

4 Análise Probabilística de Ruptura da Barragem de Curuá-Una para Diversos Níveis do Reservatório.

Neste capítulo, será apresentado o estudo probabilístico de estabilidade da Barragem de Curuá-Una, para diversos níveis do reservatório de montante, utilizando os métodos das Estimativas Pontuais e do Segundo Momento de Primeira Ordem.

4.1 Localização

A barragem de Curuá-Una situa-se a 70 km ao sul da Cidade de Santarém, no Rio Curuá-Una, afluente da margem direita do Rio Amazonas. A barragem dista cerca de 850 km, em planta, da Cidade de Belém. Na Figura 4.1 apresenta-se a localização do aproveitamento hidrelétrico de Curuá-Una no Estado do Pará. Suas coordenadas geográficas são: 2 ° 24' 52" S e 54 ° 42' 36" W e está localizada na margem direita do Rio Tapajós, na sua confluência com o Rio Amazonas.

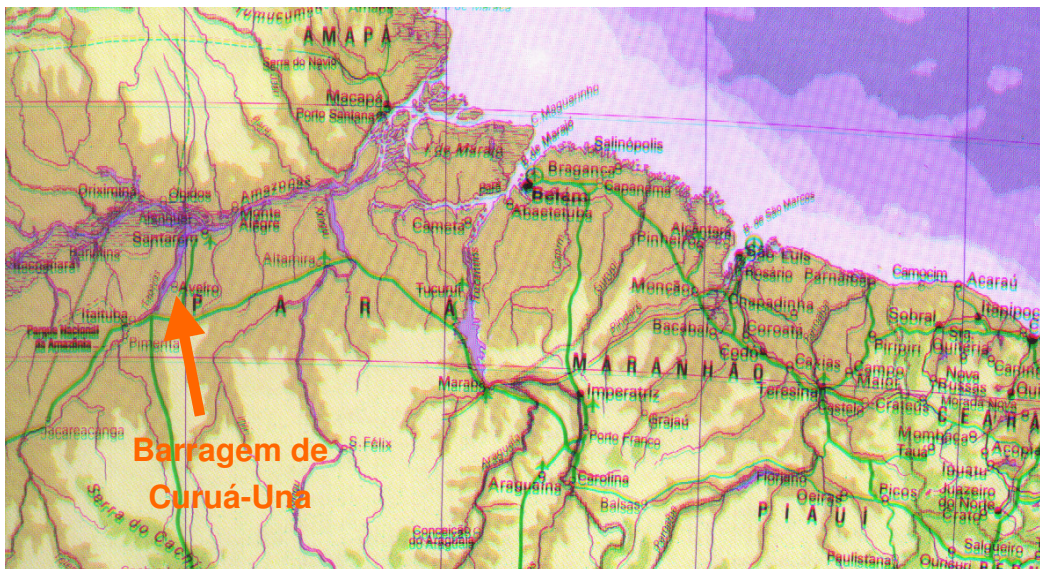


Figura 4.1 - Localização da Barragem de Curuá-Una.

4.2

Geometria, Parâmetros Geotécnicos e Posicionamento da Linha Freática.

A barragem em questão já foi assunto de outras dissertações de mestrado nas quais foram estudados o comportamento geotécnico (Ligocki, 2003) e a análise das condições de fluxo (Saré, 2003). Devido ao número reduzido de ensaios disponíveis para a determinação dos parâmetros geotécnicos (peso específico, coesão e ângulo de atrito), os coeficientes de variação utilizados nesta análise foram ajustados aos valores já consagrados pela literatura.

A geometria da barragem e os parâmetros geotécnicos estão mostrados respectivamente na Figura 4.2 e na Tabela 4.1.

