

7 INVESTIGAÇÃO DO ATERRO EM MUAR

As técnicas probabilísticas tradicionais de probabilidade de estabilidade de taludes (Segundo Momento e Estimativas Pontuais) serão aplicadas para a avaliação da probabilidade de ruptura de um aterro experimental na Malásia.

Análises probabilísticas neste aterro foram realizadas por El-Ramly (2001) utilizando a metodologia descrita no Capítulo 4. Como esta técnica é pouco prática para uso na engenharia, serão avaliadas as técnicas usuais com o fator de redução da variância da variabilidade espacial, como descrito no Capítulo 3 (equação 3.27).

Uma vez determinada a probabilidade de ruptura correspondente à instabilidade do aterro, serão calculados os valores de P_r para diferentes alturas do aterro. Isto permitirá estabelecer uma relação entre a probabilidade de ruptura, a altura do aterro e o fator de segurança determinístico, mostrando a eficiência dos métodos probabilísticos como complementos das análises determinísticas.

7.1. Introdução

O Departamento de Estradas da Malásia construiu um aterro de grande escala sobre um depósito de argila marinha muito mole, com o objetivo de otimizar o procedimento de projeto. As investigações constaram de uma série de ensaios e instrumentação de campo para monitorar o comportamento do aterro.

Nesta investigação, foram convidados 30 engenheiros geotécnicos para fazer previsões sobre a conduta do aterro durante os diferentes estágios da construção até a ruptura. As conclusões e previsões destes engenheiros foram discutidas e resumidas por Brand e Premchitt (1989).

7.2. Estratigrafia do Terreno e Características do Aterro

O aterro foi construído sobre um área de 55 x 90m, com taludes de 2h:1v. Na construção foram usadas argilas arenosas e areias argilosas compactadas. No instante da ruptura, a altura do aterro era de 5,4m.

A estratigrafia do terreno era composta inicialmente por uma crosta de aproximadamente 2m de espessura de uma argila resistente. Embaixo, encontrava-se uma argila siltosa de alta compressibilidade, com espessura de 6m, seguida por outra camada de argila siltosa mole de 9m de espessura aproximadamente.

Posteriormente foi encontrada uma lente de turfa altamente compressível de 0,70m de espessura, sobre uma densa argila arenosa. As Figuras 7.1 e 7.2 mostram a geometria do aterro e a estratigrafia do terreno respectivamente.

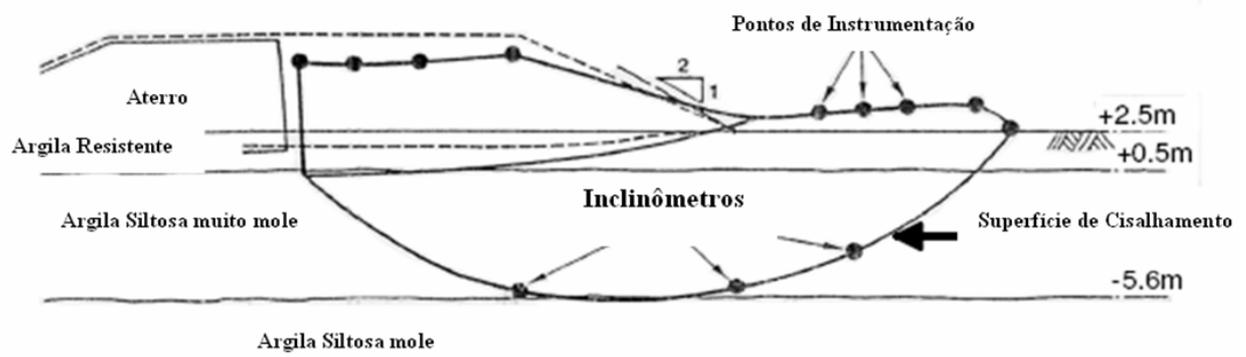


Figura 7.1 - Superfície de ruptura observada no aterro sobre solo mole, Brand e Premchitt (1989)

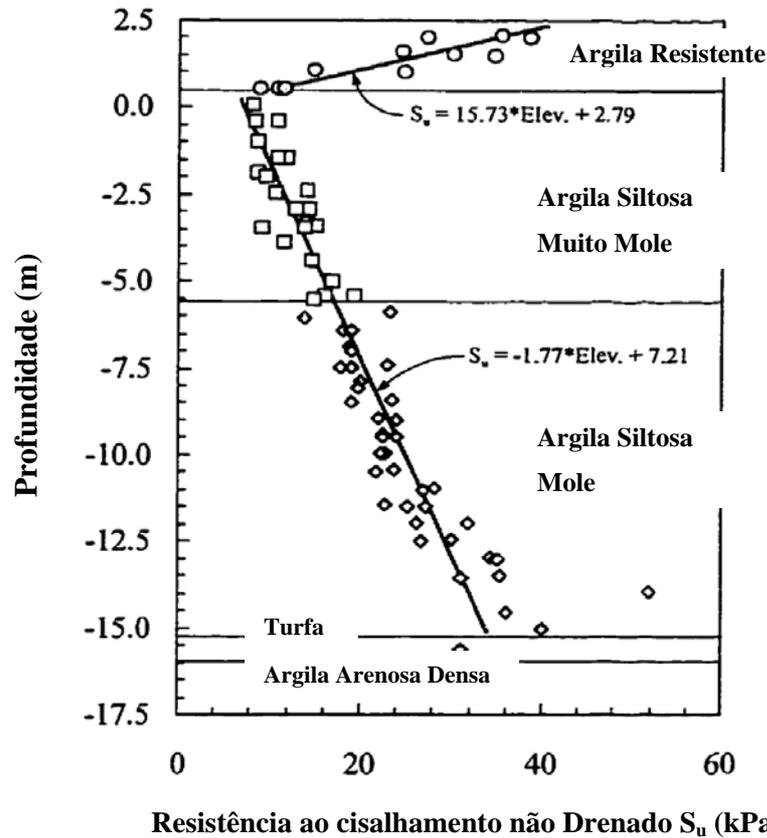


Figura 7.2 – Estratigrafia e resistência não drenada encontrada no campo.

