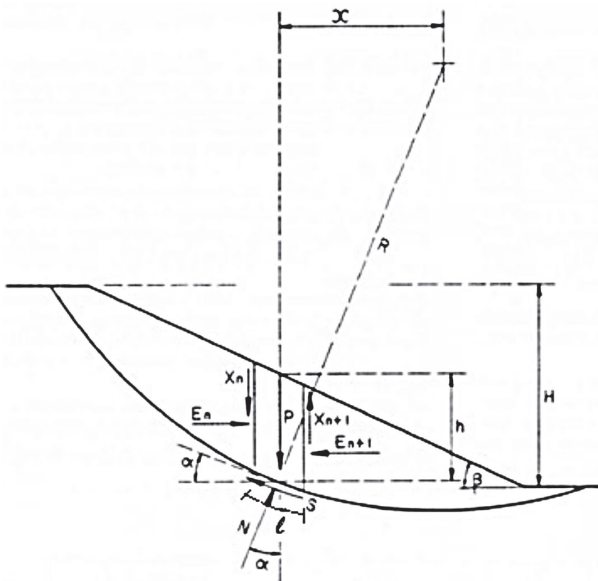


Figura 2 – Superfície circular de ruptura, fatias e forças atuantes. Fonte: CRUZ (2004).

O momento resistente  $M_R$  é definido pelo somatório dos momentos resistentes de cada uma das fatias. A resistência ao cisalhamento mobilizada  $\tau_{mob}$  em cada ponto da superfície é dada pelo critério de Mohr-Coulomb definido por:

$$\tau_{mob} = \frac{1}{FS} \cdot [c' + (\sigma - u_w) \cdot \text{tg}\phi'] \tag{8}$$

onde  $c'$  e  $\phi'$  são os parâmetros de resistência do solo, definidos respectivamente por coesão efetiva e ângulo de atrito interno efetivo,  $\sigma$  é a tensão normal e  $u_w$  é a pressão da água no poros (pressão neutra). Assim,

$$M_R = \sum \frac{\ell R}{FS} \cdot [c' + (\sigma - u_w) \cdot \text{tg}\phi'] \tag{9}$$

O momento atuante  $M_A$  é definido por

$$M_A = \sum P \cdot x \tag{10}$$

Pela substituição de (9) e (10) em (7), com mais algumas deduções e hipóteses simplificadoras, o Fator de Segurança de Bishop Simplificado é definido como:

$$FS = \frac{1}{\sum P \cdot \text{sen}\alpha} \tag{11}$$

$$\sum \left[ \left\{ c' \cdot b + \text{tg}\phi' \cdot P \cdot \left(1 - \frac{u_w}{\gamma_w}\right) \right\} \cdot \frac{\text{sec}\alpha}{1 + \frac{\text{tg}\phi' \cdot \text{tg}\alpha}{FS}} \right]$$

Escolhido FS (Equação 11) como função do estado limite, verifica-se a dificuldade no cálculo das derivadas parciais de tal função, bem como das raízes indicadas na etapa IV do algoritmo FORM. Um procedimento alternativo para tratar com estas dificuldades será apresentado na Seção 3.

Atualmente, existem alguns softwares que realizam o equilíbrio de forças e momentos nas fatias da superfície de ruptura e são úteis para o cálculo do FS. Um exemplo desses é o SLOPE/W® que será utilizado neste trabalho. Os acessos ao SLOPE/W® para a obtenção dos FS durante o desenvolvimento do algoritmo FORM foram realizados no mesmo arquivo em que as condições de fluxo foram modeladas em conformidade com as medições dos instrumentos instalados na seção da Estaca 122+00.



## 2.2 Retroanálise dos Coeficientes de Permeabilidade

Na fundação da BTME estão instalados instrumentos chamados piezômetros do tipo *standpipe*. Tais instrumentos medem a pressão neutra e a subpressão a partir da camada de solo em que estão instalados (SILVEIRA, 2006). O piezômetro é composto por um tubo com ranhuras na sua parte inferior, o qual é fixado em material permeável. Acima do material permeável existe um selo de bentonita para o isolamento das pressões na circunvizinhança, conforme descrito por SILVEIRA (2006). PATIAS (2010) apresenta um esquema dos piezômetros *standpipe* instalados nas Barragens de Itaipu (Figura 3).