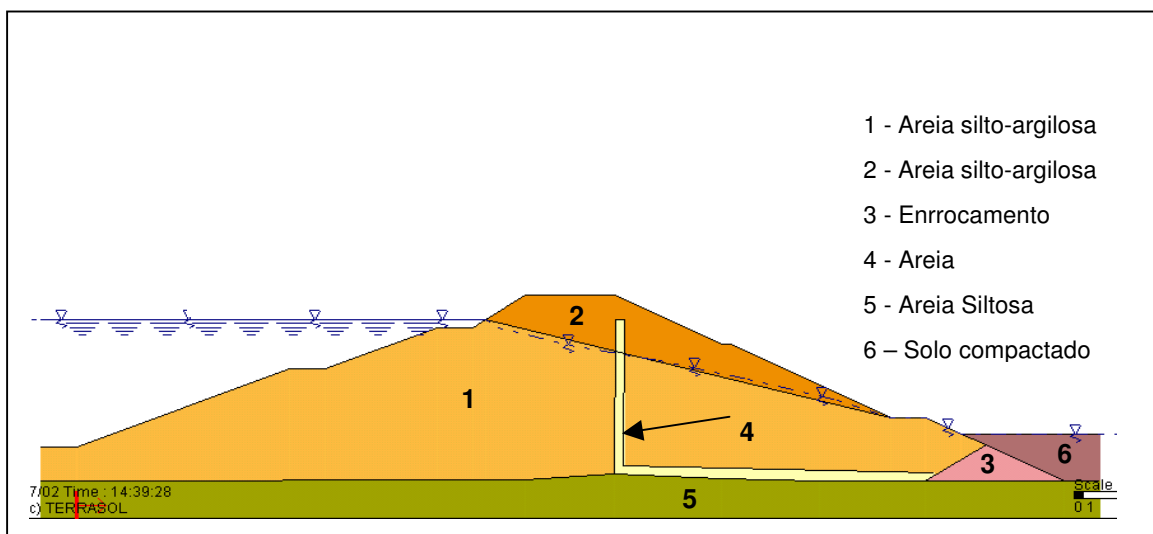


Figura 4.2 – Seção transversal da Barragem de Curuá-Una.

Tabela 4.1 – Parâmetros dos solos da Barragem de Curuá-Una.

Material	Descrição	Posição	Peso esp.	Coesão	Ang. de atrito
			total		
			kN/m ³	KPa	Graus
1	Areia silto-argilosa	Abaixo da linha Freática	19,5	0	30
2	Areia silto-argilosa	Acima da linha Freática	20,4	39	26
3	Enrocamento	Pé de jusante	20,0	0	40
4	Areia	Filtro	20,0	0	34
5	Areia siltosa	Fundação	20,0	2	32
6	Solo compactado	Reforço	20,0	10	35

Os coeficientes de variação adotados nas análises probabilísticas para todos os tipos de solo foram: peso específico igual a 3%, coesão efetiva igual a 35% e o ângulo efetivo de resistência igual a 8%.

Deve-se ressaltar que uma alteração nos valores do coeficiente de variações para os materiais 3 a 6 não teria conseqüências significativas nos resultados das análises. Isto é devido à reduzida participação destes materiais na estabilidade do talude da barragem, como será mostrado mais adiante.

A arbitragem dos coeficientes de variações para coesão e ângulo de atrito, um pouco abaixo dos valores médios indicados na Tabela 3.3, foi devido à homogeneidade dos materiais selecionados para o corpo da barragem.

As cotas da linha piezométrica, para os diversos níveis do reservatório, foram reportadas por Saré (2003), com base no monitoramento de cinco piezômetros instalados na estaca 35, nos ensaios de permeabilidade nos solos do corpo da barragem e nas simulações numérica feitas com o programa FLOW3D. A Tabela 4.2 e a Figura 4.3 mostram a posição de cada piezômetro na seção da estaca 35 e as respectivas cotas para cada nível do reservatório (NA).

Tabela 4.2 – Posição dos piezômetros com as respectivas cotas de instalação e cotas piezométricas para cada nível do reservatório.

Piezômetro	Distância horizontal em relação à crista (m)	Cota de instalação (m)	NA 67,0 (m)	NA 67,5 (m)	NA 68,0 (m)	NA 68,5 (m)	NA 69,0 (m)	NA 69,5 (m)
B35-01	0,00	59,12	61,55	61,74	61,89	62,08	62,28	62,52
B35-02	7,20	57,18	58,89	59,02	59,09	59,20	59,30	59,46
B35-03	21,50	55,98	57,08	57,16	57,19	57,25	57,29	57,37
B35-04	32,50	54,30	56,41	56,47	56,50	56,54	56,57	56,63
B35-05	46,00	53,25	55,15	55,17	55,18	55,20	55,20	55,23

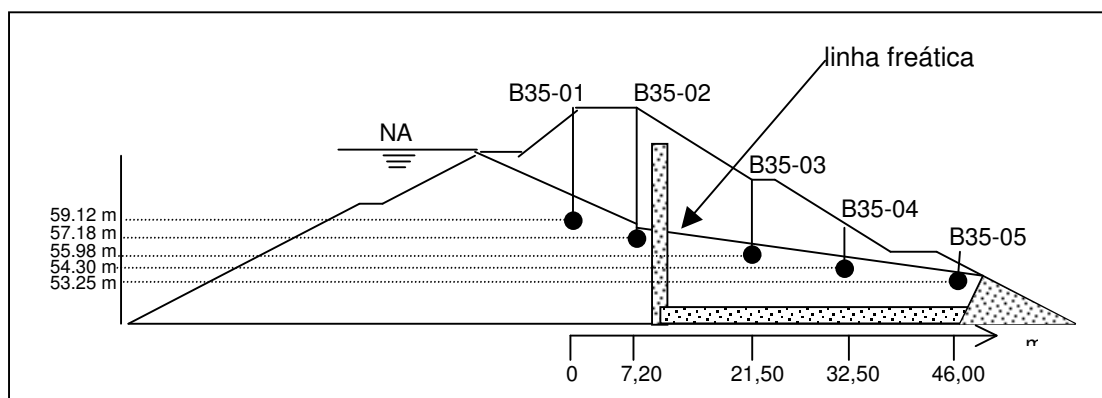


Figura 4.3 – Posicionamento dos piezômetros ao longo da estaca 35.