7.3. Propriedades de Resistência do Solo de Fundação

Do início da construção até a ruptura transcorreram apenas 100 dias, e a ruptura ocorreu um dia depois que se desenvolveu uma trinca longitudinal perto do centro do aterro (Figura 7.3). Consideraram-se assim as análises de estabilidade de taludes sob condições não drenadas.

Brand e Premchitt (1989) indicaram a superfície de ruptura desenvolvida, a qual foi determinada pelos inclinômetros (Figura 7.1). Pode-se apreciar claramente que a superfície de deslizamento foi circular, e que a estabilidade do aterro estava fortemente controlada pelas propriedades de resistência da argila siltosa muito mole.



Figura 7.3 – Ruptura do aterro após 100 dias de construção.

No local, foi feita uma série de ensaios de palheta para determinar a resistência não drenada dos materiais (Figura 7.2).

Pode-se observar uma diminuição da resistência não drenada com a profundidade na argila da crosta. Posteriormente, registra-se um incremento constante com a profundidade na argila siltosa muito mole, e na argila siltosa mole, os incrementos de resistência não drenada nestas duas argilas moles parecem ter uma tendência com a profundidade única, pode-se, portanto, estabelecer uma tendência nestas duas camadas.

A Tabela 7.1 resume as principais propriedades físicas e mecânicas encontradas nestes materiais.

Tabela 7.1 - Propriedades físicas e mecânicas das camadas argilosas.

Camada	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Compressibilidade	Peso Específico (kN/m³)
Argila na crosta	90	30	-----	15,5
Argila siltosa muito mole	80	27	1,75	14,0
Argila siltosa mole	55	23	1,05	16,0

A Tabela 7.1 mostra claramente que todas as camadas de argila são altamente plásticas, e as camadas de argila mole são altamente compressíveis, em especial a camada de argila siltosa muito mole.

Da Figura 7.2 podem-se obter duas linhas de tendência da resistência não drenada com a profundidade. A primeira encontra-se na argila da crosta, e a segunda nas argilas moles, já que estas apresentam um incremento constante como visto na Figura 7.2.

A Tabela 7.2, mostra os parâmetros das linhas de tendência obtidas segundo os critérios descritos no Capítulo 3.

Tabela 7.2 – Linhas de tendência da resistência não drenada (S_u).

Tipo de Solo	Média		Desvio Padrão	
			Variabilidade Espacial	Erro Estatístico
Argila da Crosta	Inclinação	15,73	-----	2,49
	Intercepto	2,79	-----	3,62
	Residuais	-----	4,55	-----
Argila Mole	Inclinação	-1,77	-----	0,07
	Intercepto	7,21	-----	0,63
	Residuais	-----	2,45	-----

7.4. Propriedades de Resistência do Aterro

Os materiais utilizados neste aterro foram de origem granítica, descritos como argilas arenosas a areias argilosas. Neste material foram realizados três ensaios triaxiais não consolidados não drenados (UU), e dois triaxiais drenados (CD). Os resultados estão mostrados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Propriedades de resistência do aterro.

Ensaio Triaxial	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
UU	12 -26	64 - 19
CD	31	14

Condições não drenadas foram consideradas adequadas neste material. A resistência não drenada (S_u) foi estabelecida em 60kPa. A incerteza associada nesta determinação é grande, devido principalmente à incompatibilidade de deformações necessárias para mobilizar a resistência máxima do aterro e do terreno de fundação.

A escolha da resistência a ser considerada é deixada a cargo da experiência e julgamento do engenheiro. Alguns engenheiros consideram alguma porcentagem da resistência do aterro, e outros não consideram nenhuma contribuição, pelo que considerar esta variável como uma variável aleatória é de suma importância. Foi considerado um desvio padrão de 12 kPa ($COV = 0,2$) adequado neste material.

7.5. Fator de Correção de Bjerrum

A resistência não drenada obtida pelo ensaio de palheta é em geral superestimada, sendo comum a utilização do fator de correção proposto por Bjerrum (Figura 7.4), o qual é função do índice de plasticidade do solo.