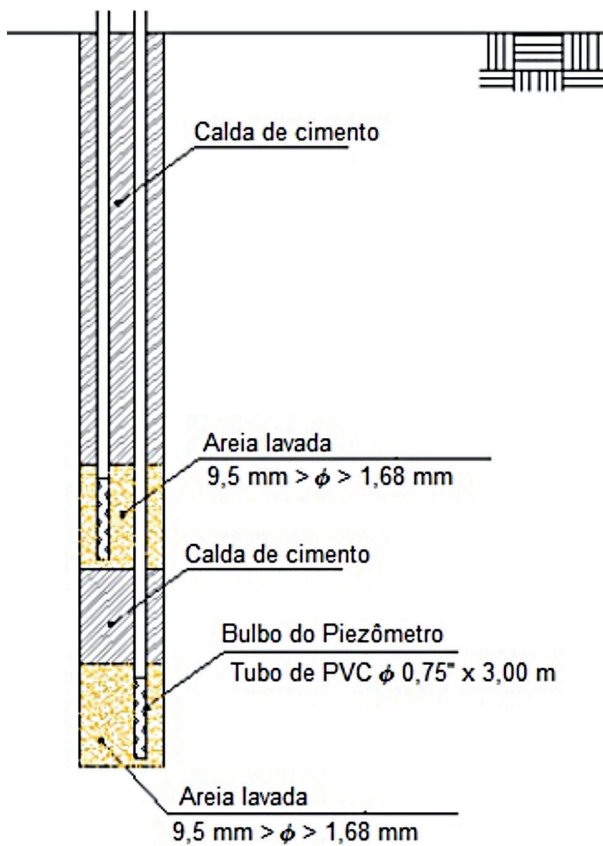


Figura 3 – Esquema de instalação dos piezômetros *standpipe* em Itaipu.

Fonte: PATIAS (2010).

O comprimento da coluna de água no tubo é medido com um dispositivo conhecido como pio elétrico. A cota piezométrica  $H$  é dada pela equação de Bernoulli definida por:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (12)$$

onde  $u_w$  é a pressão neutra,  $\gamma_w$  é o peso específico da

água,  $v$  é a velocidade de percolação,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $Z$  é a cota de posição, ou seja, de instalação do piezômetro. A unidade de  $H$  em Itaipu é dada em metros sobre o nível do mar (msnm).

Nos casos em que a permeabilidade do solo é muito pequena, a segunda parcela é considerada desnecessária, pois a velocidade de percolação também é muito pequena.

Dados os coeficientes de permeabilidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente  $k_x$  e  $k_y$ , a resolução da equação do fluxo bidimensional de Laplace permite obter a cota  $H$  em qualquer ponto do aterro ou fundação.

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (13)$$

Pode-se realizar a retroanálise dos coeficientes de permeabilidade da época do projeto com o auxílio da modelagem, por comparações das subpressões do modelo do fluxo com cotas piezométricas obtidas das medições atuais. Dentre as formas de resolução da Equação 13 destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que se encontra disponível em alguns aplicativos, como por exemplo, o SEEP/W® (GEO-SLOPE, 2012).

## 3 Procedimento Alternativo

Com a finalidade de aplicar o algoritmo FORM em problema que apresentava uma função do estado limite implícita, SU *et al.* (2010) utilizaram os recursos apresentados nesta seção.