Na Figura 4.4, está traçada a linha piezométrica observada para o nível do reservatório igual a 67,0 m. Nota-se que, entre os piezômetros B35-02 e o piezômetro B35-03, onde a linha freática intercepta o dreno vertical, a linha piezométrica não apresenta uma descontinuidade acentuada, evidenciando um funcionamento inadequado do sistema de drenagem. Isto pode ter ocorrido devido a uma colmatação da areia ou a espessura insuficiente dos drenos (Saré 2003).

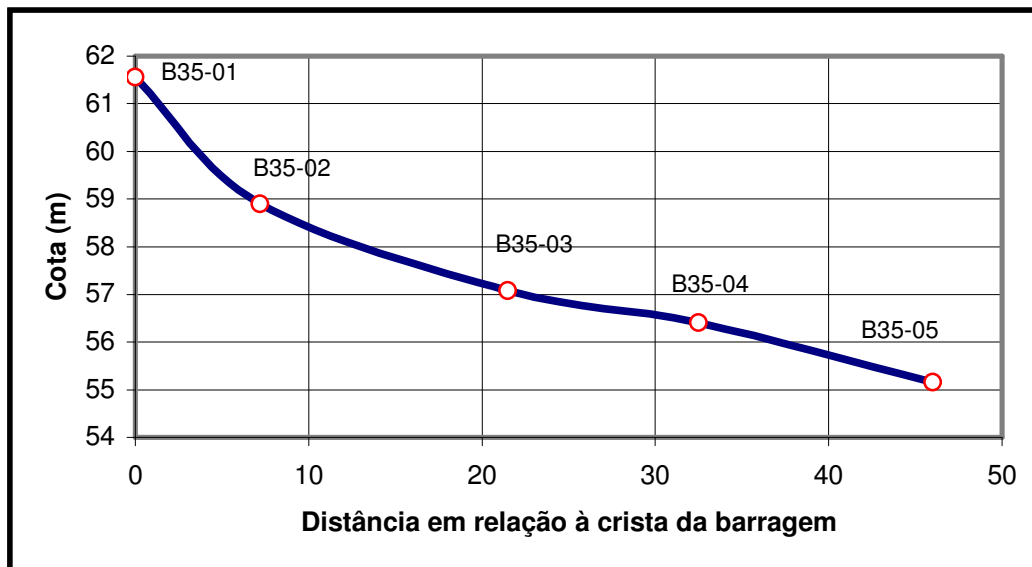


Figura 4.4 -Cota piezométrica para o nível do reservatório Iguar a 67 m (Saré 2003).

4.3

Estudos Probabilísticos

No presente estudo avaliou-se a probabilidade de ruptura do talude de jusante, correspondente a diversos níveis do reservatório da barragem, utilizando-se os métodos das Estimativas Pontuais e do Segundo Momento de Primeira Ordem. Em cada método, foram feitas duas avaliações. Na primeira foi calculada a probabilidade de ruptura, mantendo-se fixa a superfície crítica relativa a cada variação de parâmetro. Na segunda, permitiu-se a variação da superfície crítica em função das variações de cada parâmetro.

4.3.1

Programa Determinístico

Para o cálculo do coeficiente de segurança relativo a cada cota do nível d'água do reservatório, utilizou-se o programa XSTABL (1990), que emprega em sua rotina o método de Bishop Simplificado (1955) ou o de Janbu (1967), para as análises de estabilidade.

4.3.1.1

Dados de Entrada

Para a análise, deve-se ter como dados de entrada no programa os parâmetros de resistência (c' , ϕ'), os pesos específicos natural e saturado de todas as camadas de solo que compõem o talude, bem como o perfil típico referido a um sistema de coordenadas. Também devem ser fornecidas as coordenadas cartesianas das linhas piezométricas ou da linha freática (o programa fornece as duas opções). Complementando os dados de entrada, necessita-se definir a região a montante e a jusante do talude, por onde o círculo potencial de ruptura deverá passar. Existe, no entanto, a opção de se pré definir uma superfície de ruptura para o cálculo da estabilidade.

4.3.1.2

Dados de Saída

O programa fornece, como dados de saída, o fator de segurança do talude e as coordenadas para as dez superfícies de rupturas mais críticas, segundo o método determinístico considerado (Bishop Simplificado ou Janbu).

4.3.2

Procedimentos e resultados

Nas análises determinísticas pelo Método do Segundo Momento, impôs-se um incremento de mais 10% nas variáveis aleatórias nos parâmetros envolvidos no cálculo da variância do fator de segurança, conforme sugerido por Sandroni e Sayão (1992).