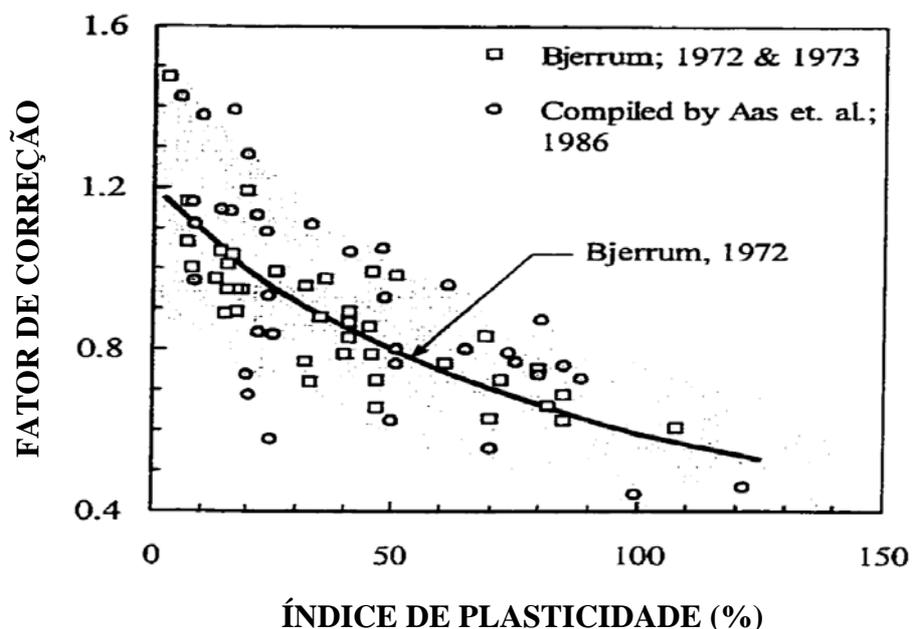


Figura 7.4 – Fator de correção da resistência não drenada.

Da Tabela 7.1 podem ser obtidos os índices de plasticidade. A argila na crosta tem um índice de plasticidade de 60%, enquanto que a argila mole tem IP= 50%. Com estes resultados, foram obtidos fatores de correção de 0,75 e 0,80, respectivamente.

Da Figura 7.4 pode-se apreciar a grande dispersão dos dados ao redor da tendência. Na realidade, este fator de correção não é uma variável determinística, pelo que foi modelada como uma variável aleatória, com um desvio padrão de 0,15 (COV= 0,2).

Em geral a equação que descreve a resistência não drenada com a profundidade nos dois materiais segue os princípios propostos no Capítulo 3. A equação 7.1 mostra como foram considerados os dados:

$$Su = (B + \sigma_B) [(A + \sigma_A)z + (D + \sigma_D) + \sigma_{VE}] \quad (7.1)$$

Onde as letras A e D são os parâmetros da linha de tendência, σ_A e σ_D são os desvios padrões devido ao erro estatístico, σ_{VE} é o desvio padrão da variabilidade espacial (dispersão dos dados ao redor da meia), B é o fator de correção de Bjerrum e σ_B é o desvio padrão.

7.6. Análise Determinística de Estabilidade de Taludes

Como mostra a Figura 7.1, a superfície de ruptura na fundação é circular. Assim, o fator de segurança é obtido segundo Bishop, utilizando as médias das propriedades dos materiais (itens 7.3 a 7.5.).

O fator de segurança foi calculado como 1,106. A Figura 7.5 mostra a superfície de ruptura encontrada, o fator de segurança obtido se encontra ligeiramente superior à unidade indicando uma estabilidade precária. Como ocorreu a ruptura, algum parâmetro de resistência ao cisalhamento foi superestimado. A resistência ao cisalhamento no aterro a qual foi determinada sem muita precisão é talvez a mais provável de ter sido superestimada.

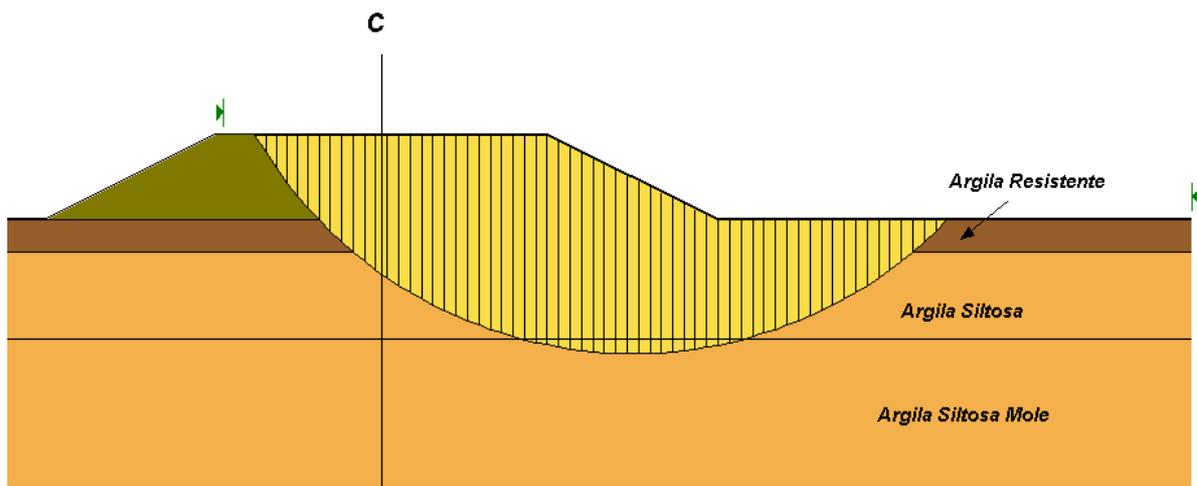


Figura 7.5 – Superfície de ruptura segundo Bishop.

7.7. Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes

As análises probabilísticas foram realizadas pelos métodos de Segundo Momento e de Estimativas Pontuais na superfície crítica determinística obtida. As análises foram realizadas inicialmente sem redução da variância da variabilidade espacial, e posteriormente com a redução.

No método de Segundo Momento foram consideradas quatro metodologias distintas para as derivadas parciais: desvio padrão, 50% do desvio padrão, 20% do desvio padrão e 10% do desvio padrão.