Para o cálculo das derivadas parciais de  $g$  em relação às variáveis de  $\underline{z}$  é sugerida a aproximação numérica, onde  $h$  é um valor a ser incrementado:

$$\left( \frac{\partial g}{\partial z_i} \right) \approx \frac{g(z_1, z_2, \dots, z_i + h, \dots, z_n) - g(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n)}{h} \quad (14)$$

Para a determinação das raízes de  $g(\beta)$  a idéia proposta consiste em se aproximar  $g(\beta)$  por meio de uma série de Taylor de segunda ordem, a partir de um suposto Índice de Confiabilidade inicial  $\beta_0$ :

$$g(\beta) \approx g(\beta_0) + \left( \frac{\partial g}{\partial \beta} \right) \Big|_{\beta=\beta_0} (\beta - \beta_0) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 g}{\partial \beta^2} \right) \Big|_{\beta=\beta_0} (\beta - \beta_0)^2 \quad (15)$$

tal que  $g(\beta_0)$  corresponde ao valor de  $g$  para os novos valores do ponto de projeto  $\underline{z}^*$  (Equação 4) calculados com  $\beta_0$ .

A derivada parcial de  $g$  em relação a  $\beta$  em  $\beta = \beta_0$  é obtida com

$$\left(\frac{\partial g}{\partial \beta}\right)_{\beta=\beta_0} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right) \left(\frac{\partial z_i}{\partial \beta}\right)_{\beta=\beta_0} \quad (16)$$

de tal forma que  $\left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right)$  é aproximada, conforme a Equação 14, e  $\left(\frac{\partial z_i}{\partial \beta}\right)$  é obtida da Equação 4.

A derivada parcial de segunda ordem de  $g$  em relação a  $g(\beta) \approx a_1^0 + a_2^0(\beta - \beta_0) + a_3^0(\beta - \beta_0)^2 = 0$  em  $\beta = \beta_0$  é dada por:

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial \beta^2}\right)_{\beta=\beta_0} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z_i^2}\right) \left(\left(\frac{\partial z_i}{\partial \beta}\right)_{\beta=\beta_0}\right)^2 \quad (17)$$

onde

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z_i^2}\right) \approx \quad (18)$$

$$\frac{g(z_1, z_2, \dots, z_i + 2h, \dots, z_n) - 2g(z_1, z_2, \dots, z_i + h, \dots, z_n) + g(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n)}{h^2}$$

Assumindo-se

$$a_1^0 = g(\beta_0), \quad a_2^0 = \left(\frac{\partial g}{\partial \beta}\right)_{\beta=\beta_0}, \quad a_3^0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial \beta^2}\right)_{\beta=\beta_0} \quad (19)$$

segue que a aproximação da equação  $g(\beta_0)$  pela série de Taylor de segunda ordem apresentada na expressão (15) é agora dada por:

$$g(\beta) \approx a_1^0 + a_2^0(\beta - \beta_0) + a_3^0(\beta - \beta_0)^2 = 0 \quad (20)$$

onde  $\beta$  é tal que:

$$\beta = \beta_0 + \frac{-a_2^0 \pm \sqrt{(a_2^0)^2 - 4a_1^0 a_3^0}}{2a_3^0},$$

$$\text{desde que } (a_2^0)^2 - 4a_1^0 a_3^0 \geq 0 \quad (21)$$

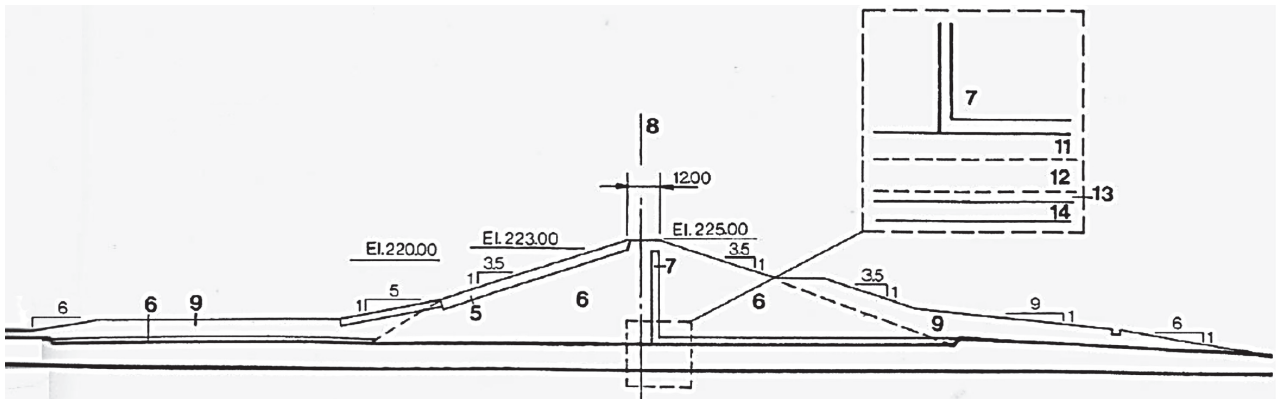
E, então, com o  $\beta$  na expressão (4), um novo ponto de projeto é obtido. Considera-se  $\beta = \beta_1$  e dá-se continuidade ao processo iterativo FORM descrito na Seção 2 para a obtenção de Índices de Confiabilidade sucessivos, de forma que se obtém a seguinte relação a cada iteração  $m$ :

$$\beta_{m+1} = \beta_m + \frac{-a_2^m \pm \sqrt{(a_2^m)^2 - 4a_1^m a_3^m}}{2a_3^m},$$

$$\text{desde que } (a_2^m)^2 - 4a_1^m a_3^m \geq 0 \quad (22)$$

## 4 Definição do Local de Estudo

A Barragem de Terra da Margem Esquerda possui 2.294 metros de comprimento e a sua altura



**Figura 4** – Seção da Estaca 122+00.

Na figura: 5. Rip rap; 6. Argila plástica compactada; 7. Filtro de areia artificial; 8. Eixo da barragem; 9. Bermas; 11. Argila plástica da fundação; 12. Saprolito; 13. Basalto intemperizado; 14. Basalto denso.

Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2009.

máxima é de 30 m na parte imediatamente após a Barragem de Enrocamento.

Em sua fundação estão presentes as camadas de basalto, basalto alterado, saprolito e argila plástica vermelha (Figura 4). O seu corpo é composto por argila plástica vermelha compactada oriunda de área de empréstimo próxima a sua estrutura. As suas bermas são compostas por materiais provenientes das escavações necessárias à construção de outras partes da Barragem (ITAIPU BINACIONAL, 2009).

#### 4.1 Dados utilizados na retroanálise dos coeficientes de permeabilidade

As cotas piezométricas H dos piezômetros PS-K-02, PS-K-05 e PS-K-06 utilizadas como referência para a modelagem do fluxo foram as médias para o período de janeiro de 2008 e dezembro de 2013, conforme a Tabela 1. O nível do reservatório médio para os meses do mesmo período é de 219,585 msnm.

**Tabela 1** – Valores médios das cotas piezométricas na seção da Est. 122+00.

Cotas piezométricas (msnm)		
PS-K-02	PS-K-05	PS-K-06
188,875	187,429	186,523

Os coeficientes de permeabilidade k para a condição a longo prazo de projeto estão indicados na Tabela 2, conforme THÁ (2007). A argila plástica do corpo da barragem apresenta a razão entre coeficiente de permeabilidade vertical e horizontal de 0,25.

Os coeficientes de permeabilidade a serem alterados no processo de retroanálise foram os da argila compactada, argila da fundação, bermas, saprolito e basalto alterado.

**Tabela 2** – Coeficientes de permeabilidade iniciais.

Material	Permeabilidades (m/s)
Argila compactada	$3,4 \cdot 10^{-9}$
Argila da fundação	$4,4 \cdot 10^{-7}$
Saprolito	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Basalto alterado	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Areia dos filtros	$3 \cdot 10^{-3}$
Bermas	$8 \cdot 10^{-8}$
Rip rap	$1 \cdot 10^{-1}$
Basalto	$1 \cdot 10^{-12}$

O erro considerado foi a diferença quadrática entre a cota piezométrica média e o valor apontado

pelo modelo do fluxo (Equação 13). O ajuste ótimo foi tal que objetivou a minimização do somatório dos erros quadráticos.

