

6

DESLIZAMENTO EM LODALEN, NORUEGA (1954)

Neste Capítulo serão apresentadas as análises probabilísticas realizadas pelos métodos de Segundo Momento e das Estimativas Pontuais, para um deslizamento de talude ocorrido em Lodalén, Noruega, em 1954.

São apresentadas as análises de probabilidade de ruptura contemplando a geometria original e várias situações com diferentes inclinações do talude, estabelecendo relações entre a inclinação do talude, fator de segurança e probabilidade de ruptura. Isto permite avaliar a melhor inclinação para evitar a ruptura, desde os pontos de vista probabilístico e determinístico. Este exemplo demonstra a eficiência de métodos probabilísticos como complemento das análises determinísticas.

Este talude já foi analisado por El-Ramly (2001) e El-Ramly et al (2006), com a metodologia descrita no Capítulo 4 (item 4.3.3.4). Como esta metodologia é de difícil aplicação prática, os métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais foram também utilizados juntamente com o fator de correção por médias espaciais (equação 3.27). Os resultados são comparados aos obtidos por El-Ramly, mostrando a eficiência das técnicas usuais com o uso do fator de correção.

6.1. Introdução

A ruptura do talude de argila ocorreu perto da estação de trem em Oslo (Noruega), cujo talude inicialmente foi escavado 30 anos antes de iniciadas as obras de expansão da estação. O talude foi escavado incrementado sua inclinação, de forma que no instante da ruptura, o talude tinha uma altura de 17m, e uma inclinação de 26° (2h:1v). A Figura 6.1 mostra uma seção transversal típica.

O talude foi investigado pelo NGI (Instituto Geotécnico de Noruega), que instalou uma série de piezômetros, ensaios de laboratório, e investigações de campo. A ruptura do talude foi de forma circular, e envolveu aproximadamente 10.000m^3 de material.

6.2. Estratigrafia e Propriedades do Solo

A seção transversal na Figura 6.1 mostra a estratigrafia do terreno, com dois materiais: uma argila de aproximadamente 1m de espessura sobre uma argila marinha. A inclinação do talude foi de 2h:1v antes da ruptura. O NGI realizou 7 perfurações para a coleta de mostras e instalação posterior de 4 piezômetros, os quais mediram a carga de pressão em diferentes profundidades.

As investigações de campo indicaram pequenas camadas de silte intercaladas entre a argila marinha, mas esta foi considerada como um material homogêneo, com teor de umidade de 30%, $LL = 35\%$, e $LP = 20\%$. A sensibilidade da argila varia entre de 3 e 15.

Nestas duas camadas foram feitos ensaios triaxiais não drenados, com medição da poropressão. Na argila superior, foram realizados dois ensaios onde foram obtidos os parâmetros de resistência efetivos: ângulo de atrito de 32° e coesão de 11,8 kPa. A Figura 6.1 mostra a superfície de deslizamento determinística. Observa-se que esta camada não atravessa esta superfície pelo que seus parâmetros de resistência não são considerados como variáveis aleatórias.

Na camada de argila marinha foram realizados dez ensaios. Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 6.1. O ângulo de atrito efetivo foi de $27,1^\circ$, com um desvio padrão de $1,72^\circ$ (devido à variabilidade espacial), e de $0,54^\circ$ (devido ao erro estatístico). A coesão efetiva foi de 10,0 kPa, com um desvio padrão de 2,22kPa (variabilidade espacial) e de 0,70 (erro estatístico). Todos estes cálculos foram feitos com os procedimentos descritos no Capítulo 3.

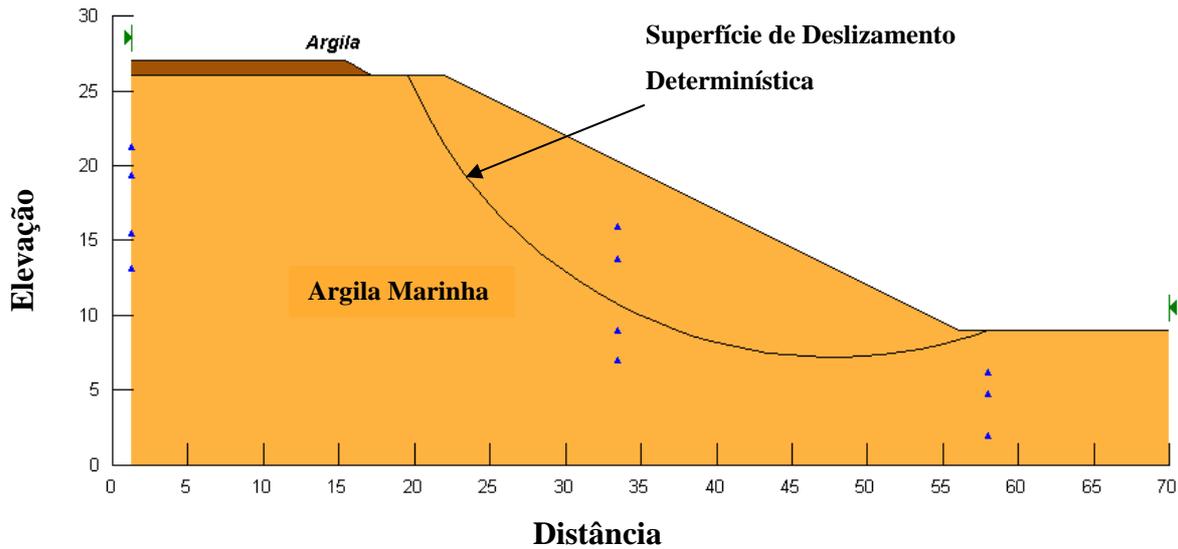


Figura 6.1 – Seção transversal do talude em estudo.

Tabela 6.1 – Parâmetros de resistência, argila aarinha.

Ensaio	Coesão c' (Kpa)	Ângulo de Atrito ϕ' (graus)
1	9,8	27,5
2	7,8	24,9
3	9,8	28,1
4	9,8	27,7
5	7,8	26,6
6	12,8	24,0
7	9,8	26,3
8	6,9	29,4
9	11,8	27,2
10	13,7	29,2

É comumente atribuída uma correlação negativa entre os parâmetros de resistência (c , ϕ). Como foi exposto no Capítulo 3, o uso desta correlação pode alterar o valor da probabilidade de ruptura. Da Tabela 6.1, pode-se fazer o cálculo de coeficiente de correlação (ρ) entre estes os parâmetros de resistência, conforme indica a Figura 6.2.

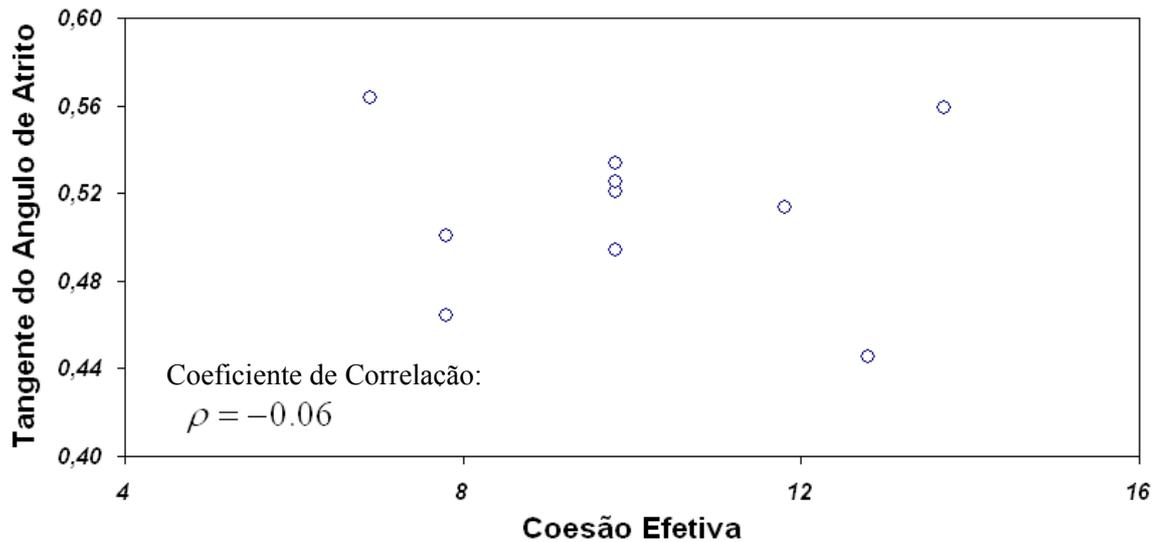


Figura 6.2 – Correlação entre ângulo de atrito e a coesão da argila marinha de Oslo.

Como pode ser observado, quase não existe correlação entre estes dois parâmetros. Portanto, nas análises preliminares, não é considerada nenhuma correlação. Posteriormente, será feita uma análise de sensibilidade com respeito à adoção de um coeficiente de correlação.

6.3. Poropressões

Os quatro piezômetros instalados estão mostrados na Figura 6.3. Os dados do piezômetro D foram excluídos da análise devido a que se encontraram dados mais elevados aos reportados pelos outros, e foi atribuído a que se encontrava na zona de deslizamento e seus valores poderiam ser afetados. Cada piezômetro mediu cargas piezométricas distintas com a profundidade, como mostrado na Figura 6.3.

Dos dados obtidos, foi inferida uma linha freática e traçado o gráfico de carga de pressão *versus* profundidade abaixo da linha freática. Este gráfico foi realizado de duas maneiras distintas: (a) com os dados de todos os piezômetros (Fig. 6.4); (b) com os dados de cada piezômetro individualmente (Figuras 6.5 a 6.7). Nestas figuras estão também indicadas as respectivas linhas de tendência, segundo os conceitos propostos no Capítulo 3.

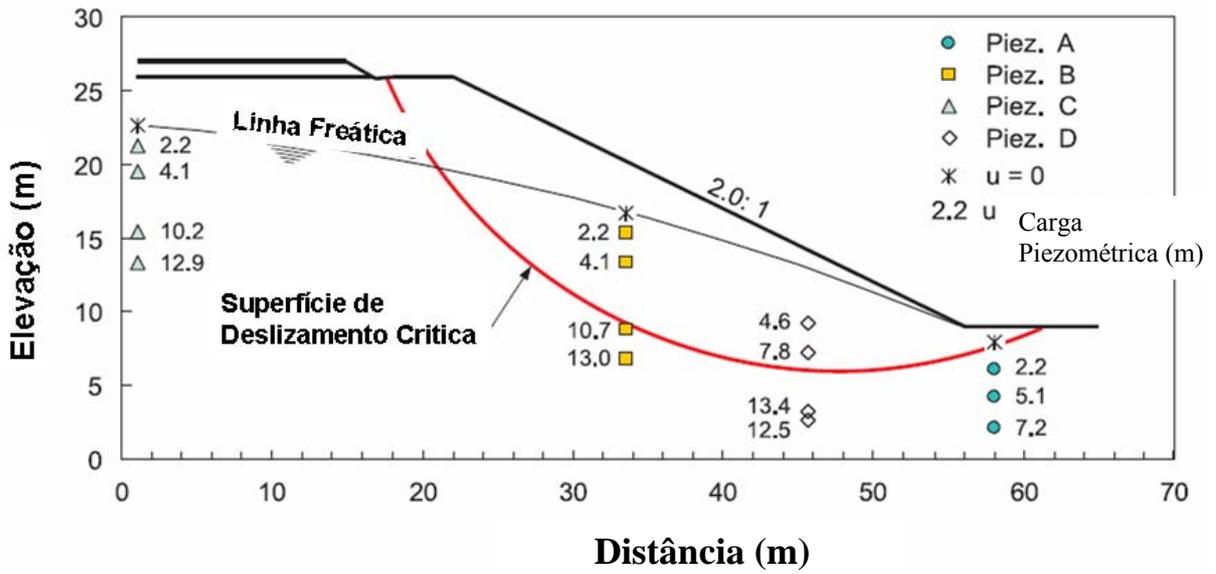


Figura 6.3 – Posição dos piezômetros e da linha freática no talude.