7.7.1. Análises Probabilísticas Assumindo Perfeita Autocorrelação dos Parâmetros

Nesta análise não foram corrigidas as variâncias da variabilidade espacial. As análises probabilísticas foram feitas considerando 5 variáveis aleatórias: as resistências ao cisalhamento não drenado (S_u) de todos os materiais (aterro, argila na crosta e argila mole), seguindo a equação 7.1, junto com os fatores de correção de Bjerrum da argila da crosta e da argila mole.

A Figura 7.6 mostra os resultados obtidos. As diferenças encontradas na obtenção da probabilidade de ruptura no método do Segundo Momento devido às diferentes amplitudes das derivadas parciais são desprezíveis.

A diferença entre as probabilidades de ruptura encontradas nos métodos de Segundo Momento e Estimativas Pontuais é mínima, seja com a hipótese de distribuição Normal ou Log-Normal do fator de segurança.

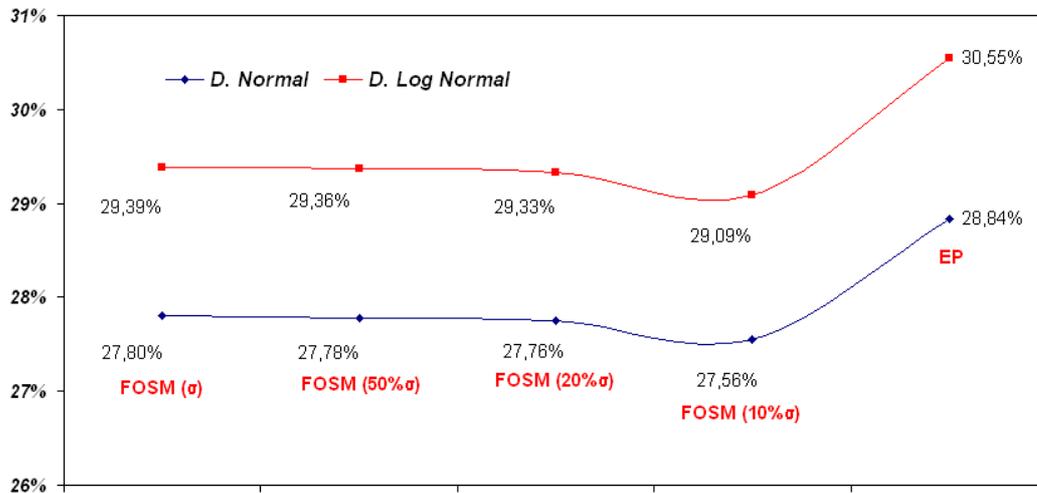


Figura 7.6 – Probabilidade de ruptura, método de Bishop.

A Figura 7.7 mostra a contribuição na variância do fator de segurança de cada componente, no método de Segundo Momento. Pode ser observado que a resistência não drenada da argila mole (Su_c) e do aterro (Su_{fill}) são as que mais contribuem, seguido pelo fator de correção B_c na argila mole. As propriedades da argila na crosta têm pouco efeito no cálculo.

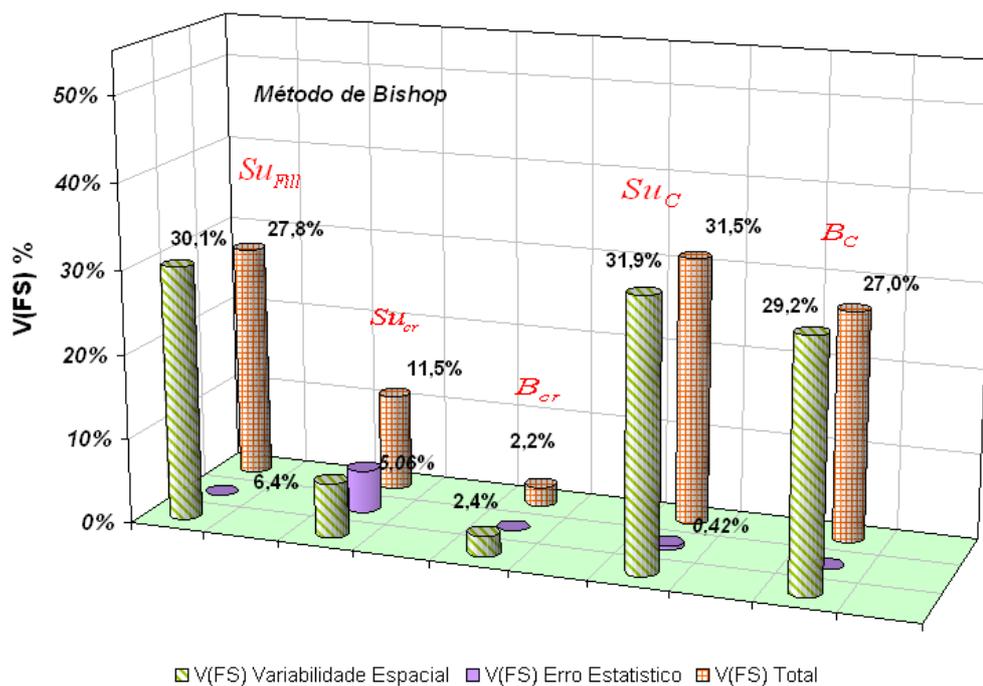


Figura 7.7 – Contribuição na variância do fator de segurança dos parâmetros.