Nas análises pelo Método das Estimativas Pontuais os seguintes parâmetros foram utilizados: peso específico e ângulo de atrito do material abaixo da linha freática do corpo da barragem; e a coesão do material acima da mesma. Como se pode ver no gráfico da Figura 4.5 e nas planilhas de cálculo do Anexo 2 (A2.1 à A2.12), estes três parâmetros citados têm um peso de mais de 98% na variância do fator de segurança. Também foi feita uma análise pelo método do Segundo Momento, empregando-se somente esses três parâmetros. Não foi considerada, nas análises, a flutuação das cotas piezométricas, para cada NA, como uma variável aleatória. Essa flutuação é uma variável importante que, com certeza, teria uma forte influência na probabilidade de ruptura. Devido

à falta de informação das variâncias de cada piezômetro em relação ao NA, esse parâmetro não foi levado em consideração. Tal fato, não invalida o propósito da pesquisa que é a comparação de resultados entre dois métodos probabilísticos e a comparação entre se fixar ou não a superfície potencial de ruptura nos procedimentos das análises. Os cálculos determinísticos dos fatores de segurança foram obtidos, sempre, pelo método de Bishop Simplificado.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.3, no Anexo 2 (Tabelas A2.1 a A2.36) e nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9.

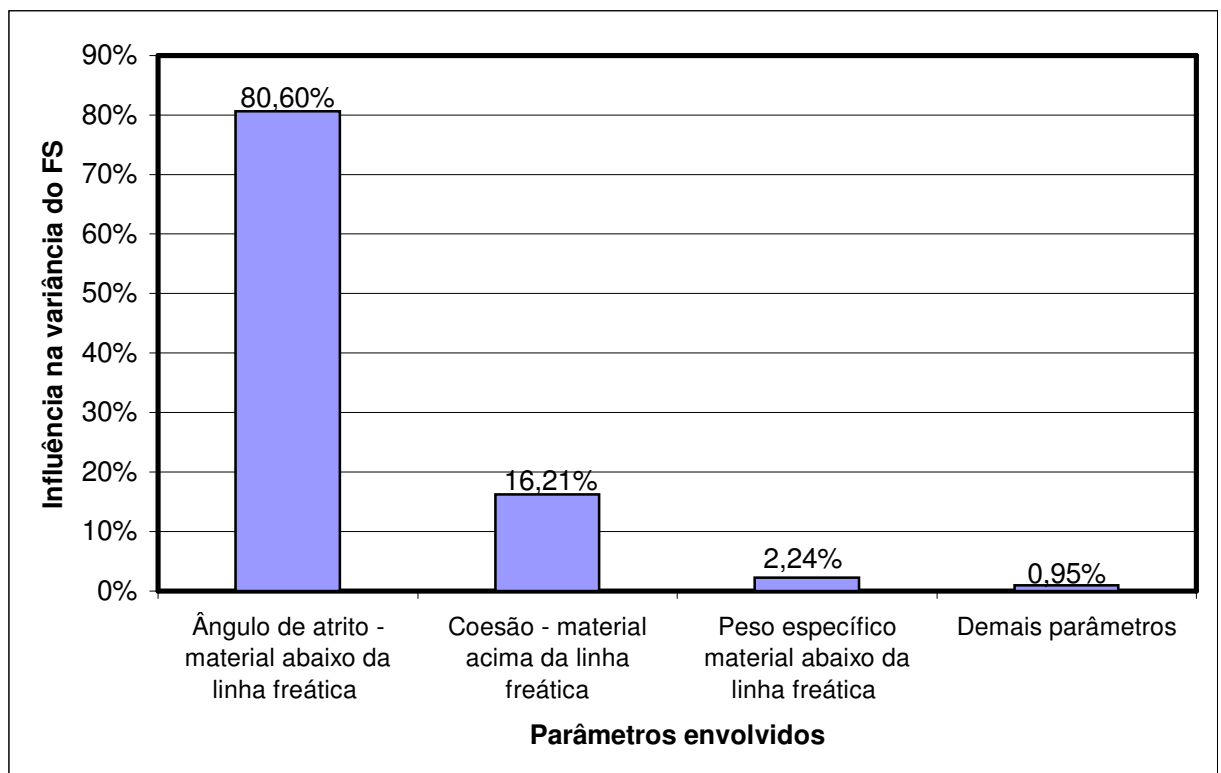


Figura 4.5 – Influência dos parâmetros geotécnicos na variância do FS para o caso do NA igual a 67,0m e mantendo-se a superfície de ruptura fixa.