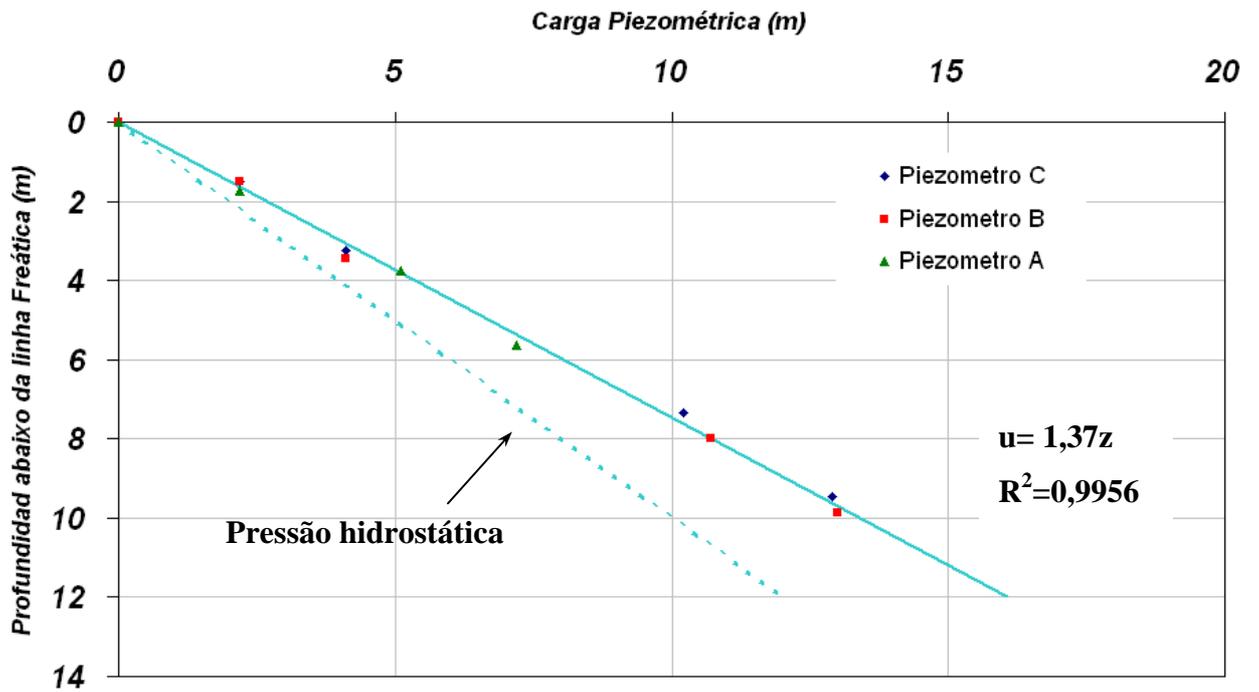


Figura 6.4 – Distribuição das cargas de pressão, considerando todos os piezômetros.

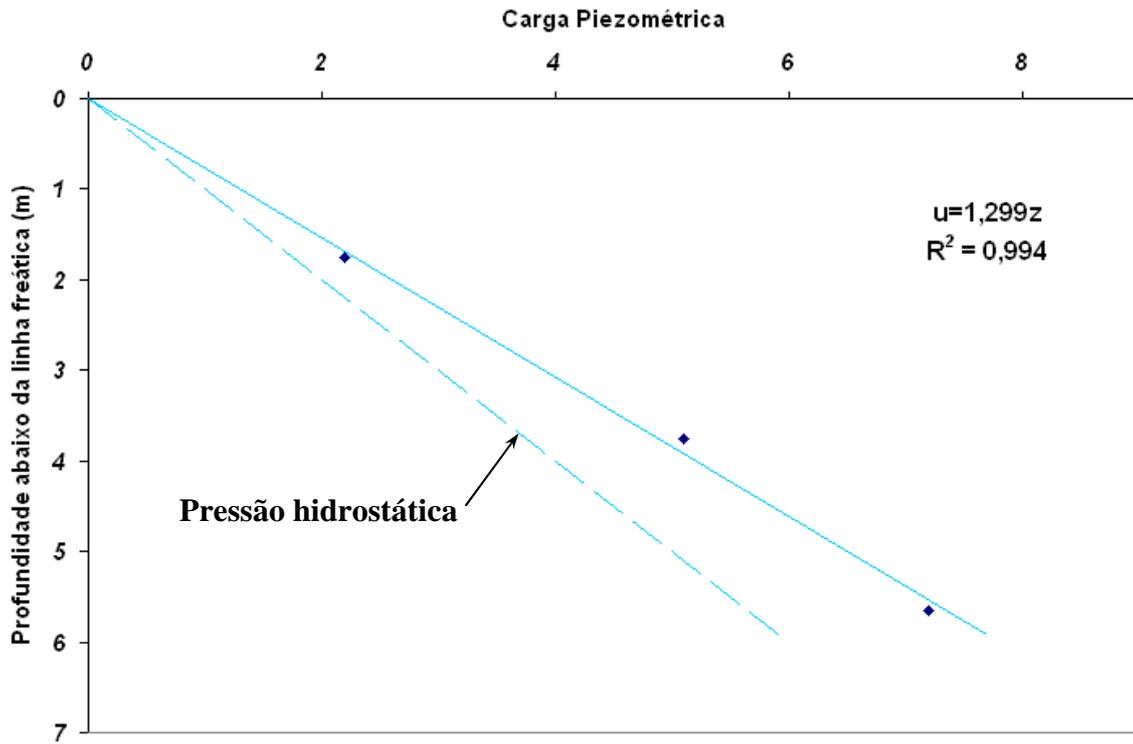


Figura 6.5 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro A.

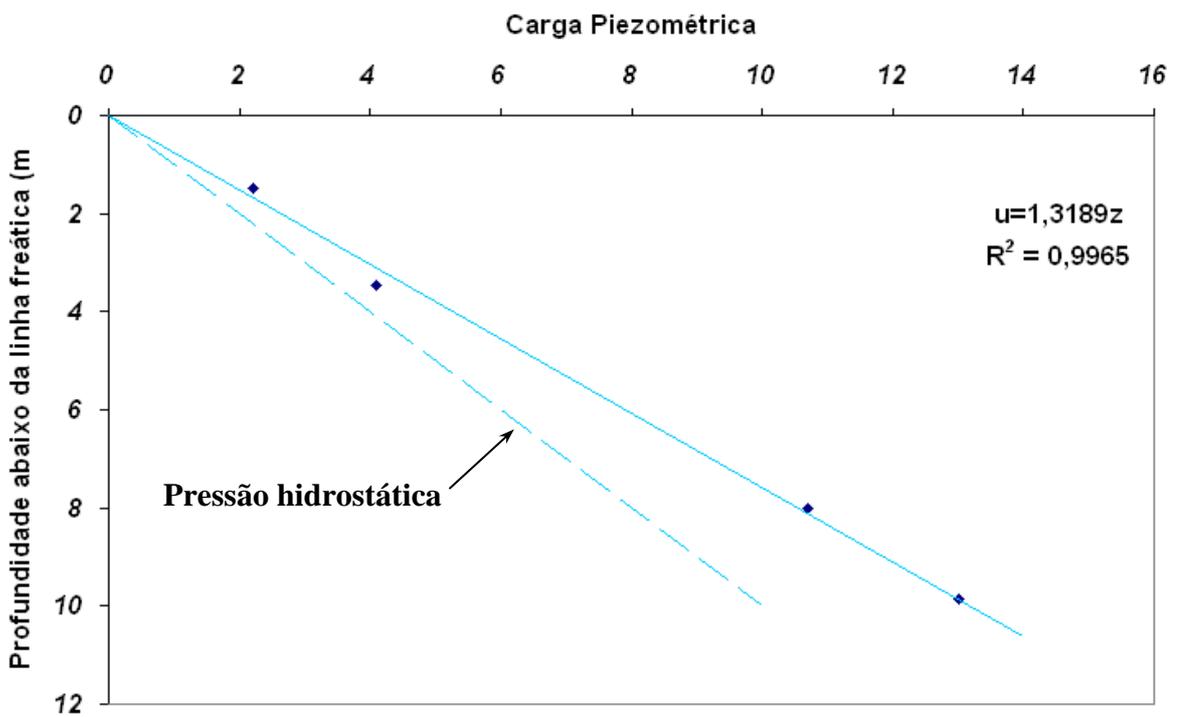


Figura 6.6 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro B.

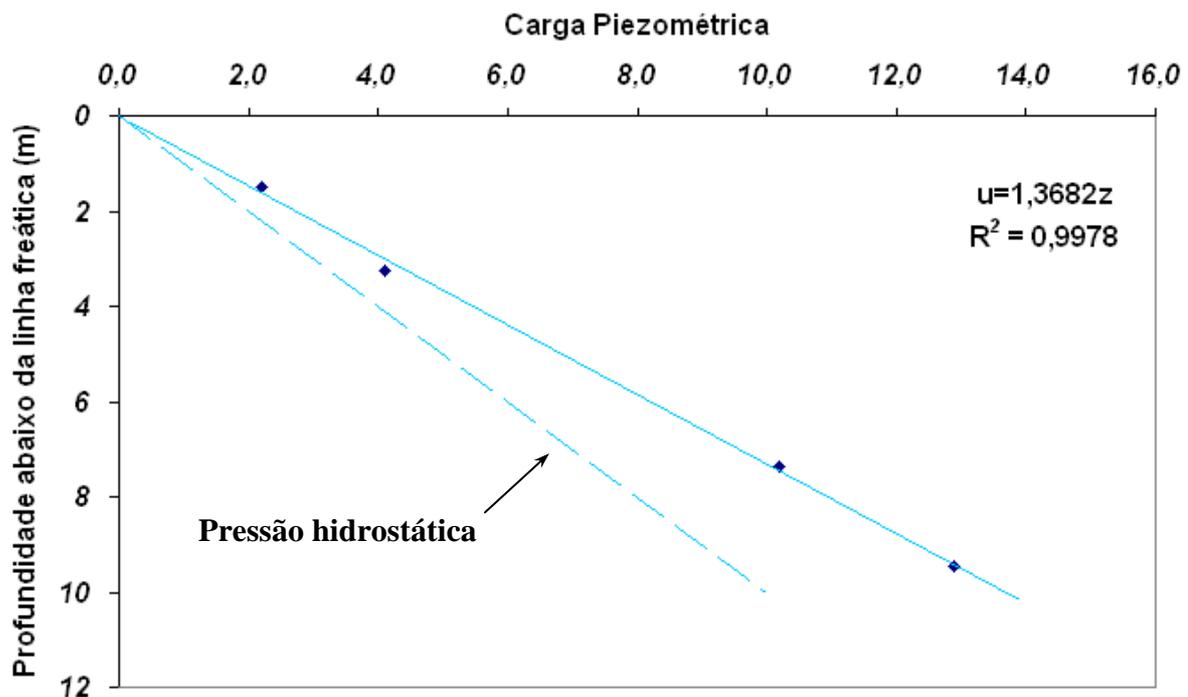


Figura 6.7 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro C.

