

5 BARRAGEM DE REJEITOS SYNCRUDE

Neste capítulo será apresentada a análise probabilística de uma barragem de rejeitos. Este tipo de barragem tem grande importância devido principalmente à quantidade de material depositado e armazenado no reservatório.

A ruptura deste tipo de estrutura pode causar grandes perdas econômicas e ambientais, Por isso estudos para a garantia da estabilidade destas estruturas são de suma importância.

Devido ao seu processo construtivo, as barragens de rejeito apresentam grandes dispersões nas propriedades de resistência e nas propriedades hidráulicas. Assim, as análises probabilísticas são relevantes, pois permitem uma melhor quantificação das incertezas.

A barragem pesquisada encontra-se no Canadá e pertence à “*Synchrude Canadá Limited*”. Nesta barragem já foram feitas análises probabilísticas da estabilidade dos taludes por El-Ramly (2001), aplicando a metodologia de Monte Carlo e considerando a variabilidade espacial (descrita no Capítulo 4).

Christian et al (1992, 1994) mostraram a necessidade de contabilizar a variabilidade espacial nas análises probabilísticas. A não consideração da variabilidade espacial pode levar a erros no cálculo da probabilidade de ruptura.

Duncan et al (2003) consideraram que o uso da metodologia proposta por El-Ramly (2001) não é necessário para a quantificação da variabilidade espacial, e que as técnicas descritas no Capítulo 4 (Segundo Momento, Estimativas Pontuais), podem ser utilizadas junto com um fator de correção, como descrito no Capítulo 3 (equação 3.27), para a contabilização do efeito da variabilidade espacial.

Pelo exposto, neste Capítulo será avaliado o uso das técnicas usuais de análise de probabilidade, junto com o fator de correção da variabilidade espacial (equação 3.27) de forma a se comparar com os resultados reportados por EL-Ramly (2001).

5.1. Considerações do Projeto

O Projeto Syncrude consiste na construção de uma lagoa de rejeitos para armazenar 350hm^3 de materiais. Esta lagoa está formada pela construção de diques de areia com uma circunferência aproximada de 18 km, elevação média de 40m e elevação máxima de 88m.

Para um melhor entendimento da zona de análise o dique é dividido em 30 pilhas, cada uma com 700m de comprimento (Figura 5.1). Será avaliada apenas a pilha 23.

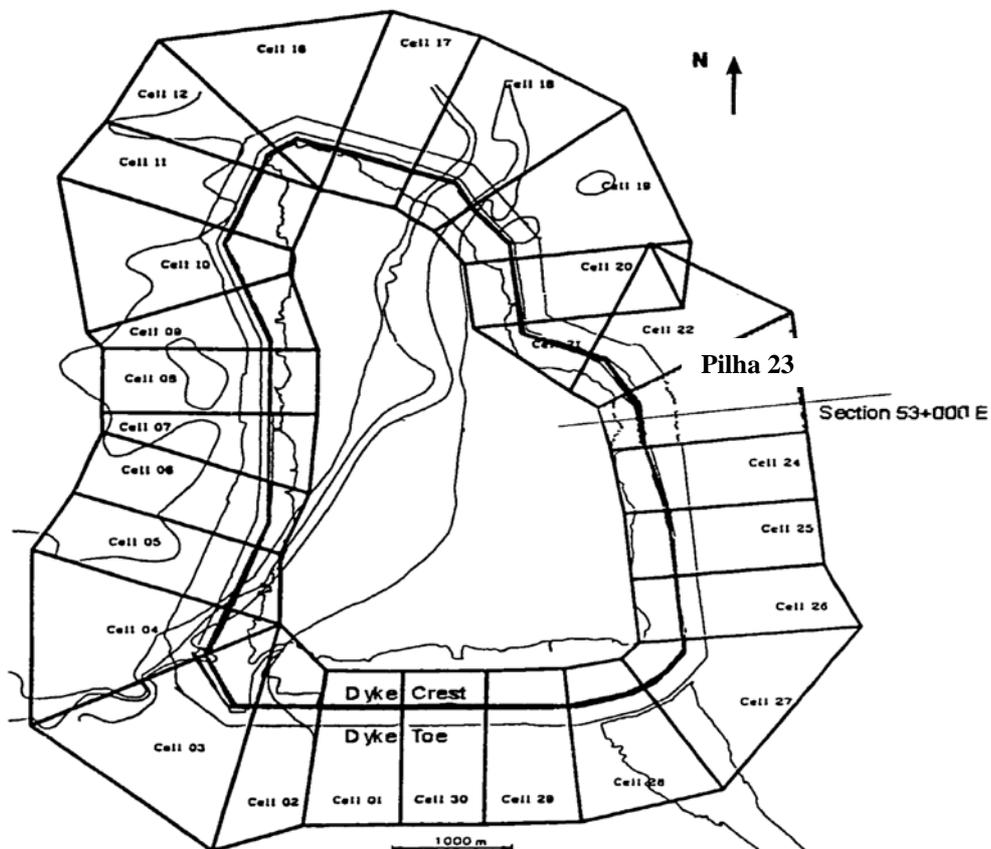


Figura 5.1 – Vista em planta das pilhas e lagoa de rejeitos.