7.7.2. Análises Probabilísticas Considerando a Variabilidade Espacial dos Parâmetros de Solo

Para avaliar o efeito da redução da variância da variabilidade espacial nas análises probabilísticas, foi utilizado a equação 3.27 (Capítulo 3) como fator de correção. Nos métodos de Segundo Momento de Estimativas pontuais, como descritos no Capítulo 5.

Antes da utilização de este fator de correção (f) é preciso determinar as distâncias de autocorrelação representativas neste material. Esta argila marinha mostra uma estrutura continua antes que errática, portanto podem-se esperar distâncias de autocorrelação maiores.

Distâncias de autocorrelação entre 30 e 40m na direção horizontal e de 1 até 3m na direção vertical, são consideradas possíveis neste material. Como observado na Figura 7.5, mais de 75% da superfície de ruptura se encontra na argila mole. Portanto, será somente considerada a redução neste material.

A Figura 7.5 mostra também que superfície de ruptura na argila mole não tem uma estrutura espacial numa direção específica (vertical ou horizontal). Portanto é preciso assumir uma estrutura espacial isotrópica a traves de uma distância de autocorrelação isotrópica, a qual pode ser obtida da equação 3.31. É considerado apropriado uma distância de autocorrelação isotrópica entre 5 – 15m, com uma média de 10m, estas distâncias de autocorrelação são as mesmas utilizadas por El-Ramly (2001).

As Figuras 7.8 e 7.9 mostram as probabilidades de ruptura encontradas no método de Segundo Momento, considerando distintas amplitudes das derivadas parciais e distribuições de probabilidade do fator de segurança (Normal e Log-normal).

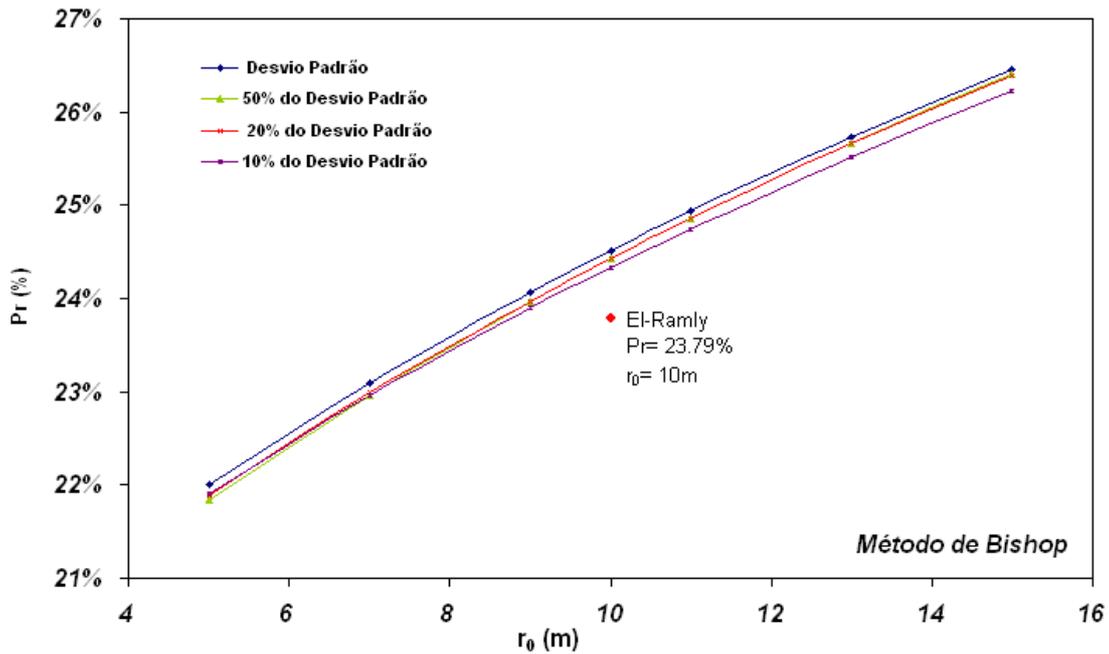


Figura 7.8 – Probabilidade de ruptura, método de segundo momento, distribuição normal do fator de segurança.

As diferenças entre a hipótese de uma distribuição de probabilidade normal ou Log-Normal do fator de segurança é pequena. Em resumo a probabilidade de ruptura encontra-se entre 22,19% e 27,02 %, para distâncias de autocorrelação entre 5 e 15m.