Das Figuras 6.4 a 6.7 pode-se observar que todos os piezômetros reportam condições de poropressão acima da condição hidrostática.

As linhas de tendência em geral mostram resultados com pequena dispersão ao redor da tendência (variabilidade espacial inerente). Isto é corroborado pelos valores de R^2 que são muito próximos a 1,0.

Estas pequenas dispersões, na realidade, são pouco usuais ou pouco prováveis. A Tabela 6.2 mostra os diferentes valores de desvio padrão e as médias obtidas das linhas de tendência, segundo os critérios propostos no Capítulo 3.

Tabela 6.2 – Valores de carga piezométrica no talude.

Piezômetro	Valor Médio	Desvio Padrão	
		V. Espacial	Erro Estatístico
A, B, C	1,337z	0,2980	0,0153
A	1,299z	0,2779	0,0397
B	1,319z	0,3703	0,0279
C	1,368z	0,2859	0,0229

Inicialmente as análises probabilísticas são feitas considerando só 3 variáveis aleatórias: as propriedades de resistência (c' , ϕ') da argila marinha e as cargas de pressão de todos os dados piezométricos (Figura 6.4). Em seguida, são consideradas 5 variáveis aleatórias, as propriedades de resistência e as cargas de pressão individuais de cada piezômetro (Figuras 6.5 a 6.7).

As análises com 5 variáveis permitem visualizar qual piezômetro influencia mais a probabilidade de ruptura (no método do Segundo Momento). A análise com 3 variáveis, entretanto, não permite esta visualização, mostrando unicamente a contribuição conjunta de todas as cargas piezométricas.

Por inspeção da superfície de ruptura (Figura 6.3), pode-se observar que os dados do piezômetro B são os que devem influenciar mais a análise.

6.4. Análises Determinísticas de Estabilidade de Taludes

Com os valores médios dos dados descritos nos itens 6.2 e 6.3 foram calculados os fatores de segurança determinísticos usando o software Slope/W, utilizando os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price. Os resultados se encontram resumidos na Tabela 6.3. As superfícies críticas de ruptura são mostradas na Figura 6.8.

Tabela 6.3 – Fatores de segurança determinísticos.

Método de Análise	Fator de Segurança	Superfície de Ruptura
Bishop	0,956	Linha Tracejada
Spencer	0,969	Linha Continua
M. - Price	0,968	Linha Tracejada

As poropressões médias foram calculadas das linhas de tendência obtidas nas Figuras 6.5 a 6.7, para as diferentes profundidades.

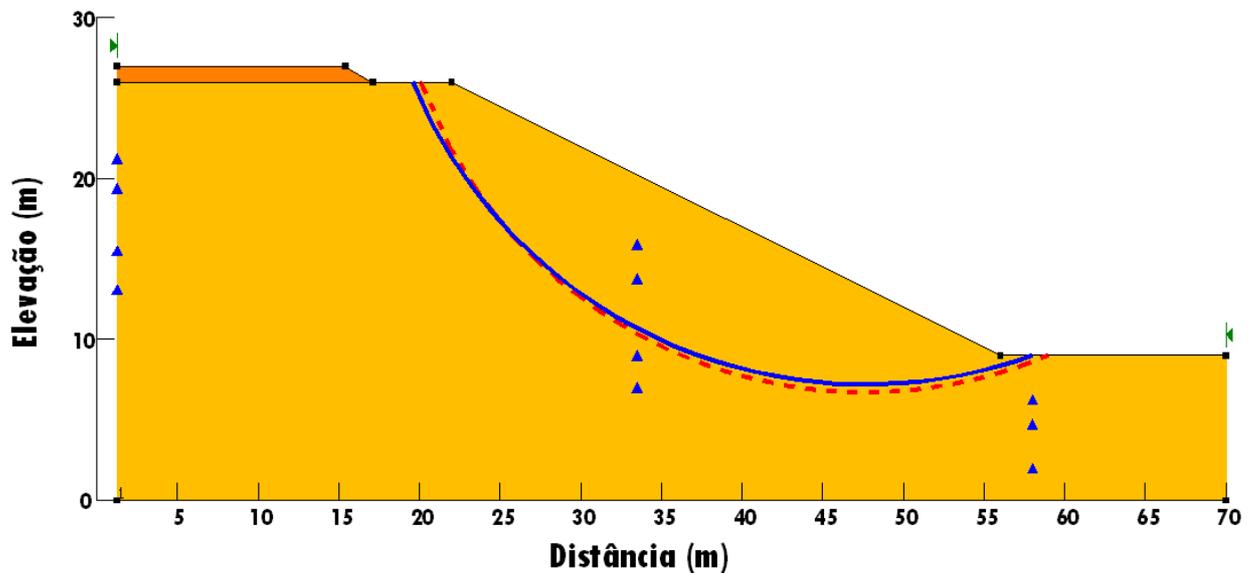


Figura 6.8 – Superfícies de deslizamento determinísticas.

6.5. Análises Probabilísticas da Estabilidade

Com as superfícies determinísticas, foram realizadas as análises probabilísticas. Inicialmente desprezou-se a redução da variância da variabilidade espacial inerente (assumindo-se autocorrelação perfeita). Posteriormente, considerou-se a redução, como exposto no Capítulo 5, para os diferentes métodos (Segundo Momento e Estimativas Pontuais).

6.5.1. Análises Probabilísticas Assumindo Perfeita correlação das variáveis aleatórias

A análise pelo método de Segundo Momento foi feita considerando quatro metodologias distintas para as derivadas parciais por diferenças finitas centrais: total do desvio padrão, 50% do desvio padrão, 10% do desvio padrão e 5% do desvio padrão.

Foram consideradas porcentagens dos desvios padrões e não dos valores dos parâmetros, porque a tendência das cargas de poropressões está em função da profundidade.

Pelo exposto, e segundo os conceitos mostrados no Capítulo 3, as equações que descrevem a tendência das cargas de poropressões segundo as diferentes combinações estão listadas na Tabela 6.4.

A Figura 6.9 mostra as diferentes combinações no piezômetro A, utilizados nas análises probabilísticas. Estas combinações estão mostradas na Tabela 6.4. Resultados semelhantes foram encontrados para os demais piezômetros.

Tabela 6.4 – Combinações da tendência das cargas piezométricas.

Piez.	Desvio Padrão	50% do Desvio Padrão
A,B,C	$\mu = (1,337 \pm 0,0153)z \pm 0,2980$	$\mu = (1,337 \pm 0,0077)z \pm 0,149$
A	$\mu = (1,299 \pm 0,0397)z \pm 0,2779$	$\mu = (1,299 \pm 0,0199)z \pm 0,139$
B	$\mu = (1,319 \pm 0,0279)z \pm 0,3703$	$\mu = (1,319 \pm 0,0140)z \pm 0,185$
C	$\mu = (1,368 \pm 0,0229)z \pm 0,2859$	$\mu = (1,368 \pm 0,0115)z \pm 0,143$
Piez.	10% do Desvio Padrão	5% do Desvio Padrão
A,B,C	$\mu = (1,337 \pm 0,00153)z \pm 0,02980$	$\mu = (1,337 \pm 0,00077)z \pm 0,0149$
A	$\mu = (1,299 \pm 0,00397)z \pm 0,02779$	$\mu = (1,299 \pm 0,00199)z \pm 0,0139$
B	$\mu = (1,319 \pm 0,00279)z \pm 0,03703$	$\mu = (1,319 \pm 0,00139)z \pm 0,0185$
C	$\mu = (1,368 \pm 0,00229)z \pm 0,02859$	$\mu = (1,368 \pm 0,00115)z \pm 0,0143$

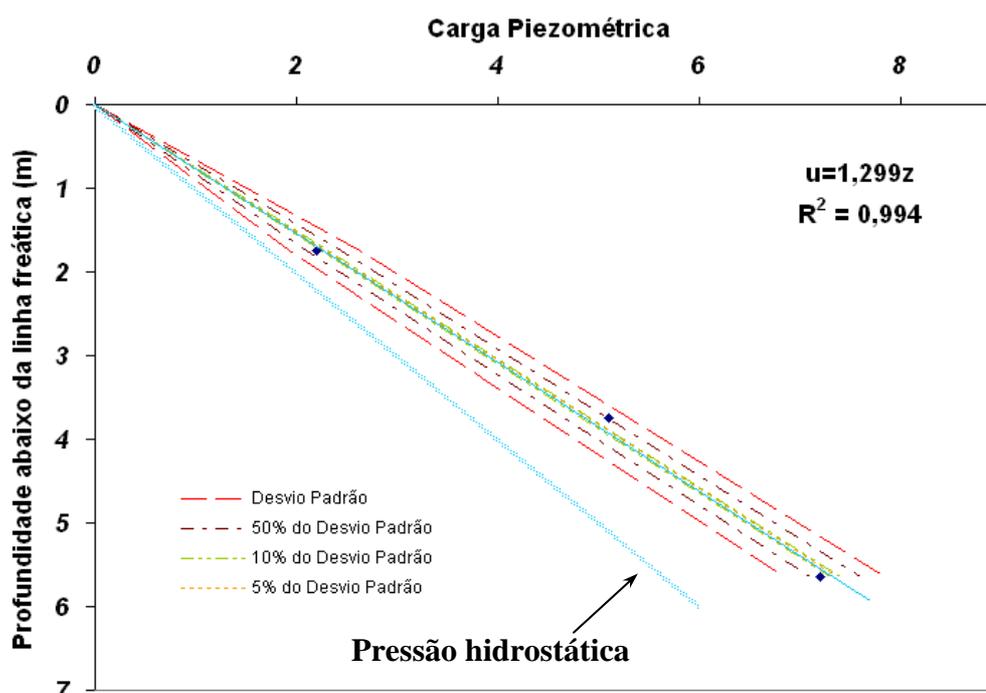


Figura 6.9 – Distribuições de carga piezométrica com a profundidade – piezômetro A.