#### 4.2 Variáveis para a análise de confiabilidade

As variáveis a serem consideradas aleatórias na análise de estabilidade probabilística são os parâmetros de resistência da argila compactada do corpo da barragem: coesão efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito interno efetivo  $\phi'$ . Os p-valores dos testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov foram superiores a 5%, de modo a não se rejeitar a hipótese de que as variáveis sejam normais. Assim, a Tabela 3 mostra a média e o desvio padrão em conformidade com a distribuição normal para tais variáveis.

**Tabela 3** – Média e desvio padrão da coesão efetiva e do ângulo de atrito interno efetivo.

	Argila compactada	
	$c'$ (KPa)	$\phi'$ (graus)
Média	55,5181	27,275
Desvio padrão	13,4967	1,38924

A correlação de Pearson estimada entre as variáveis pode ser vista na matriz R. O p-valor menor que 5 % mostrou que a correlação é significativa.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -0,5401 \\ -0,5401 & 1 \end{bmatrix}$$

As variáveis peso específico  $\gamma$ , coesão efetiva  $c'$  e ângulo de atrito interno efetivo  $\phi'$  dos demais materiais, que não foram consideradas aleatórias e que estão envolvidas na análise são mostradas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Variáveis de valores fixos para a análise de estabilidade.

Material	$\gamma$ (KN/m3)	$c'$ (KPa)	$\phi'$ (graus)
Argila compactada	19,025	-----	----
Argila da fundação	17,8482	18,2649	25
Saprolito	18,0443	0	25
Basalto alterado	19,1427	19,123	28
Areia dos Filtros	22,065	0	40
Bermas	19,025	58,2517	24
Rip rap	21,5747	0	40

### 4.3 Método para a análise da estabilidade com o uso do FORM.

Uma vez realizada a retroanálise dos coeficientes de permeabilidade, deve-se determinar o Índice de Confiabilidade  $\beta$  da seção da Est. 122+00 pelo método FORM (Seção 2). Durante o desenvolvimento do algoritmo é necessário o cálculo das derivadas parciais do FS (função do estado limite) e da aproximação de FS( $\beta$ ) pela série de Taylor de segunda ordem (Seção 3). Para a aproximação das derivadas parciais foi usado  $h = 0,001$  e o Índice de Confiabilidade inicial considerado foi  $\beta_0 = 3,0$ . Os incrementos de  $h$  ou  $2h$  foram realizados nas variáveis do espaço reduzido. Após a alteração da variável  $z_i^*$  pela soma de  $h$  ou  $2h$ , as variáveis de  $\underline{z}^*$  foram escritas no espaço original de acordo com a expressão (3). O cálculo do Fator de Segurança, necessário às iterações do FORM, foi realizado pelo aplicativo SLOPE/W<sup>®</sup> no arquivo que continha as informações

do fluxo previamente modeladas. O fluxograma da Figura 5 é útil para entendimento do procedimento realizado neste estudo.

## 5 Resultados

### 5.1 Resultados da retroanálise dos coeficientes de permeabilidade

Para a resolução do modelo do fluxo (Equação 13) foi utilizado o aplicativo SEEP/W<sup>®</sup> e as alterações dos coeficientes de permeabilidade foram realizadas manualmente. Após a alteração do coeficiente de permeabilidade da argila compactada do corpo da barragem, as alterações dos valores de  $k$  dos demais materiais geraram aumento no somatório das diferenças quadráticas. A Tabela 5 mostra os coeficientes de permeabilidade ao final do processo, e a Tabela 6 evidencia que o somatório dos erros foi de 0,07975.