Tabela 4.3 – Resultados das análises

COTA DO NA (m)	MÉTODO SEGUNDO MOMENTO DE 1ª ORDEM				MÉTODO ESTIMATIVAS PONTUAIS	
	S. R. MÓVEL COM	S. R. FIXA COM	S. R. MÓVEL COM	S. R. FIXA COM	S. R. MÓVEL COM	S. R. FIXA COM
	18 VARIÁVEIS*	18 VARIÁVEIS*	3 VARIÁVEIS**	3 VARIÁVEIS**	3 VARIÁVEIS**	3 VARIÁVEIS**
67,0	1 / 5376 $\beta = 3,56$	1 / 4762 $\beta = 3,53$	1 / 5818 $\beta = 3,58$	1 / 5085 $\beta = 3,54$	1 / 28265 $\beta = 3,97$	1 / 26316 $\beta = 3,96$
67,5	1 / 4310 $\beta = 3,50$	1 / 3279 $\beta = 3,43$	1 / 4625 $\beta = 3,52$	1 / 3494 $\beta = 3,44$	1 / 17325 $\beta = 3,86$	1 / 17603 $\beta = 3,86$
68,0	1 / 3145 $\beta = 3,42$	1 / 2618 $\beta = 3,37$	1 / 3342 $\beta = 3,43$	1 / 2774 $\beta = 3,38$	1 / 12610 $\beta = 3,78$	1 / 11879 $\beta = 3,76$
68,5	1 / 2347 $\beta = 3,34$	1 / 1754 $\beta = 3,25$	1 / 2498 $\beta = 3,35$	1 / 1837 $\beta = 3,27$	1 / 7862 $\beta = 3,66$	1 / 8045 $\beta = 3,66$
69,0	1 / 1232 $\beta = 3,15$	1 / 952 $\beta = 3,07$	1 / 1238 $\beta = 3,15$	1 / 956 $\beta = 3,08$	1 / 1356 $\beta = 3,18$	1 / 1278 $\beta = 3,16$
69,5	1 / 406 $\beta = 2,81$	1 / 371 $\beta = 2,78$	1 / 409 $\beta = 2,81$	1 / 376 $\beta = 2,79$	1 / 539 $\beta = 2,90$	1 / 532 $\beta = 2,90$

S. R. – Superfície de ruptura

* - Variáveis: $\gamma_{\text{solo}1}$, $\gamma_{\text{solo}2}$, $\gamma_{\text{solo}3}$, $\gamma_{\text{solo}4}$, $\gamma_{\text{solo}5}$, $\gamma_{\text{solo}6}$, $C_{\text{solo}1}$, $C_{\text{solo}2}$, $C_{\text{solo}3}$, $C_{\text{solo}4}$, $C_{\text{solo}5}$, $C_{\text{solo}6}$,

$\phi_{\text{solo}1}$, $\phi_{\text{solo}2}$, $\phi_{\text{solo}3}$, $\phi_{\text{solo}4}$, $\phi_{\text{solo}5}$, $\phi_{\text{solo}6}$

** - Variáveis: $\gamma_{\text{solo}1}$, $C_{\text{solo}2}$, $\phi_{\text{solo}1}$

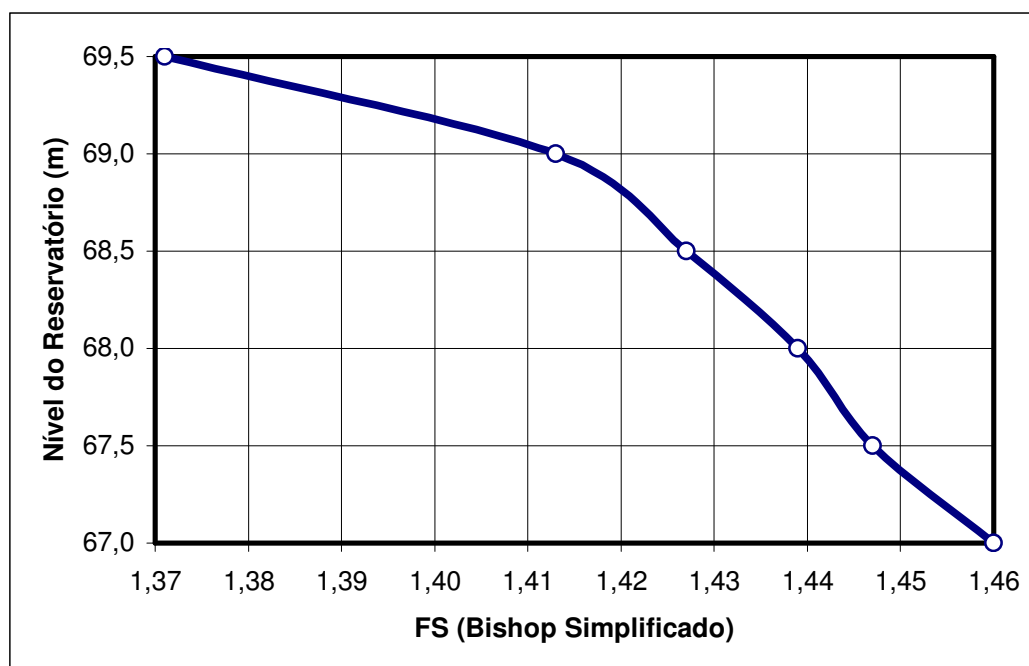


Figura 4.6 - Fator de segurança em função do nível do reservatório.