As Tabelas 6.5 e 6.6 mostram os resultados das análises probabilísticas considerando 5 variáveis aleatórias. Em resumo, a probabilidade de ruptura, com distribuição Normal ou Log-normal do fator de segurança, deu valores muito próximos para os métodos de análise (Bishop, Spencer ou Morgenstern-Price). Isto foi devido aos valores baixos do índice de confiabilidade (β), conforme descrito no Capítulo 4.

Tabela 6.5 – Análises probabilísticas com 5 variáveis aleatórias, distribuição normal.

Método de Análises	Probabilidade de Ruptura				
	Segundo Momento				Estimativas Pontuais
	Desvio P.	50% do D. Padrão	10% do D. Padrão	5% do D. Padrão	
Bishop	67,57%	67,50%	67,51%	66,99%	67,29%
Spencer	62,65%	62,75%	62,90%	62,87%	62,63%
M. Price	63,08%	63,05%	63,30%	63,27%	62,94%

Tabela 6.6 - Análises probabilísticas com 5 variáveis aleatórias, distribuição log-normal.

Método de Análises	Probabilidade de Ruptura				
	Segundo Momento				Estimativas Pontuais
	Desvio P.	50% do D. Padrão	10% do D. Padrão	5% do D. Padrão	
Bishop	69,04%	68,98%	68,99%	68,55%	68,78%
Spencer	64,35%	64,43%	64,55%	64,53%	64,32%
M. Price	64,76%	64,73%	64,94%	64,91%	64,62%

A probabilidade de ruptura segundo Bishop foi mais elevada ao encontrada nos métodos de Spencer e Morgenstern-Price, mas a favor da segurança. O Método de Morgenstern-Price considerou uma função senoidal para descrever a variação de forças entre fatias.

No método de Segundo Momento, para diferentes configurações da derivada parcial (σ , $50\%\sigma$, $10\%\sigma$ ou $5\%\sigma$), foram encontradas probabilidades de ruptura muito semelhantes em qualquer dos métodos (Bishop, Spencer ou Morgenstern-Price). Não se observa nenhum efeito do tipo de configuração da derivada parcial.

Os dois métodos de análise probabilística (Segundo Momento e Estimativas Pontuais) mostraram-se muito próximos, devido principalmente aos pequenos coeficientes de variação (COV) dos parâmetros de resistência ($COV(\Phi_{MC}) = 0,07$, $COV(C_{MC}) = 0,23$), e também à pequena dispersão nas cargas de propressão ao redor da tendência fixada.

Devido à probabilidade de ruptura ser muito alta, a ruptura do talude foi iminente. A Figura 6.10 mostra a contribuição na variância do fator de segurança de cada componente no método de Segundo Momento, em análise feita por Bishop, considerando o total do desvio padrão. Resultados similares foram encontrados nas demais análises.

As maiores contribuições são encontradas nos parâmetros de resistência, seguido pelas variações de cargas de pressão do piezômetro B. As variações de cargas de pressão dos piezômetros A e C não têm influência significativa, devido à distância em relação à superfície de deslizamento.

Foram também realizadas análises probabilísticas com 3 variáveis aleatórias (parâmetros de resistência e dados piezométricos), pelo método de Segundo Momento, com variações das derivadas parciais considerando o desvio padrão total. Os resultados estão mostrados na Tabela 6.7.

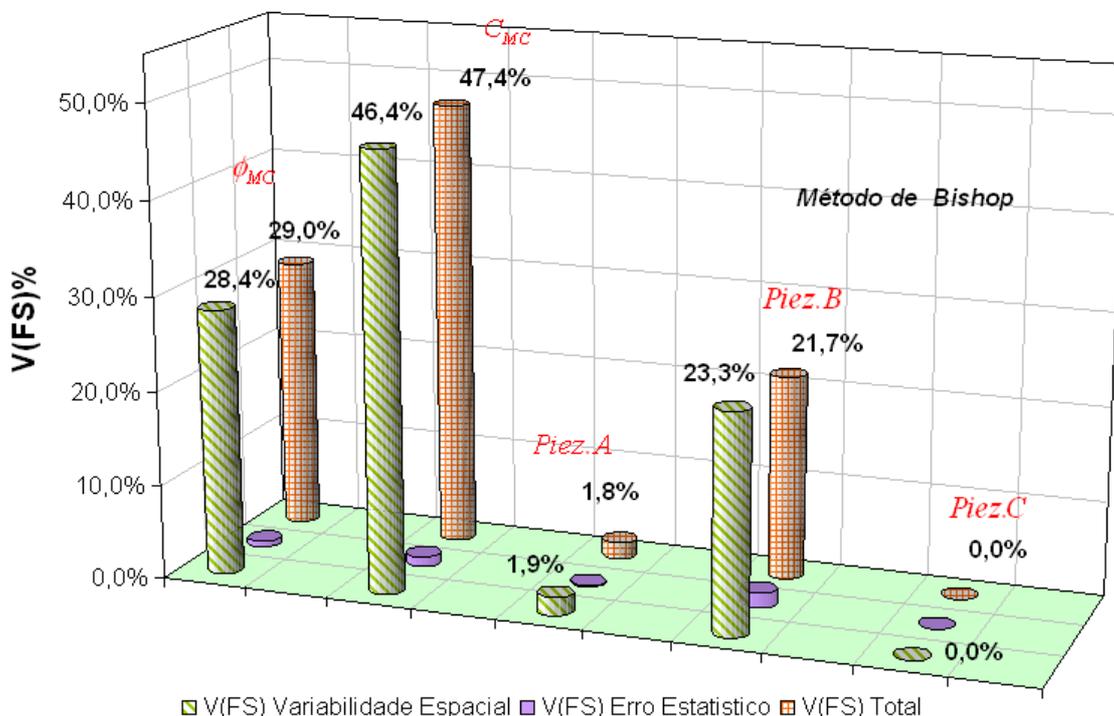


Figura 6.10 – Contribuição na variância do fator de segurança das cinco variáveis, considerando o total do desvio padrão.

Tabela 6.7 - Análises probabilística com 3 variáveis aleatórias.

Probab. de Ruptura (Método de Segundo Momento)		
Método de Análises	Derivadas Parciais com o Desvio Padrão	
	Distribuição Normal	Distribuição Log-Normal
Bishop	68,40%	69,75%
Spencer	63,34%	64,92%
M. Price	63,79%	65,35%

Os resultados das duas modelagens, resumidos nas Tabelas 6.5 a 6.7, mostram diferenças pequenas, o que indica que ambas as modelagens são corretas. A forma de modelar é uma decisão do engenheiro projetista, mas é recomendável considerar as diferentes variáveis aleatórias para identificar qual tem maior contribuição para a estabilidade.

A Figura 6.11 mostra as contribuições na variância do fator de segurança de cada componente na análise com 3 variáveis. Pode-se observar que os resultados são semelhantes aos mostrados na Figura 6.10.

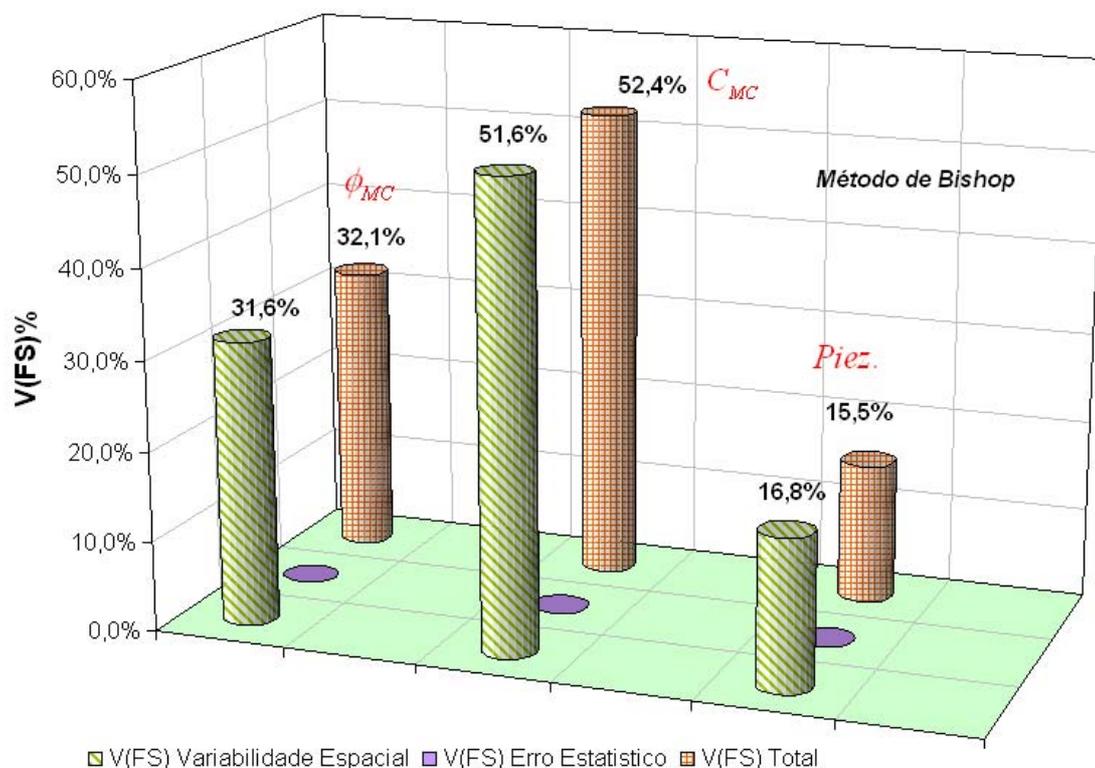


Figura 6.11 – Contribuição na variância do fator de segurança das três variáveis, considerando o total do desvio padrão.

6.5.2. Análises Probabilísticas Considerando a Variabilidade Espacial dos Parâmetros do Solo.

Na análise com 5 variáveis aleatórias foram corrigidas as variâncias da variabilidade espacial produto das médias espaciais de cada variável, como exposto no Capítulo 5, nos dois métodos probabilísticos (Segundo Momento e Estimativas Pontuais).

El-Ramly (2001, 2006) mostra a análise probabilística para este talude, mas considerando a variabilidade espacial pelo método de Monte Carlo, como exposto no Capítulo 4. Ele utilizou os métodos de Bishop e Spencer, os quais serão comparados. Resultados similares são esperados com o método de Morgenstern-Price.

Para utilizar a equação 3.27 (Capítulo 3) é preciso determinar a distância de autocorrelação a ser utilizada. Das pesquisas de campo, conclui-se que esta argila marinha poderia ser considerada homogênea, o que é confirmado pelos pequenos coeficientes de variação encontrados nos parâmetros de resistência ($COV_{\phi} = 0,07$, $COV_c = 0,23$). Ademais, as cargas de pressão apresentam dispersão reduzida ao redor da tendência.