5.2. Descrição da Pilha 23

No projeto inicial do dique, a elevação da pilha 23 era de 44m, tendo sido construída mediante o método de montante, originalmente com um talude de 4h:1v. Foram instalados inclinômetros para o monitoramento dos movimentos horizontais do talude.

Em 1981, foram localizados movimentos no contato entre dois materiais (Kca e Kcw). Em 1984, quando a elevação do dique era de 23m, foram medidos 19cm de deslocamento. Isto levou a uma completa revisão do projeto, com um programa detalhado de investigação que incluía furos, amostragem, provas de laboratório e piezômetros.

As investigações mostraram a presença de uma camada glacial perturbada de argilito (Kca), com planos de corte bem pronunciados embaixo do talude de montante. Os movimentos foram notados principalmente ao longo de planos discretos de cisalhamento na camada Kca imediatamente sobre uma camada pré-adensada (Kcw).

Um incremento substancial da poropressão foi observado perto da interface Kca/Kcw. A seção 53+00E (Figura 5.1) foi considerada como a mais crítica da pilha 23.

A revisão do projeto indicou que a geometria original (inclinação 4h:1v) correspondia a um fator de segurança inaceitável ($FS = 1,09$), requerendo modificações adicionais.

O objetivo era garantir um fator de segurança mínimo de 1,30. Este foi obtido com uma inclinação de talude de 6,8h:1v, para uma elevação de 352m (altura do dique 44m). Em 1993, o movimento máximo registrado foi de 43,7cm na seção 53+00E.

Nesta seção 53+00E, foram então executadas as análises probabilísticas descritas a seguir.

5.3. Estratigrafia

A seção 53+00E mostra uma estratigrafia variada, que compreende uma camada superficial de areia, de origem glacial-fluvial (Pf4), com uma espessura média de 3,0m. Esta encontra-se sobre uma camada de areia glacial (*Sandy Till*, Pgs), que apresenta espessura variada, desde 3m no meio do dique, até 10m no pé. Abaixo se encontra uma fundação composta por dois materiais, uma argila glacial (Pgc) e um argilito laminado (*Clay Shale*, kca).

O material Pgc encontra-se sob a crista do dique e se estende até jusante. O material Kca encontra-se sob o talude de montante. Ambas as camadas têm uma espessura média de 6,0m. Sob estas camadas encontra-se a argila pré-adensada (Kcw).

A Figura 5.2 mostra o perfil estratigráfico da seção 53+00E.

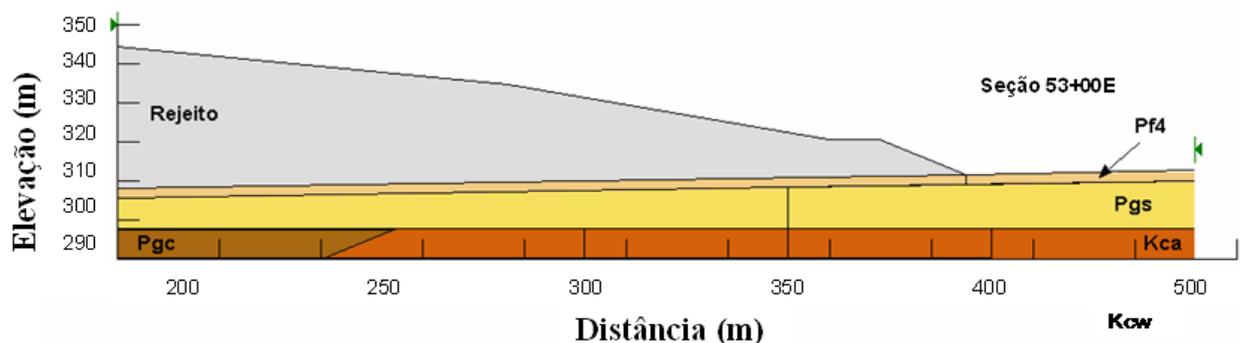


Figura 5.2 – Geometria e estratigrafia da seção 53+00E.

5.4. Parâmetros de Resistência

Como foi exposto, nas investigações de campo foi encontrado um deslizamento concentrado na camada Kca, justo sobre a camada Kcw. O conhecimento dos parâmetros de resistência de pico e residual passou a ter

importância, sendo realizados ensaios triaxiais e ensaios de cisalhamento direto em amostras intactas e em amostras com planos preexistentes de cisalhamento.