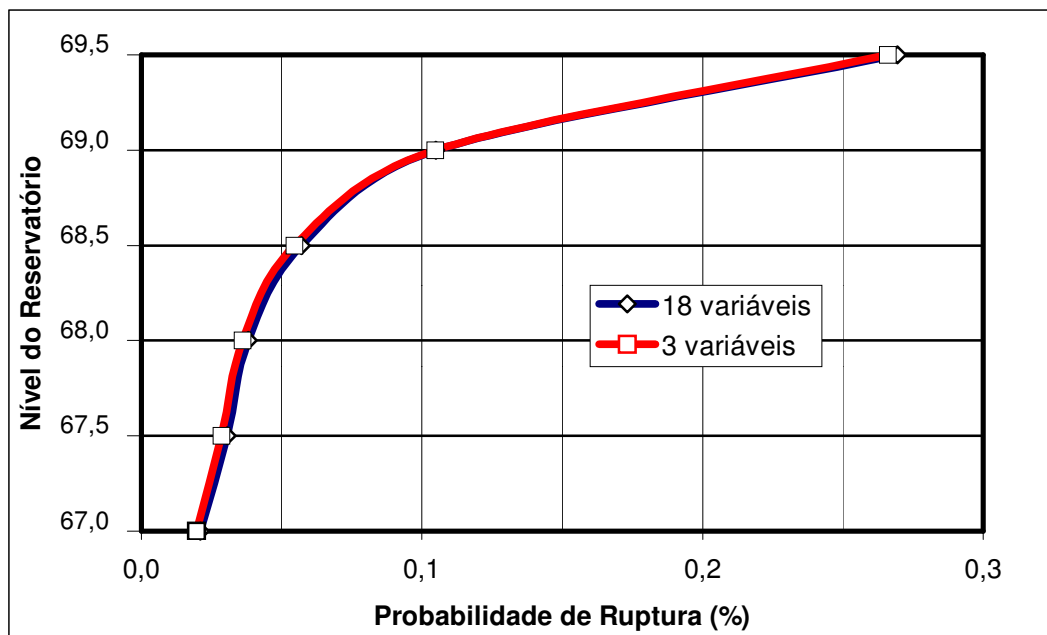


Figura 4.7 - Comparação dos resultados das análises probabilísticas com o método do Segundo Momento utilizando 3 ou 18 variáveis.

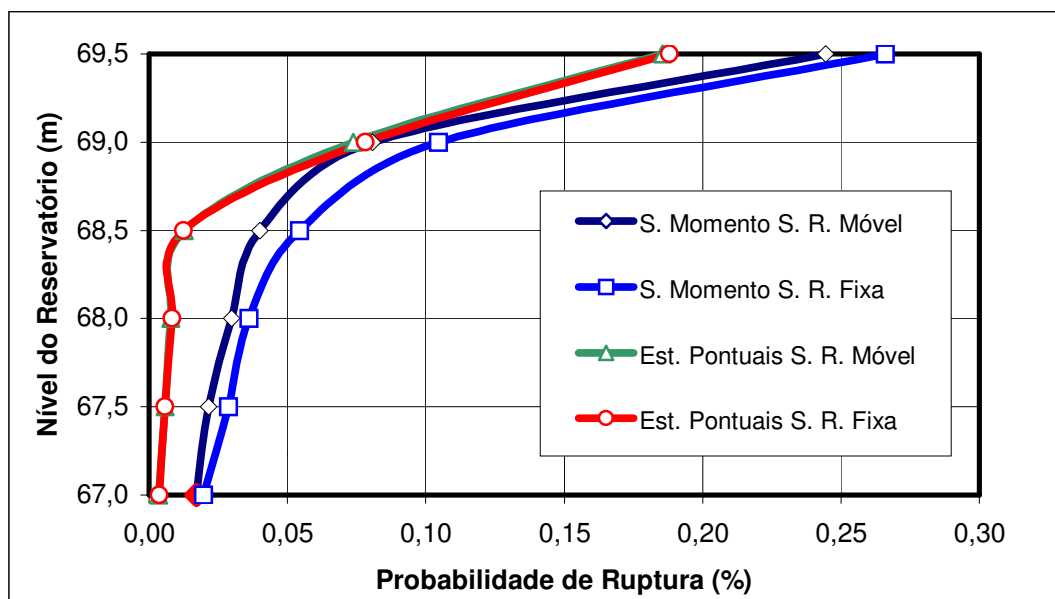


Figura 4.8 - Comparação das análises probabilísticas utilizando 3 variáveis, com os métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais considerando a superfície Fixa ou variável.