Por todo o exposto, as distâncias de autocorrelação na direção horizontal estão entre 30 até 40m e, na direção vertical, entre 1 e 3m. Observando a superfície de deslizamento na Figura 6.8, pode-se supor que não existe uma estrutura espacial dominante em nenhuma direção.

Utilizando uma distância de autocorrelação equivalente r_{0-e} , (equação 3.31), pode-se chegar num intervalo de 5 até 15m, com valor médio de 10m. Estes mesmos dados foram utilizados por El-Ramly em sua metodologia.

As Tabelas 6.8 e 6.9 resumizam os resultados encontrados. As Figuras 6.12, a 6.17 mostram o impacto das diferentes distâncias de autocorrelação consideradas na análise probabilística.

Tabela 6.8 – Probabilidade de ruptura com o método de Bishop.

Distância de Correlação r_0 (m)	Segundo Momento (Pr)		Estimativas Pontuais (Pr)	
	Distribuição	Distribuição	Distribuição	Distribuição
	Normal	Log-Normal	Normal	Log-Normal
5	80,97%	81,17%	83,55%	83,61%
10	74,72%	75,37%	75,50%	76,07%
15	71,1%	72,16%	71,35%	72,31%

Tabela 6.9 - Probabilidade de ruptura com o método de Spencer.

Distância de Correlação r_0 (m)	Segundo momento (Pr)		Estimativas Pontuais (Pr)	
	Distribuição	Distribuição	Distribuição	Distribuição
	Normal	Log-Normal	Normal	Log-Normal
5	73.3%	73.85%	75.86%	76.23%
10	68.17%	69.4%	69.01%	69.88%
15	65.4%	66.67%	65.73%	66.95%

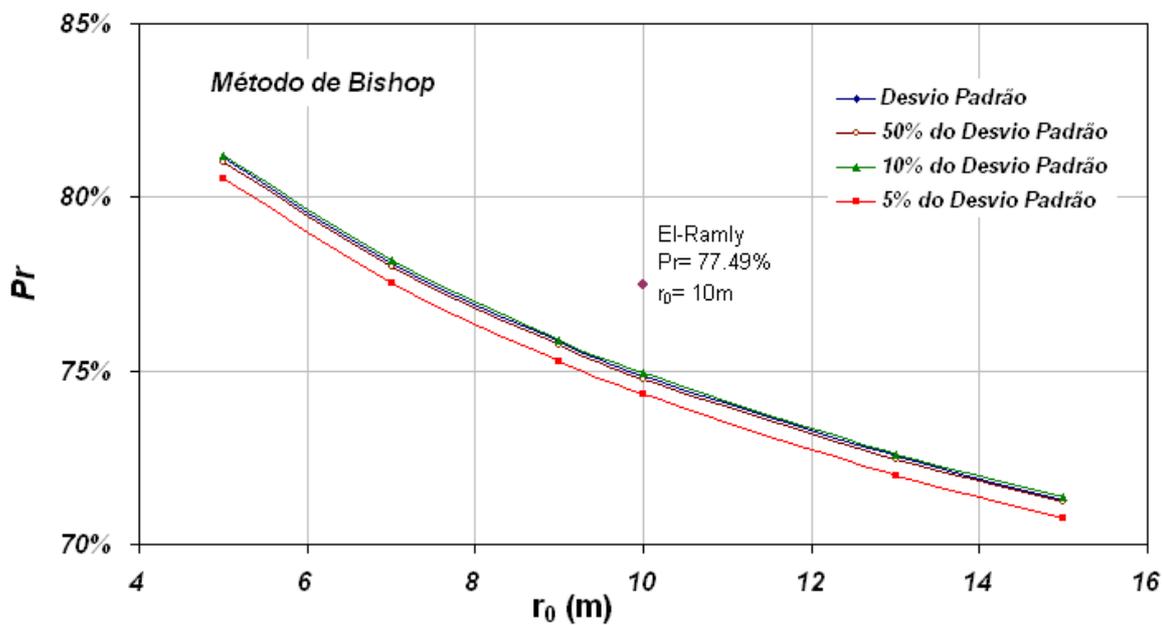


Figura 6.12 – Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento com distribuição normal do FS.

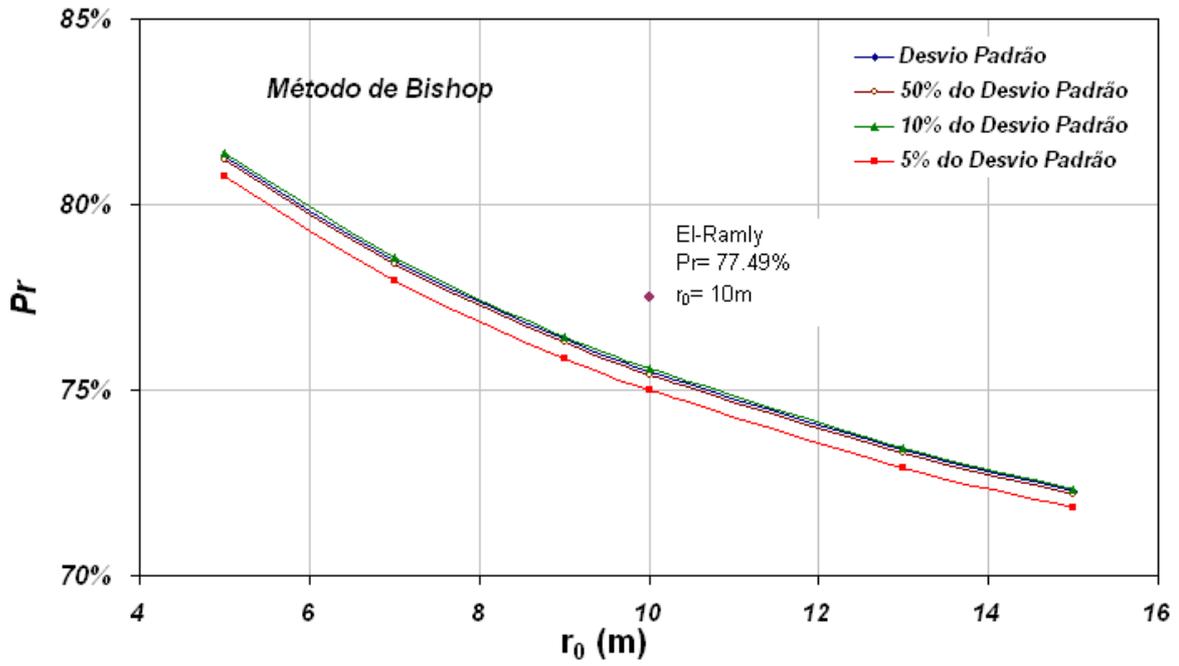


Figura 6.13 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição log-normal do FS.

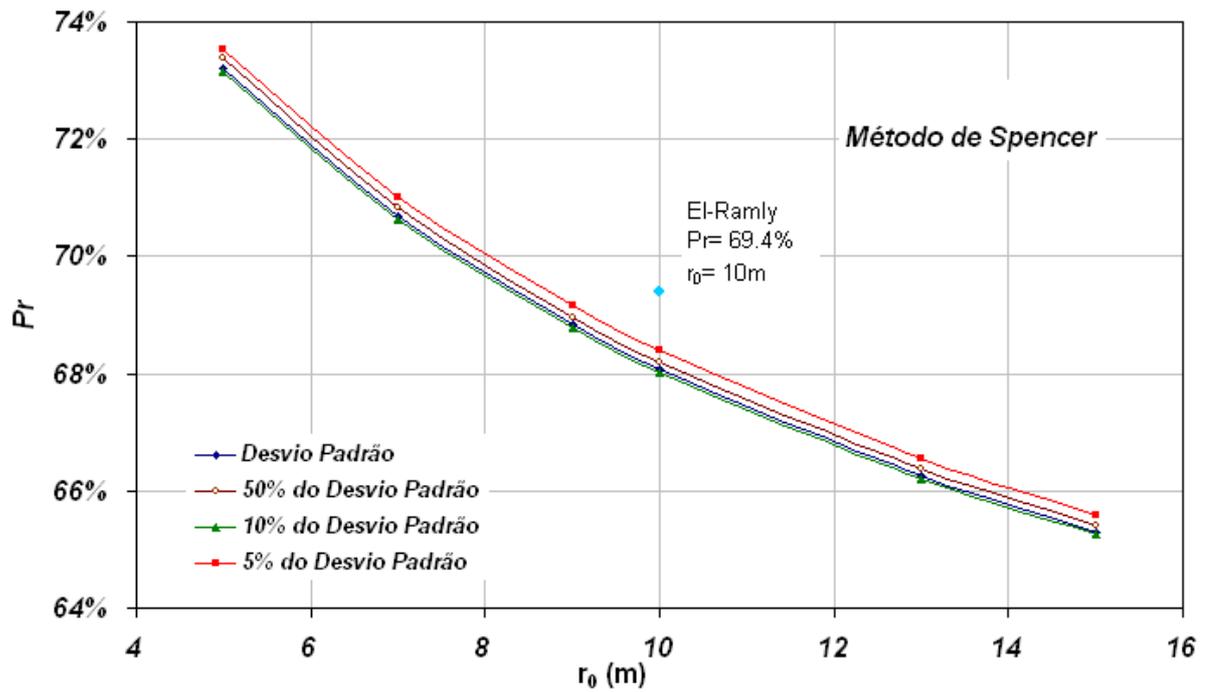


Figura 6.14 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição normal do FS.

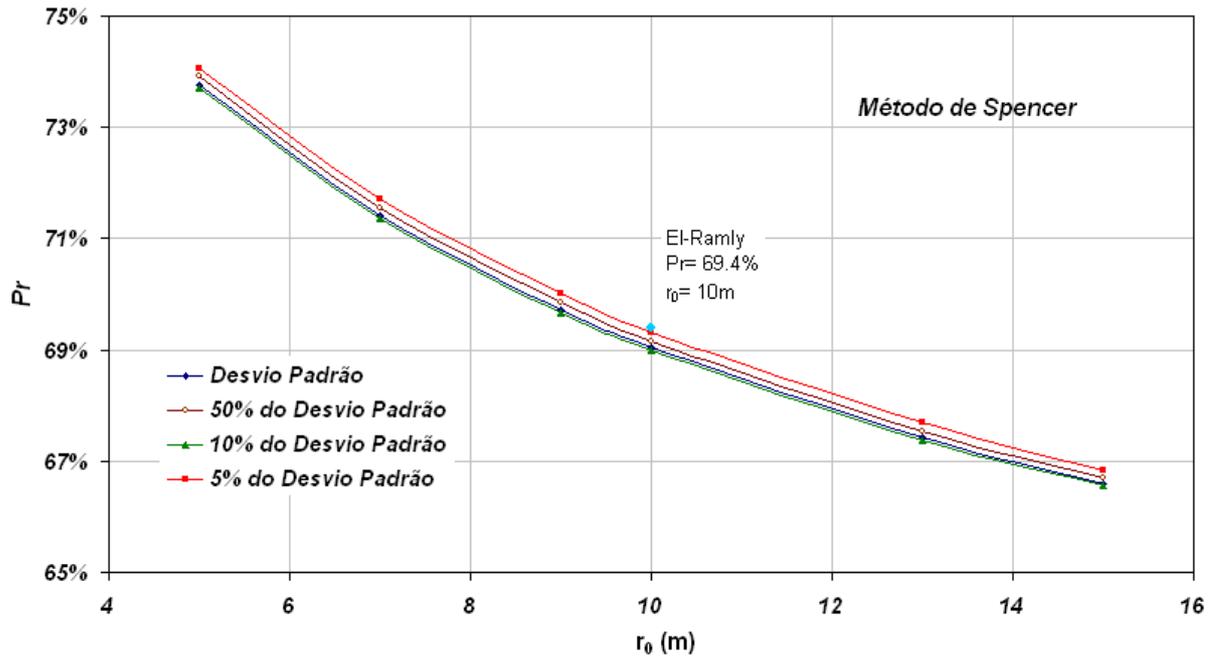


Figura 6.15 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição log-normal do FS.