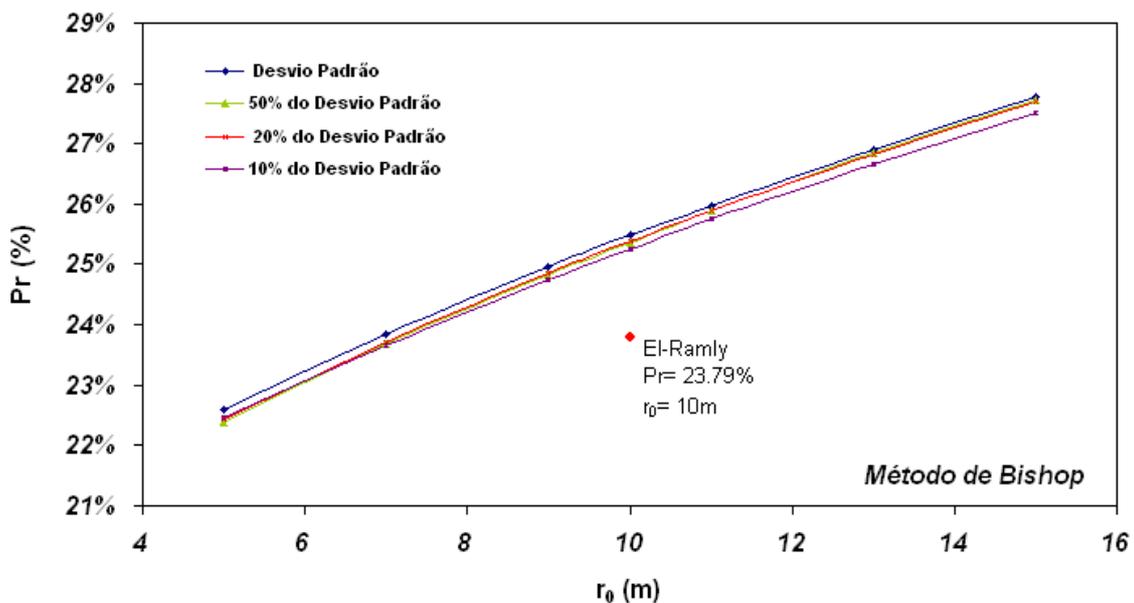


Figura 7.9 - Probabilidade de ruptura, método de segundo momento, distribuição log-normal do fator de segurança.

A Figura 7.10 mostra as probabilidades de ruptura no método de Estimativas Pontuais, as quais se encontram entre 14 e 26% para distâncias de autocorrelação entre 5 e 15m. A diferença de probabilidade encontrada neste método é maior que do Segundo Momento, mas a probabilidade de ruptura para uma distância de autocorrelação de 10m foi de 22% em média, o qual é muito próximo ao valor de 23,79%, reportado por El-Ramly 2001.

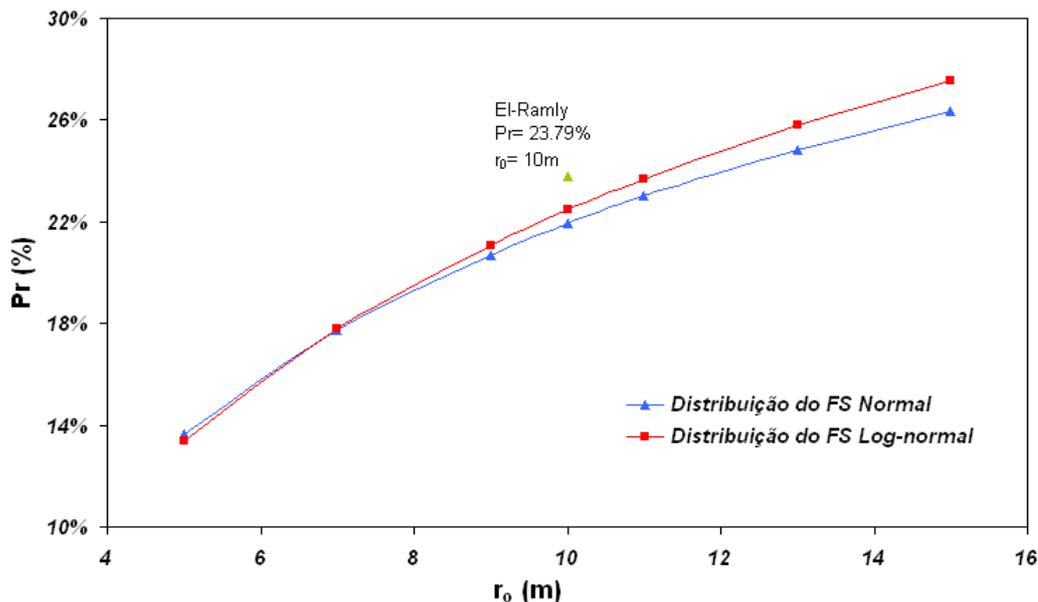


Figura 7.10 - Probabilidade de ruptura, método de estimativas pontuais, distribuição normal e log-normal do fator de segurança.

Os dois métodos (Segundo Momento e Estimativas Pontuais) junto com o fator de correção (Equação 3.27) mostram-se adequados para o cálculo da probabilidade de ruptura numa distância de autocorrelação de 10m.

O método de Estimativas Pontuais mostra uma maior sensibilidade no cálculo da probabilidade de ruptura, para distâncias de autocorrelação menores a 10m, o qual também foi observado no Capítulo 6.

7.8. Análises Probabilísticas para Diferentes Alturas do Aterro

Serão apresentados os valores de Pr obtidos para diferentes alturas do aterro utilizando o método de Segundo Momento, de forma a se obter uma relação entre a altura do aterro, fator de segurança e probabilidade de ruptura.

Na análise são consideradas alturas de 3,2m, 4,0m, 4,2m e 4,7m. Inicialmente são obtidas probabilidades de ruptura sem redução da variância da variabilidade espacial. A seguir, são calculados os valores considerando a redução, considerando distâncias de autocorrelação de 5m, 10m e 15m.

As Figuras 7.11 e 7.12 mostram os resultados obtidos. Pode-se observar a grande diferença de probabilidade de ruptura quando a elevação passa de 4,7 a 5,4m, e um menor incremento da probabilidade quando a altura do aterro passa de 3,2m a 4,0m.

Neste tipo de obras são considerados adequados fatores de segurança determinístico entre 1,3 e 1,4 ao final da construção. A altura do aterro de 4,0m satisfaz este requerimento ($FS = 1,38$). Sua probabilidade de ruptura com uma distância de autocorrelação de 10m, assumindo uma distribuição Normal do fator de segurança é de 3,17% (Figura 7.11), e assumindo uma distribuição Log-Normal de 1,73% (Figura 7.12).