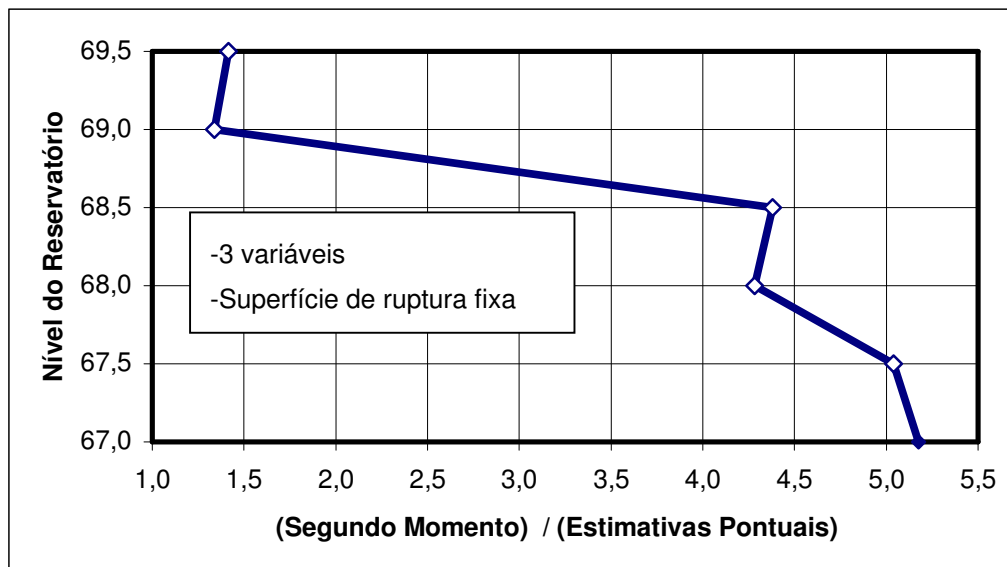


Figura 4.9 - Razão das probabilidades de ruptura calculadas pelos métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais.

4.4

Análise dos resultados

4.4.1

Números de variáveis

A utilização de somente 3 parâmetros, ao invés de 18, como variáveis aleatórias, acarretou probabilidades de rupturas maiores com o método do Segundo Momento. As diferenças nos resultados obtidos foram, porém, pequenas, conforme mostram a Tabela 4.3 e a Figura 4.7. Tal ocorrência se explica devido à variância do fator de segurança aumentar com a utilização de um maior número de variáveis aleatórias, implicando em um menor valor de confiabilidade. A reduzida diferença nos resultados é consequência da pequena sensibilidade dos demais parâmetros. Não foi feita a mesma comparação para o método das Estimativas Pontuais devido ao grande número de análises determinísticas necessárias. Por exemplo, para um caso com 18 variáveis, o número de análises requerido é 2^{18} , ou 262.144.

4.4.2

Fixação da superfície de ruptura

Os dois métodos probabilísticos forneceram valores de PR diferentes ao se fixar ou mover a superfície de potencial de ruptura devido à variação de cada parâmetro (Figura 4.8). No método do Segundo Momento, os valores de PR foram maiores quando se manteve fixa a superfície de ruptura, para todos os níveis do reservatório. Ao se fixar a superfície de ruptura no método do Segundo Momento, as variáveis que acarretam um acréscimo no fator de segurança com o incremento de 10 %, geram variâncias maiores do que quando a superfície de ruptura é móvel.

Efeito contrário ocorre nas variáveis que acarretam uma redução do fator de segurança com o incremento de 10%. Assim, o maior ou menor valor calculado para a probabilidade de ruptura, ao se fixar ou não a superfície de ruptura, está diretamente ligado ao número e ao tipo das variáveis envolvidas. Esta diferença nos resultados, considerando-se a superfície de ruptura fixa ou móvel, será muito menor se o método da diferença finita central, sugerido por Mostyn e Li (1993), for usado no cálculo das derivadas parciais. Este método está comentado no item 3.3.2.3.

No método das Estimativas Pontuais, os valores de probabilidade de ruptura foram maiores para os níveis 67,0m, 68,0m, 69,0m e 69,5m, sendo menores para os níveis 67,5m e 68,5m. No entanto, a diferença foi muito pequena, conforme mostrada na Tabela 4.3. A pequena magnitude da diferença, ao se fixar ou não a superfície de ruptura, está ligada ao fato do método das Estimativas Pontuais empregar variações positiva e negativa, de iguais valores, no cálculo da variância do fator de segurança.