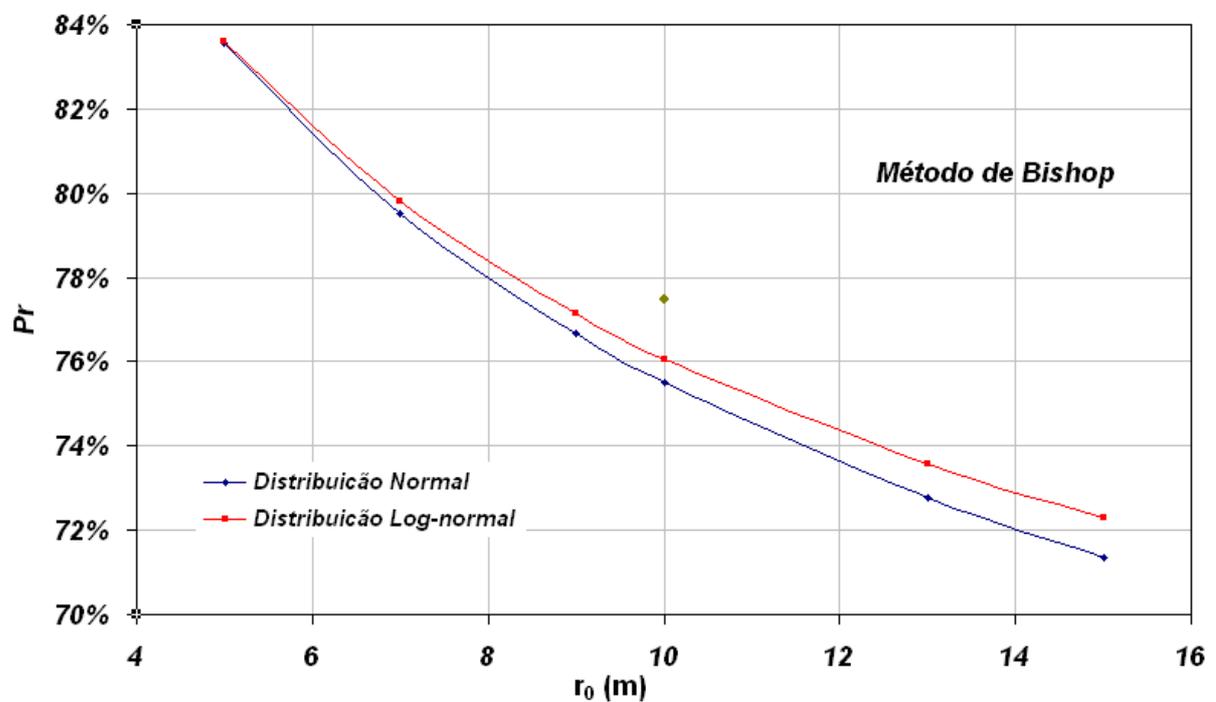


Figura 6.16 - Probabilidade de ruptura obtida no método de estimativas pontuais, com distribuição normal e log-normal do FS.

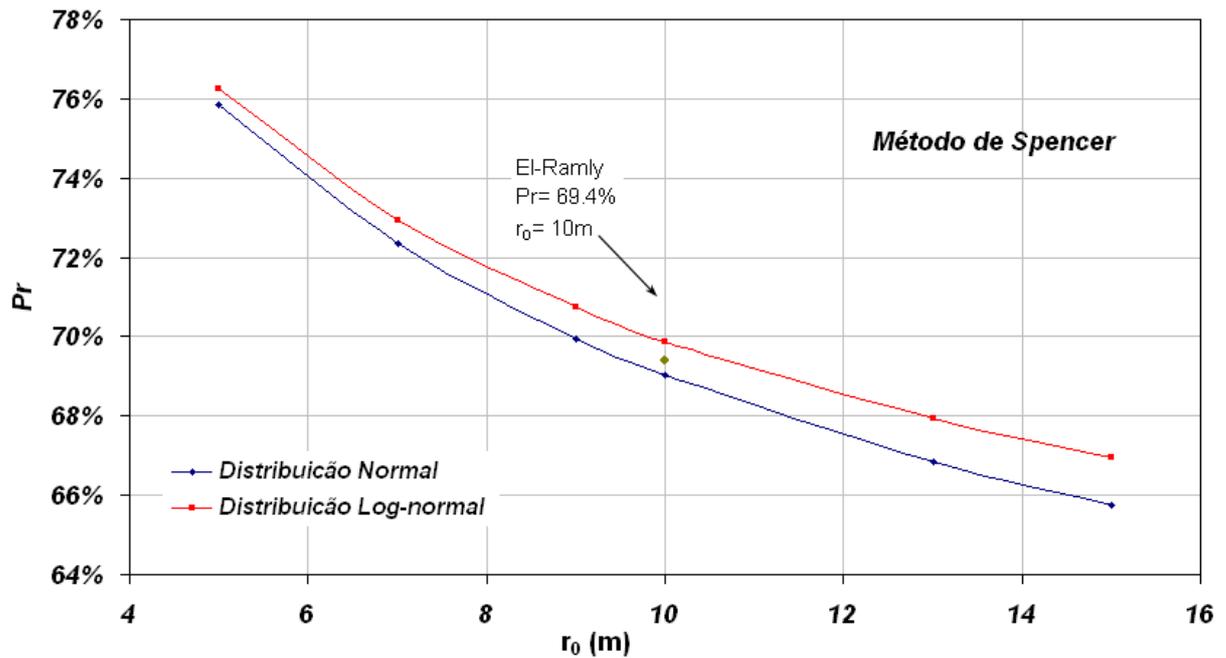


Figura 6.17 - Probabilidade de ruptura obtida no método de estimativas pontuais, com distribuição normal e log-normal do FS.

A probabilidade de ruptura calculada pelo método de Segundo Momento segundo Bishop deu em geral resultados comparáveis aos calculados por El-Ramly (2001), para uma distância de autocorrelação de 10m. O efeito da distância de autocorrelação causou uma variação grande da probabilidade de ruptura, mas em qualquer caso a ruptura do talude era iminente.

A probabilidade de ruptura calculada pelo método de Segundo Momento segundo Spencer deu resultados muito próximos que os calculados por El-Ramly (2006) melhor as de Bishop, para uma distância de autocorrelação de 10m. O efeito distância de autocorrelação acarretou uma variação da probabilidade de ruptura menor que a de Bishop.

Outro aspecto importante a ser mencionado no método do Segundo Momento, é que a hipótese sobre as diferentes amplitudes no cálculo das derivadas parciais tem pouco efeito nas probabilidades de ruptura encontradas.

No método de Estimativas Pontuais, segundo Bishop ou Spencer, as conclusões encontradas foram iguais às do método de Segundo Momento.

As probabilidades de ruptura por qualquer método probabilístico, com distribuição Normal ou Log-normal do fator de segurança, deram diferenças desprezíveis, devido aos pequenos valores de índice de confiabilidade encontrados (β) e às pequenas incertezas encontradas nos parâmetros considerados como variáveis aleatórias.

As Tabelas 6.10 e 6.11 mostram o efeito da não correção da variância da variabilidade espacial. Analisando as probabilidades de ruptura obtidas com os métodos de Bishop ou Spencer, pode-se observar que a não redução da variância da variabilidade espacial ocasiona probabilidades de ruptura obtidas subestimadas, ou seja, contra a segurança.

Tabela 6.10 - Efeito da correção da variância da variabilidade espacial.

Método de Bishop	Probabilidade de Ruptura (sem redução na variância)	Probabilidade de Ruptura (com redução na variância)
Distrib. Normal	67,42%	82,26 – 71,23%
Distrib. Log-normal	68,91%	82,39 – 72,24%

Tabela 6.11 - Efeito da correção da variância da variabilidade espacial.

Método de Spencer	Probabilidade de Ruptura (sem redução na variância)	Probabilidade de Ruptura (com redução na variância)
Distrib. Normal	62,71%	74,58 – 65,57%
Distrib. Log-normal	64,40%	75,04 – 66,81%

6.6.

Análises Probabilísticas com Variações da inclinação do Talude

Os resultados constataram que a ruptura do talude com inclinação de 2h:1v (Figura 6.1) era iminente. Neste capítulo, foram apresentadas análises probabilísticas considerando diferentes inclinações de taludes, permitindo a determinação da configuração associada a critérios aceitáveis de projeto dos taludes.

As inclinações de taludes consideradas foram de 2.5h:1v, 3.0h:1v, 3.5h:1v e 4.0h:1v. As análises probabilísticas foram executadas pelo método de Segundo Momento, com os mesmos parâmetros de resistência e condições de poropressão descritos no itens 6.2 e 6.3. Todas as análises foram realizadas na superfície crítica de deslizamento, determinada pelos métodos determinísticos. Também foram considerados os efeitos da redução da variância da variabilidade espacial, para as mesmas distâncias de autocorrelação propostas. Foi considerada apenas a hipótese de probabilidade de ruptura com distribuição normal de FS.

Dos resultados obtidos podem-se estabelecer uma relação entre o fator de segurança (FS) determinístico, a probabilidade de Ruptura (Pr%) e a inclinação do talude. Foram considerados os métodos de Bishop e de Spencer. Os resultados estão mostrados nas Figuras 6.18 e 6.19, respectivamente.