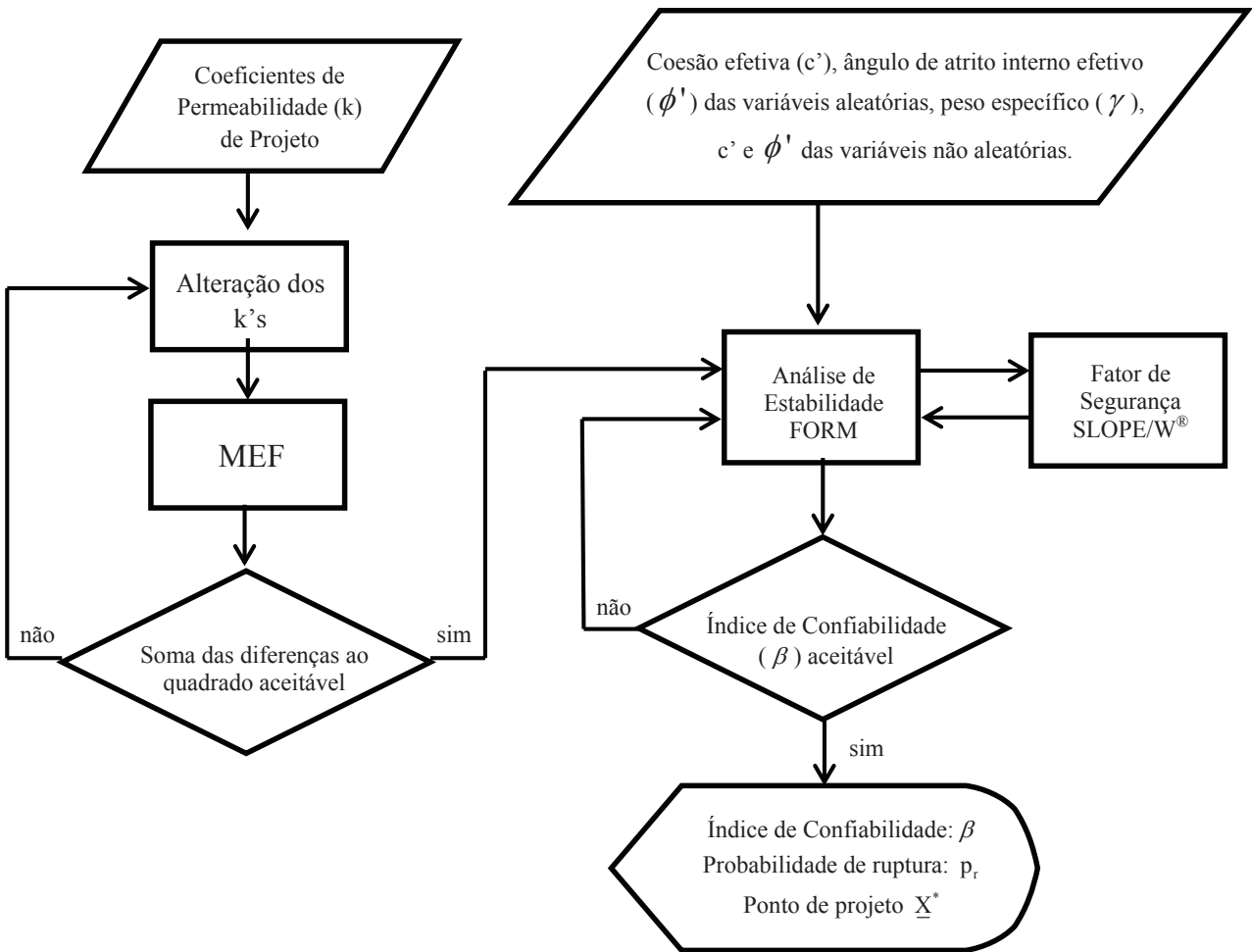


Figura 5 – Fluxograma dos procedimentos realizados na análise.