Assim, quando, ao se fixar a superfície de ruptura, uma variável x_i , acrescida de seu desvio padrão σ_i , acarreta um fator de segurança FS_{f+} , então, ao se deixar móvel a superfície de ruptura, ocorre um novo fator de segurança FS_{m+} , que será menor do que FS_{f+} . No cálculo do fator de segurança, para cada permutação de $x_i + \sigma_i$, existe um valor de fator de segurança calculado com a variável $x_i - \sigma_i$. Como as diferenças entre os valores de FS_{f+} (obtida por $x_i + \sigma_i$) - FS_{f-} (obtida por $x_i - \sigma_i$) e entre os valores de FS_{m+} (obtida por $x_i + \sigma_i$) - FS_{m-} (obtida por $x_i - \sigma_i$) são praticamente iguais, não há alteração significativa no cálculo da

confiabilidade ao se fixar ou variar a superfície potencial de ruptura. A explicação citada está ilustrada no diagrama da Figura 4.10.

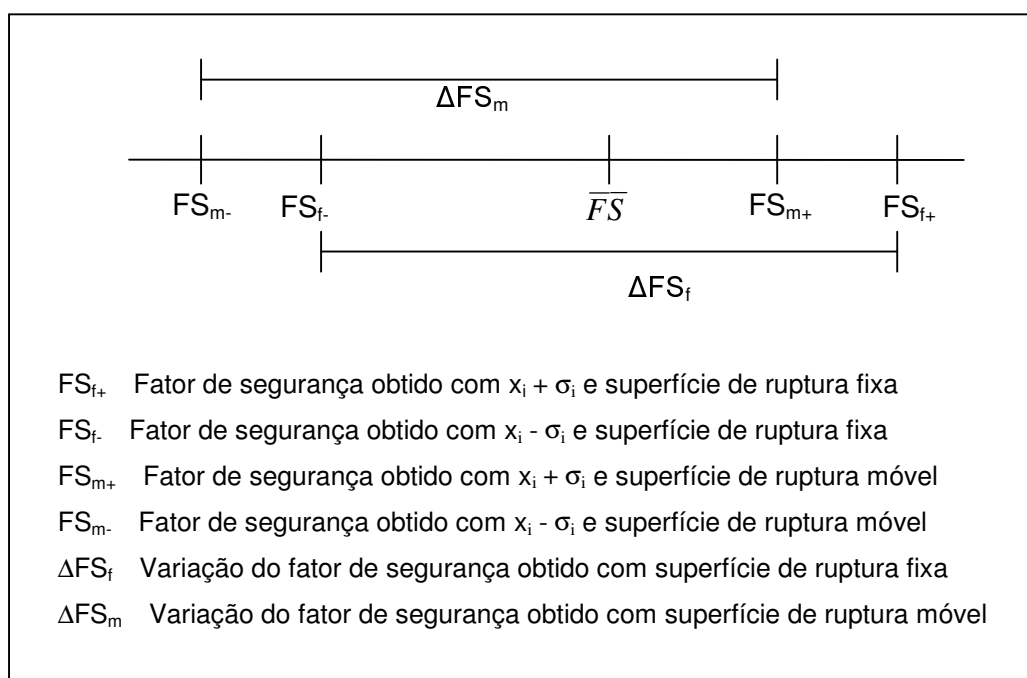


Figura 4.10 – Diagrama comparativo das variações de FS no método das Estimativas Pontuais, com superfície potencial de ruptura fixa ou móvel

4.4.3

Comparação entre os métodos

Os valores de probabilidade de ruptura encontrados pelo método do Segundo Momento foram maiores do que os valores obtidos pelo método das Estimativas Pontuais. A diferença foi maior para as cotas mais baixas do nível do reservatório, nas quais as probabilidades de instabilidade são menores como pode ser verificado no gráfico da Figura 4.8. As maiores probabilidades de ruptura obtidas pelo método do Segundo Momento podem ser justificadas pelos menores valores de fatores de segurança médios \overline{FS} encontrados por tal método em relação ao método das Estimativas Pontuais. Além disto, nota-se uma maior variância do fator de segurança calculada através do Método do Segundo Momento.

A diminuição das diferenças das probabilidades de ruptura entre os dois métodos para maiores cotas do nível d'água está relacionada à diminuição da diferença das variâncias com o aumento da cota freática.

Como mencionado anteriormente, no Capítulo 3, a Simulação de Monte Carlo, por ser um método direto, é um método mais rigoroso do que os métodos das Estimativas Pontuais e do Segundo Momento. Teoricamente, os resultados obtidos com o método do Segundo Momento, devido às aproximações sofridas em sua formulação, deveriam apresentar maiores diferenças em relação à Simulação de Monte Carlo, quando comparado com as Estimativas Pontuais. Tal fato não foi reportado por Guedes (1997) no caso da análise probabilística da estabilidade de um talude de mineração. Guedes realizou comparações entre os três métodos citados acima, para diversas inclinações e alturas do talude em estudo. Houve situações nas quais o método do Segundo Momento aproximou-se mais de Monte Carlo do que as Estimativas Pontuais, e houve também situações inversas a esta. Assim, não se pode chegar a uma afirmação conclusiva sobre as análises comparativas.