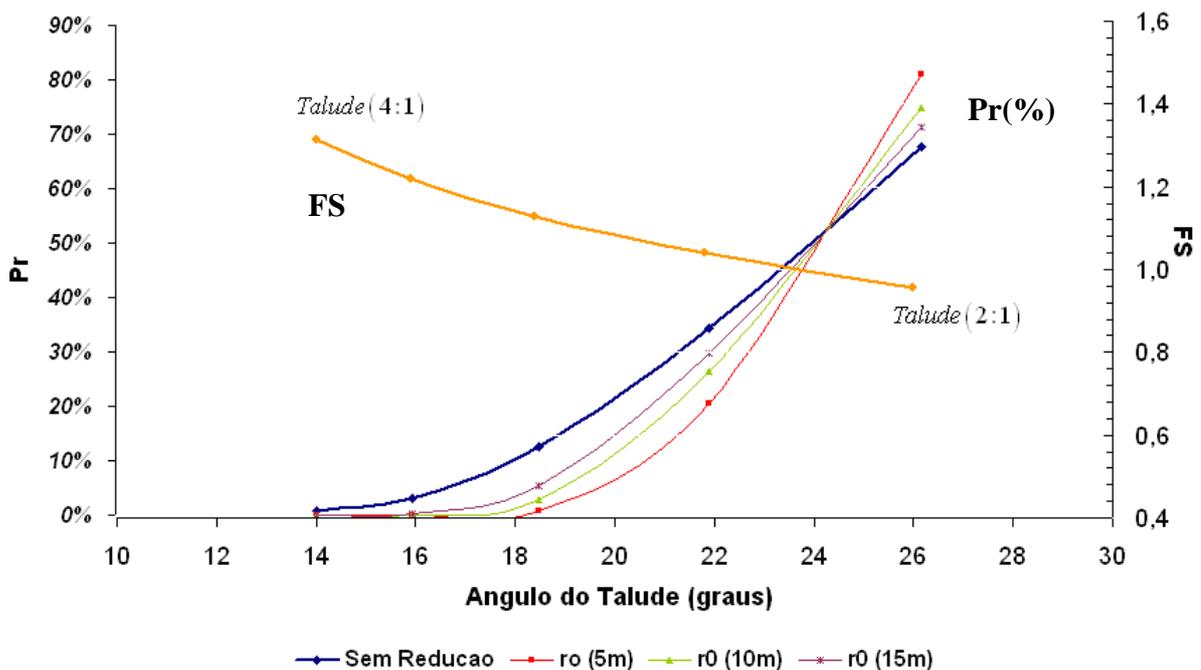


Figura 6.18 – Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes inclinações de taludes: método de Bishop.

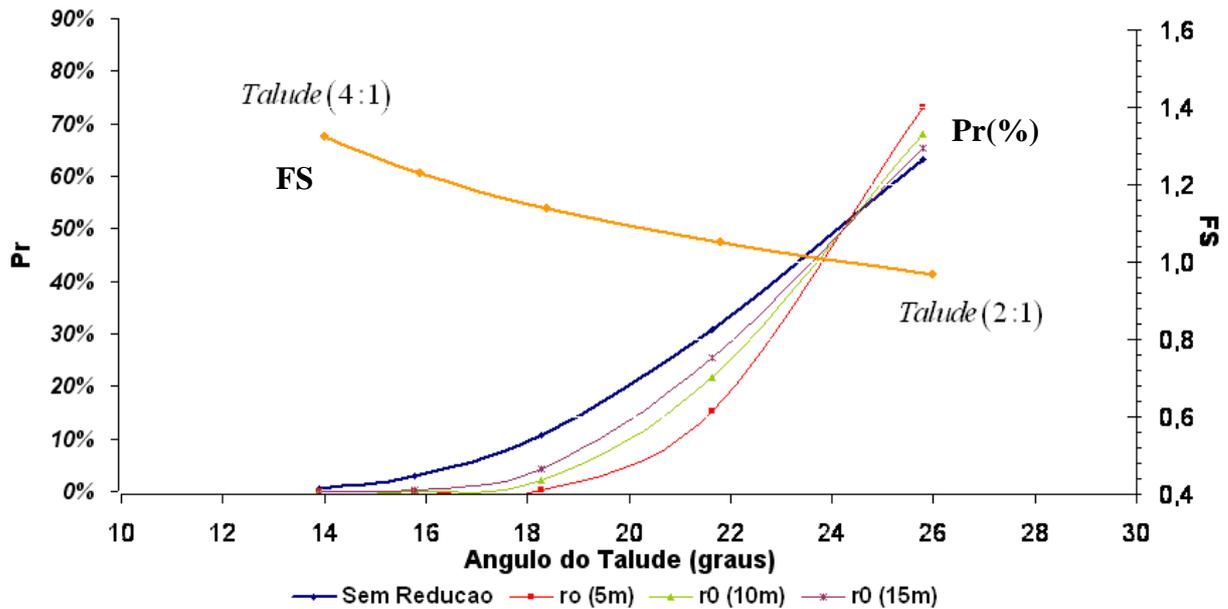


Figura 6.19 - Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes inclinações de taludes: método de Spencer.

Como pode ser observado nas Figuras 6.18 e 6.19, é desprezível o incremento de probabilidade de ruptura entre os taludes de 4,0h:1v e 3,5h:1v, apesar dos fatores de segurança serem diferentes (1,32 e 1,22). Também pode ser observado um maior incremento da probabilidade de ruptura entre as inclinações de 3,0h:1v e 2,5h:1v. Pode-se constatar a utilidade dos métodos probabilísticos quando usados em conjunto com os métodos determinísticos.

Outro aspecto a ser comentado é o efeito de reduzir a variância da variabilidade espacial. Todas as inclinações analisadas mostram menor probabilidade de ruptura utilizando distintas distâncias de autocorrelação. O efeito da distância de autocorrelação é maior com probabilidades de ruptura maiores (2,5h:1v). No caso de taludes com probabilidades de ruptura baixas (4h:1v ou 3,5h:1v), o efeito da distância de autocorrelação é menor.

Em resumo, as Figuras 6.18 e 6.19 mostram que a não redução da variância da variabilidade espacial, para probabilidades de ruptura menores que 50%, resulta em uma superavaliação da probabilidade de ruptura. Para probabilidades de ruptura maiores que 50%, os valores de Pr são subestimados, ou seja, contrários à segurança.

São comumente sugeridos como aceitáveis os taludes com FS entre 1,4 a 1,5. Neste caso, será aceito o talude com inclinação 4h:1v, que tem FS = 1,32, pois ele mostra uma probabilidade de ruptura reduzida.

Nesta inclinação do talude (4h:1v), foram calculados também as probabilidades de ruptura pelo método de Estimativas Pontuais, para os dois métodos de estabilidade de taludes (Bishop e Spencer). Também foram consideradas distribuições de probabilidade Normais e Log Normais do fator de segurança. Todos estes resultados serão comparados aos obtidos pelo método do Segundo Momento.

As Figuras 6.20 e 6.21 mostram os resultados de Pr obtidos. As Tabelas 6.12 a 6.15 resumem as comparações dos valores obtidos e os publicados por El-Ramly (2001, 2006).

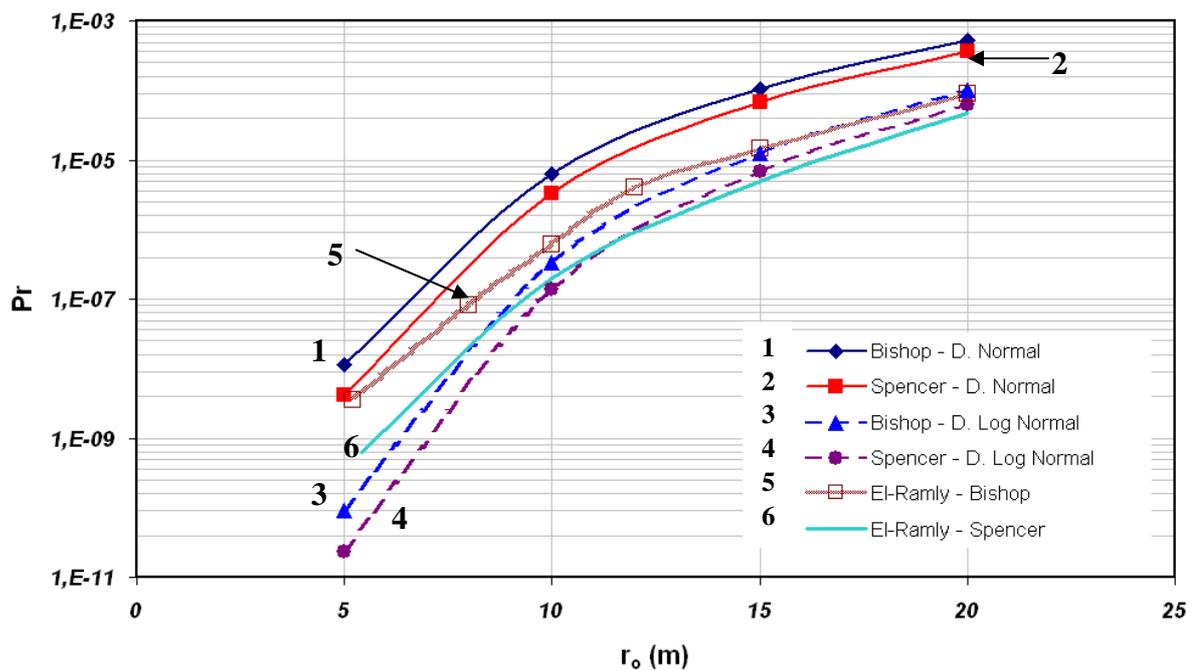


Figura 6.20 – Variação da probabilidade de ruptura no talude 4h:1v, para diferentes distâncias de autocorrelação (r_0), método de segundo momento.

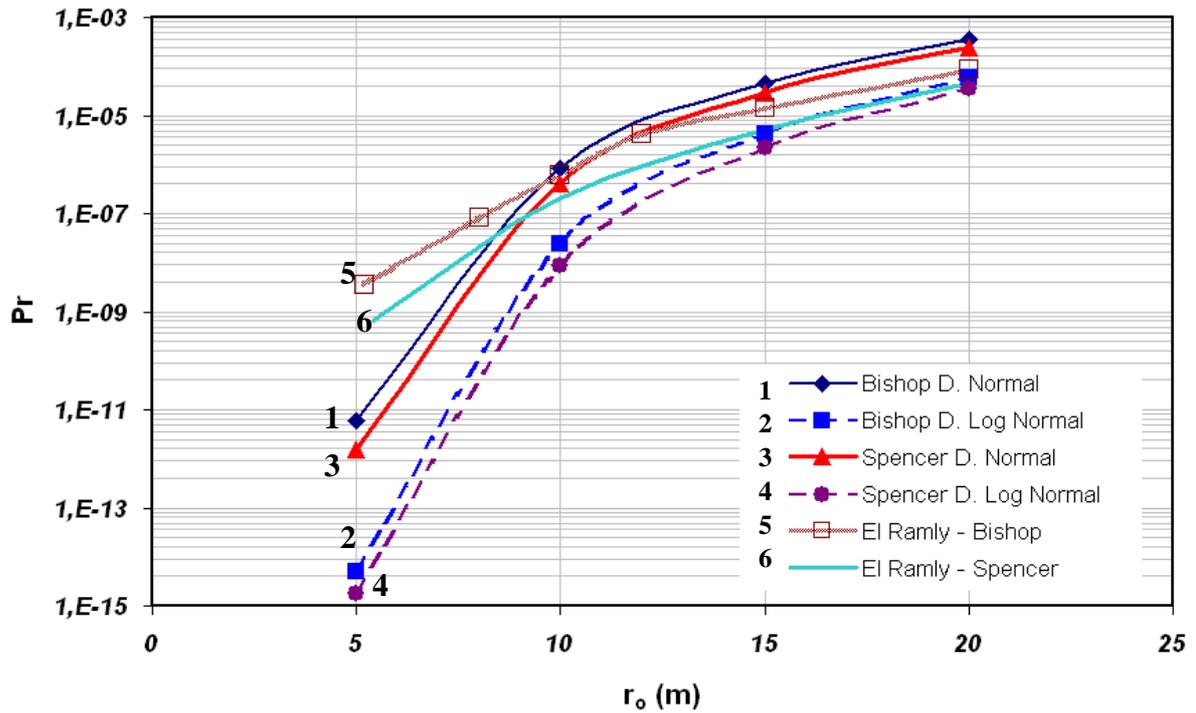


Figura 6.21 – Variação da probabilidade de ruptura no talude 4h:1v, para diferentes distâncias de autocorrelação (r_0), método de estimativas pontuais.