**Tabela 5** – Coeficientes de permeabilidade ao final da retroanálise.

Material	Permeabilidades (m/s)
Argila compactada	$3,4 \cdot 10^{-10}$
Argila da fundação	$4,4 \cdot 10^{-7}$
Saprolito	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Basalto alterado	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Areia dos filtros	$3 \cdot 10^{-3}$
Bermas	$8 \cdot 10^{-8}$
Rip rap	$1 \cdot 10^{-1}$
Basalto	$1 \cdot 10^{-12}$

**Tabela 6** – Cotas piezométricas ajustadas e suas respectivas diferenças quadráticas.

	PS-K-02	PS-K-05	PS-K-06
Cota total média (msnm)	188,875	187,429	186,523
Cota ajustada pelo modelo (msnm)	188,714	187,652	186,587
Diferenças ao quadrado	0,02592	0,04973	0,00410

A cota piezométrica descrita pelo modelo do fluxo bidimensional (Equação 13) para os coeficientes

de permeabilidade ao final do processo de retroanálise é representada pela linha azul na Figura 6.

## 5.2 Resultados da análise da estabilidade

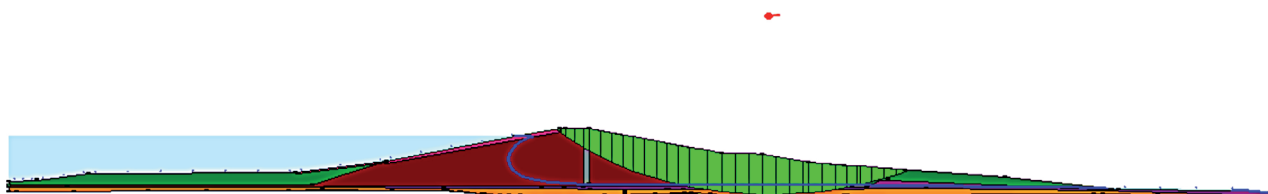
A superfície circular de ruptura para qual foi determinada a probabilidade de ruptura pela seção da Estaca 122+00 foi considerada fixa e passando pela camada altamente permeável de saprolito, conforme a Figura 7. Os resultados da análise de estabilidade pelo FORM tendo como função do estado limite os Fatores de Segurança de Bishop Simplificado e de Janbu estão na Tabela 7.

## 6 Conclusões

A estrutura está em boas condições de segurança, visto que os Índices de Confiabilidade estão no intervalo de valores recomendados por WHITMAN (1984) de 3,5 a 5,0 para barragens de terra. Os Fatores de Segurança da época de construção da barragem (de projeto), simulando as condições à longo prazo, foram menores que o FS probabilístico obtido neste estudo em sua maioria. Para a superfície de ruptura escolhida, nas regiões próximas à seção da Estaca 122+00 a barragem está mais resistente do que o previsto em projeto.



**Figura 6** – Linha piezométrica apontada pelo modelo.



**Figura 7** – Superfície circular de ruptura e fatias ao final da análise de estabilidade.

**Tabela 7** – Resultados da análise de confiabilidade pelo FORM.

Função do estado limite	FS	$\beta$	pf	$c'$ (KPa)	$\phi'$ (graus)
Bishop Simplificado	3,178	4,323	0,00077%	5,73	27,41
Janbu	2,93	3,75	0,0087%	16,05	26,72

Uma vez que a superfície de ruptura foi considerada fixa, é provável que existam outras superfícies de deslizamento na mesma seção com maior probabilidade de ruptura. Isso pode nortear a continuação dos estudos.

Quanto à modelagem do fluxo, observou-se a precisão dos dados selecionados por THÁ (2007), pois apenas a alteração do coeficiente de permeabilidade da argila plástica do corpo da barragem foi suficiente para uma retroanálise satisfatória.

Para a convergência do FORM da maneira como foi apresentado, com o cálculo aproximado das derivadas parciais e com a aproximação da superfície de falha por uma série de Taylor de segunda ordem em função do Índice de Confiabilidade, é necessária uma escolha adequada do incremento  $h$  e do Índice de Confiabilidade inicial. Assim, o início do processo pode dispendar mais tempo.