El-Ramly 2001 reportou uma probabilidade de ruptura de 1,29%, numa distância de autocorrelação de 10m, ligeiramente superior ao encontrado pelo método de Segundo Momento assumindo uma distribuição Log-normal do fator de segurança. Para distâncias de autocorrelação de 5m e 15m, ele reportou probabilidades de ruptura de 1,06% e 1,67%, respectivamente.

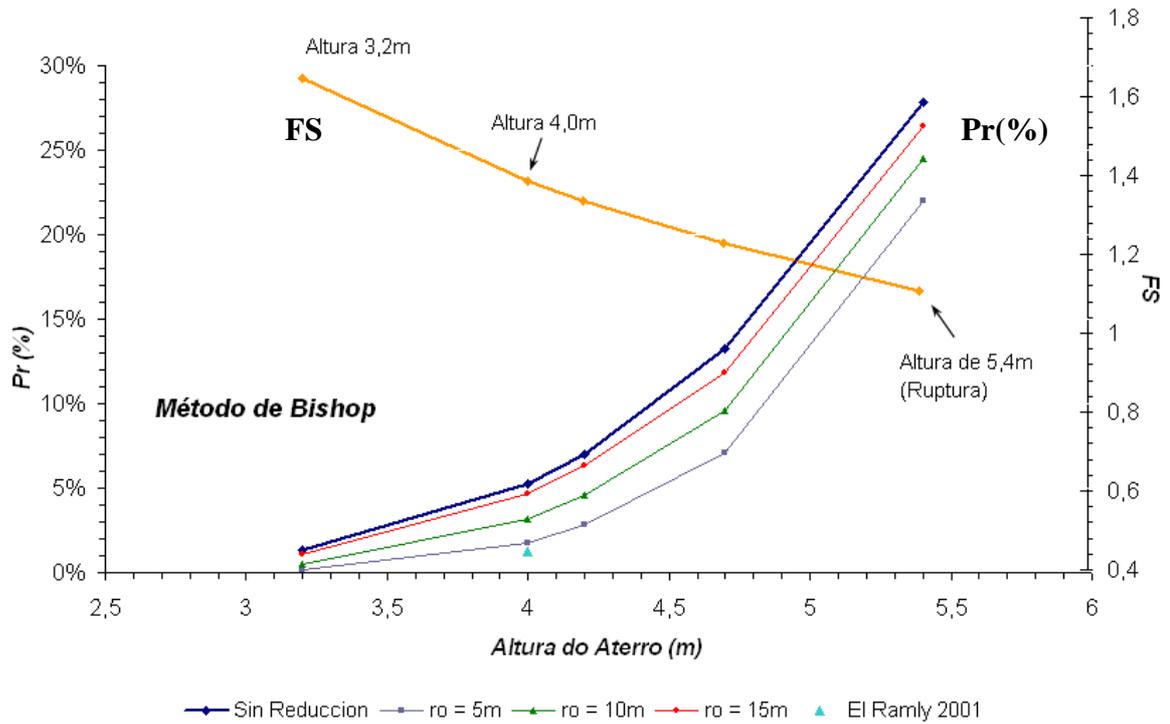


Figura 7.11 – Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes alturas do aterro, distribuição normal do FS.

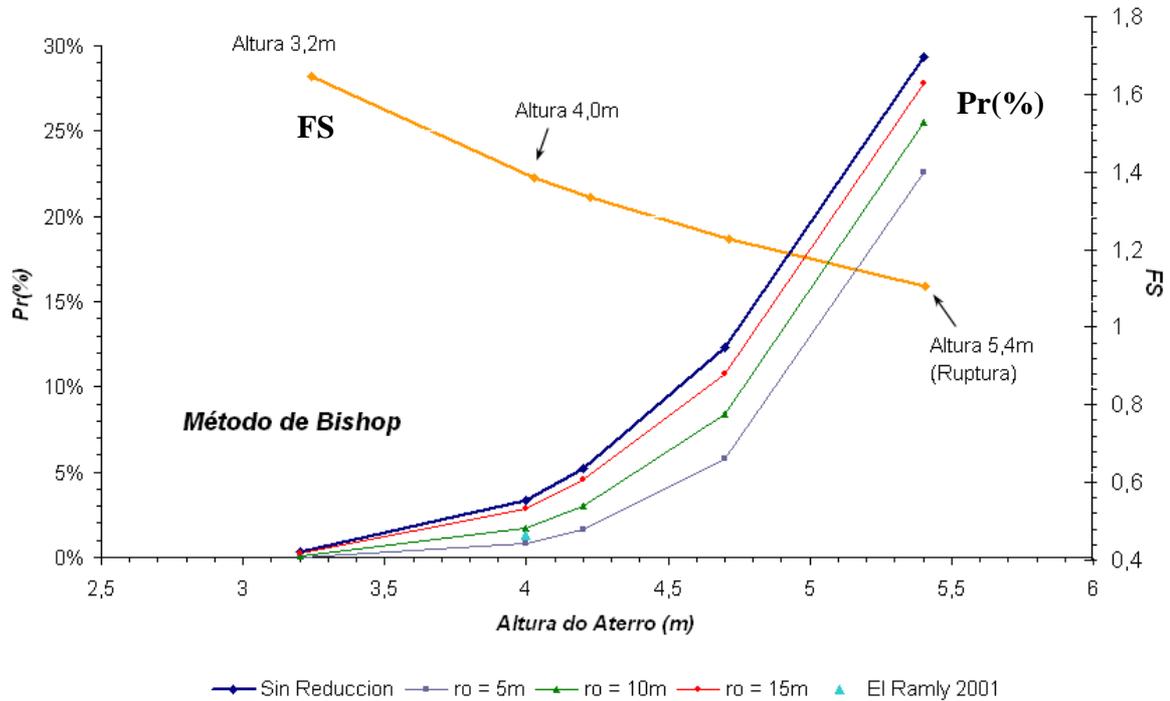


Figura 7.12 - Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes alturas do aterro, distribuição log-normal do FS.