Tabela 6.12 – Comparação das probabilidades de ruptura, segundo momento.

Método de Bishop	FS	Pr	Pr - $r_0(5m)$	Pr - $r_0(10m)$	Pr- $r_0(20m)$
Distrib. Normal	1,315	7,27E-03	1,12E-08	6.19E-06	5.23E-04
Distrib. Log-Normal	1,315	2,97E-03	9,19E-11	3,29E-07	1,01E-04
El-Ramly 2001	1,33	3,0E-04	3,52E-09	6,17E-07	8.84E-05

Tabela 6.13 - Comparação das probabilidades de ruptura, segundo momento.

Método de Spencer	FS	Pr	Pr - $r_0(5m)$	Pr - $r_0(10m)$	Pr- $r_0(20m)$
Distrib. Normal	1,322	6,11E-03	4,23E-09	3,37E-06	3.68E-04
Distrib. Log-Normal	1,322	2,33E-03	2,32E-11	1,41E-07	6,20E-05
El-Ramly 2001	1,34	11,0E-02	6,34E-10	1.94E-07	4.65E-05

Tabela 6.14 - Comparação das probabilidades de ruptura, estimativas pontuais.

Método de Bishop	FS	Pr	Pr - $r_0(5m)$	Pr - $r_0(10m)$	Pr- $r_0(20m)$
Distrib. Normal	1,316	7,12E-03	6,01E-12	8,17E-07	3,50E-04
Distrib. Log-Normal	1,316	2,88E-03	5,00E-15	2,37E-08	5,99E-05
El-Ramly 2001	1.33	3.0E-04	3,52E-09	6,17E-07	8.84E-05

Tabela 6.15 - Comparação das probabilidades de ruptura, estimativas pontuais.

Método de Spencer	FS	Pr	Pr - r ₀ (5m)	Pr - r ₀ (10m)	Pr-r ₀ (20m)
Distrib. Normal	1,323	6,03E-03	1,50E-12	4,03E-07	2,43E-4
Distrib. Log-Normal	1,323	2,28E-03	1,78E-15	8,71E-09	3,59e-05
El-Ramly 2001	1.34	11.0E-02	6,34E-10	1.94E-07	4.65E-05

Pode-se observar que os resultados têm grande correspondência e a equação 3.27 (Capítulo 3) mostra-se aceitável para quantificar a redução da variância da variabilidade espacial.

A Tabela 6.13 (Método de Spencer) mostra uma grande diferença entre as probabilidades de ruptura (Pr) obtidas sem redução da variância da variabilidade espacial, com respeito ao publicado por El-Ramly (2006) e ao calculado. Porém, na Tabela 6.12 (Método de Bishop), a diferença é pequena, podendo-se supor que o valor reportado por El-Ramly (Pr = 11.0E-02) está incorreto.

Os dois métodos probabilísticos utilizados (Segundo Momento e Estimativas Pontuais) mostraram-se aceitáveis para distâncias de autocorrelação maiores que 10m. Para menores distâncias de autocorrelação, o método de Segundo Momento mostra resultados concordantes com os reportados por El-Ramly. No entanto, o método de Estimativas Pontuais não mostra esta concordância.

6.7. Análises Probabilísticas Considerando Coeficientes de Correlação entre os Parâmetros de Resistência

Como foi mostrado na Figura 6.2, não existe correlação entre os parâmetros de resistência. Neste Capítulo são feitas análises probabilísticas na inclinação original do talude (2h:1v), mediante os distintos métodos (Segundo Momento, Estimativas Pontuais e Monte Carlo), para poder quantificar o efeito da hipótese de algum tipo de correlação.

Nos métodos de Segundo Momento e Estimativas Pontuais foram, calculadas as probabilidades de ruptura assumindo distribuições de probabilidade Normal e Log-normal. Para a análise de Monte Carlo, foi utilizado o programa Slope/W. Neste programa, a probabilidade de ruptura só pode ser obtida considerando-se uma distribuição Normal do fator de segurança.

Para facilitar as análises, só foram consideradas as duas variáveis aleatórias verificadas anteriormente como sendo as mais relevantes para este caso: os parâmetros de resistência (c' , ϕ'). As condições de propressões foram as médias obtidas pelas linhas de tendência.

A Figura 6.22 mostra os resultados obtidos com o método de Bishop. Resultados similares podem ser obtidos com os métodos de Spencer.

Observa-se na Figuras 6.22 que a consideração de algum tipo de coeficiente de correlação negativa influencia muito a probabilidade de ruptura, enquanto a hipótese de coeficiente de correlação positiva não gera grandes diferenças. No caso de ausência de dados, é recomendável não considerar nenhum coeficiente de correlação.

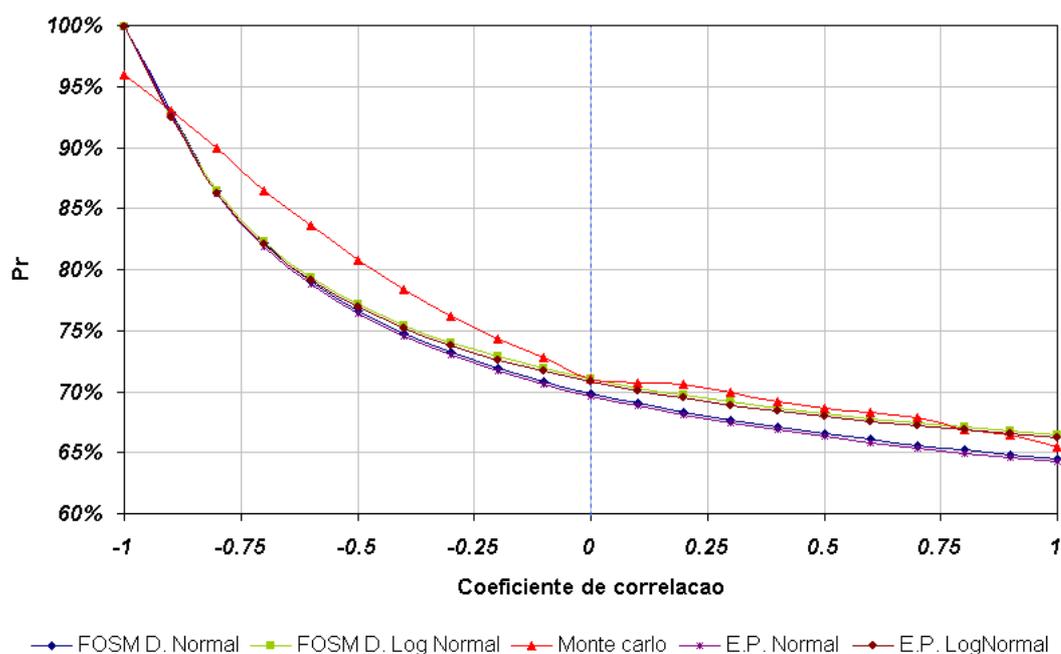


Figura 6.22 – Valores de probabilidade de ruptura em função do coeficiente de correlação.

6.8. Conclusões

O método de Segundo Momento mostra-se prático e eficiente, fornecendo resultados aceitáveis em comparação aos demais métodos, mas com menos esforço computacional.

No caso inicial do talude 2:1, a probabilidade de ruptura sem redução na variância foi muito elevada (em média 65%). Aplicando-se a redução na variância, o valor é maior (em média 75%). Isto mostra que o efeito da redução da variância da viabilidade espacial não necessariamente leva a probabilidades de ruptura superestimadas. Em qualquer caso, a ruptura do talude era iminente, e não tinha importância haver reduções na variância da variabilidade espacial.

A decisão de quantas variáveis aleatórias vai ser usada na análise depende do engenheiro projetista. Na realidade, devem ser utilizadas todas aquelas variáveis que influenciam a análise. Neste Capítulo, a utilização de 3 ou 5 variáveis não mostra diferenças significativas no resultado final já que só foram considerados dois parâmetros: resistência ao cisalhamento e condições de propressão. De fato, a existência de outro parâmetro (cargas externas) poderia afetar o resultado final.

A utilização de um intervalo de distâncias de autocorrelação (r_0) não mostrou maior importância quando a probabilidade de ruptura era reduzida (Figuras 6.18 e 6.19). Quanto maior é a probabilidade de ruptura, maior é a importância da distância de autocorrelação para os resultados.

Do ponto de vista prático, como os projetos geotécnicos buscam sempre valores reduzidos de probabilidade de ruptura, o uso de um intervalo de distâncias de autocorrelação poderia ser descartado. É, porém, recomendável a utilização de um intervalo de distâncias de autocorrelação, pois este parâmetro representa também uma incerteza. É mais adequado definir um intervalo provável do valor de P_r do que tentar estabelecer um resultado absoluto.

Nas Figuras 6.18 e 6.19 também pode ser observado que a não redução da variabilidade espacial tem um efeito significativo: para probabilidade de ruptura menor que 50%, ocorre uma superestimativa de Pr ; para valores maiores que 50%, o valor de Pr é subestimado.

No caso do talude com inclinação 4h:1v, os métodos probabilísticos (Segundo Momento e Estimativas Pontuais), com o fator de correção (Equação 3.27), mostraram-se aceitáveis, desde que as distâncias de autocorrelação sejam maiores que 10m (Figuras 6.20 e 6.21). Para distâncias menores que 10m, o Método de Segundo Momento foi o único que mostrou concordância com os resultados publicados por El-Ramly.

O uso de um coeficiente de correlação entre os parâmetros de resistência do solo não é recomendado, no caso de dados insuficientes. Como foi mostrado na Figura 6.20, o uso de algum tipo de correlação, sobretudo um valor negativo, afeta de forma significativa o resultado final da probabilidade de ruptura.