O método de análise de estabilidade apresentado neste trabalho cumpriu seus objetivos de obter o Índice de Confiabilidade, a probabilidade de falha e o ponto de projeto. Outro método de confiabilidade indicado para a obtenção da probabilidade de falha e do Índice de Confiabilidade é a Simulação de Monte Carlo.

## 7 Referências Bibliográficas

- ANG, A. H.; TANG, W. H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability, v. 2, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, England: John Wiley & Sons, 2003.
- BISHOP, A. W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes, *Geotechnique*, v. 5, p. 7-17, 1955.
- BRASIL, Decreto-lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010, Política Nacional de Segurança de Barragens, Brasília, DF, 21 set. 2010.
- CHENG, Y. M.; LAU, C. K. Slope Stability Analysis and Stabilization, *New Methods and Insight*, New York: Routledge, 2008.
- CORNELL, C. A. A Probability-based Structural Code, *Journal of American Concrete Institute* 66, v. 12, p. 974-985, 1969.
- CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto, 2. Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- EL-RAMLY, H.; MORGENSTERN, N. R.; CRUDEN, D. M. Probabilistic Slope Stability Analysis for Practice, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39, p. 665-683, 2002.
- FELLENIUS, W. Calculation of the Stability of Earth Dams, *Transactions of the 2<sup>nd</sup> Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams of the World Power Conference*, v. 4, p. 445-462, 1936.
- GEO-SLOPE International Ltda. Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology, July 2010 Edition, Alberta, Canadá: GEO-SLOPE, 2012.
- HASOFER, A. M.; LIND, N. C. An Exact and Invariant First-order-reliability, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, v. 100, p. 111-121, 1974.
- ITAIPU BINACIONAL, Usina Hidrelétrica de Itaipu: Aspectos de Engenharia, Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009.
- JANBU, N. Slope Stability Computations, in: R. C. Hirschfield and S. J. Poulos (eds), *Embankment-Dam Engineering*, John Wiley, p. 47-86, 1973.
- JANBU, N.; BJERRUM, L.; KJAERNSH, B. Soil Mechanics Applied to Some Engineering Problems, *Norwegian Geotechnical Institute, publicação número 16*, 1956.
- LOWE, J.; KARAFIATH, L. Stability of Earth Dams Upon Drawdown, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, v. 2, p. 537-552, 1960.
- MELCHERS, R. E. *Structural Reliability: Analysis and Prediction*, Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1987.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of General Slip Surface, *Geotechnique*, v. 15, p. 79-93, 1965.
- NEUMANN JÚNIOR. C., OSAKO C., PATIAS J., PORCHETTO C. Reflexos de Segurança de Barragens na Itaipu Binacional, XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 2011.
- PATIAS, J. Zoneamento Geotécnico com Base em Krigagem Ordinária e Equações Multiquádricas: Barragem de Itaipu, Tese de Doutorado – Curso do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- PHOON, K. K. *Reliability-based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications*, Oxon, Inglaterra: Taylor & Francis, 2008.
- RODRIGUES, G. P. Efeito da Penetração da Chuva na Estabilidade de Encostas Argilosas – O Caso da Linha do Norte, Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- SARMA, S. K. Stability Analysis of Embankments and Slopes, *Geotechnique*, v. 23, p. 423-433, 1973.
- SHINOZUKA, M. Basic Analysis of Structural Safety, *Journal of Structural Engineering*, v. 109, p. 721-740, 1983.

SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento, 1ª Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SPENCER, E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming parallel Inter-slice Forces, *Geotechnique*, v. 17, p. 11-26, 1967.

SU, Y.; LI, X.; XIE, Z. Probabilistic Evaluation for the Implicit Limit-state Function Stability of a Highway Tunnel in China, *Tunneling and Underground Space Technology*, Elsevier, v. 26, p. 422-434, 2010.

TERZAGHI, K. Mecanismo de Escorregamento de Terra, São Paulo: Grêmio Politécnico, 1950.

THÁ, P. C. Estudos das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu, Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro, 2007.

WHITMAN, R. V. Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, v. 110, p. 145-188, 1984.