Devido as diferenças de probabilidade de ruptura encontradas no aterro com altura de 4,0m, nas distintas distâncias de autocorrelação propostas, foram também calculadas as probabilidades de ruptura pelo método de Estimativas Pontuais. Assumindo também distribuição Normal e Log-Normal do fator de segurança.

A Figura 7.13 mostra os resultados obtidos. Pode-se apreciar que o método de Segundo Momento com distribuição Log-Normal do fator de segurança, junto com o método de Estimativas Pontuais com distribuição Normal, mostram probabilidades de ruptura comparáveis aos reportados por El-Ramly, numa distância de autocorrelação de 10m.

Neste caso, para distâncias de autocorrelação menores a 10m o método de Estimativas Pontuais mostra-se inadequado para o calculo da probabilidade de ruptura.

O método de Segundo Momento com distribuição Log-Normal do fator de segurança foi quem se mostrou mais conveniente neste caso para o cálculo da probabilidade de ruptura.

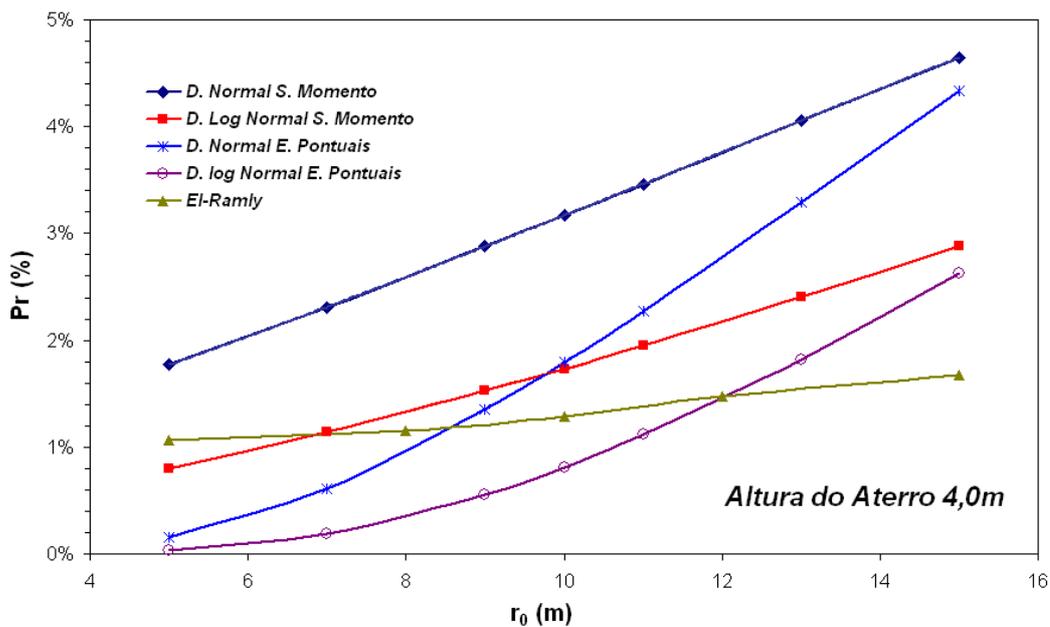


Figura 7.13 – Variação da probabilidade de ruptura para diferentes distâncias de autocorrelação numa altura do aterro de 4.0m.

7.9. Conclusões

O método de Segundo Momento foi o que se mostrou mais aceitável nos intervalos de distâncias de autocorrelação propostos. O método de Estimativas Pontuais mostra uma grande diferença nas probabilidades de ruptura obtidas para distâncias de autocorrelação menores que 10m. Isto pode ser devido ao fator de correção ser aplicado a toda a variância do FS (variabilidade espacial, erro estatístico).

No caso do aterro com altura de 4m, pode ser observado que existe uma maior sensibilidade sobre qual distância de autocorrelação deve-se usar. Em especial quando é assumida uma função Normal do FS (Figura 7.13), onde probabilidades de rupturas elevadas são obtidas, mas a favor da segurança. A função Normal seria recomendada, mas neste caso existe uma forte superestimativa da probabilidade de ruptura com respeito á assunção de uma distribuição de probabilidade Log – Normal e ao publicado por El-Ramly. Em geral e recomendável trabalhar com um intervalo de distâncias de autocorrelação, e conseqüentemente com um intervalo de probabilidades de ruptura. Deve-se também fazer os cálculos considerando distintas distribuições de probabilidade do FS (Normal ou Log – Normal), o que permitiria uma melhor quantificação dos intervalos de probabilidade de ruptura existentes.

As Figuras 7.11 e 7.12 mostram o efeito da redução da variância da variabilidade espacial. Numa altura do aterro de 4m, nenhuma redução implicaria em probabilidades de ruptura não aceitáveis. Assumindo uma redução com uma distância de autocorrelação de 10m a menos, obtém-se um talude seguro. É preciso, por tanto assumir algum tipo de redução na variância da variabilidade espacial dos dados, pois as propriedades dos solos não têm correlação infinita.