Ensaio de laboratório também foram realizados nos materiais Pgs, Pgc, TS (rejeito), Kcw, mas nenhum ensaio foi feito no material Pf4.

5.4.1. Argilito Laminado (*Clay Shale, kca*)

Como fora registrado um deslocamento nesta camada, estudos prévios (Thurber, 1989; Nicol, 1994) concluíram que a estabilidade do dique estaria controlada pela resistência residual deste material.

Ensaio de cisalhamento direto foram considerados adequados para obter a resistência residual do material. No total, foram realizados 82 ensaios em amostras coletadas da pilha 23.

A Tabela 5.1 mostra um resumo das propriedades físicas e mecânicas desse material.

Tabela 5.1 – Características geotécnicas do argilito (kca).

Parâmetro do Solo	Intervalo		Valor
	Mínimo	Máximo	Médio
Teor de Umidade %	17,0	40,0	26,4
Limite de Liquidez %	59,0	162,0	110,0
Limite de Plasticidade	16,0	30,0	23,8
Peso Específico kN/m ³	18,1	20,7	19,5
Ângulo de Atrito Residual (graus)	3,8	13,8	7,5
Ângulo de Atrito Pico (graus)	6,8	36,7	18,6

A Figura 5.3 mostra a envoltória de resistência ao cisalhamento residual para as 82 amostras de solo. A envoltória corresponde a um ângulo de atrito residual (7,5°), com coesão efetiva nula.

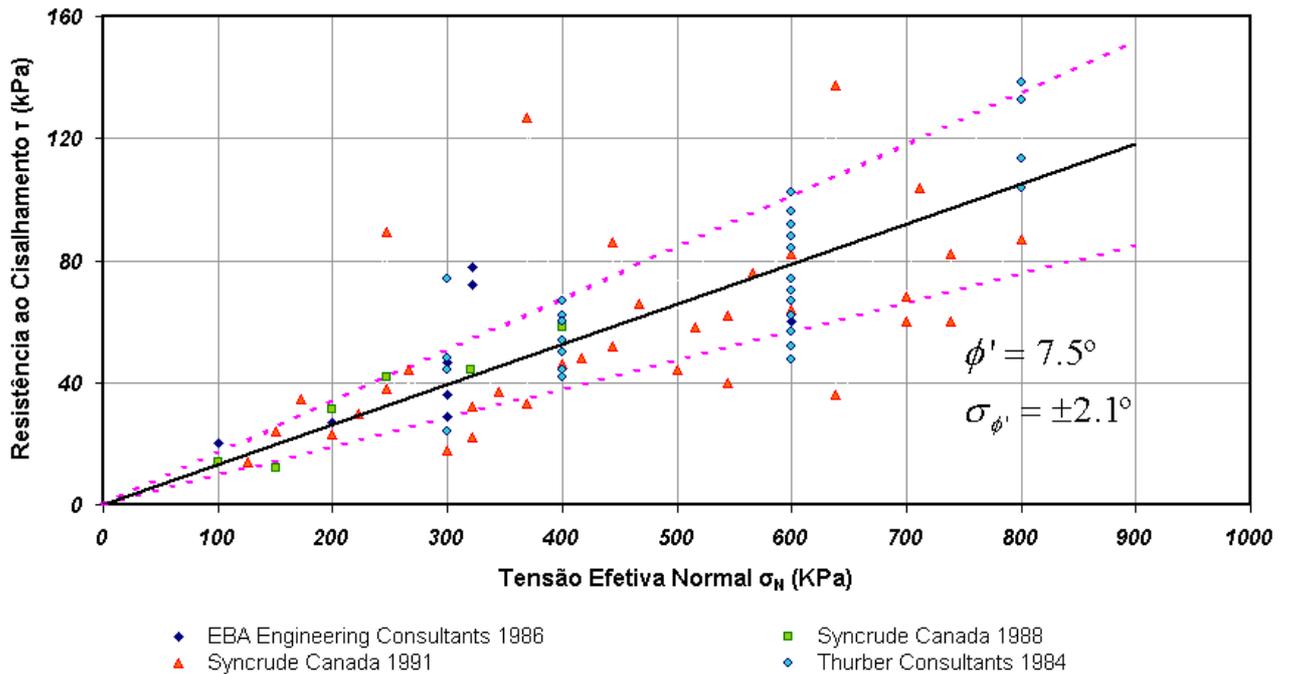


Figura 5.3 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para o material Kca.

Segundo os critérios descritos no Capítulo 3, foi obtida a tendência e, posteriormente, definido o desvio padrão de cada componente.

Pode-se observar que a dispersão dos dados ao redor da tendência é inevitável e a seleção de um ângulo de atrito médio corresponde a um valor elevado de incerteza.

O desvio padrão do ângulo de atrito, resultado da dispersão dos dados (variabilidade espacial, considerando distâncias de autocorrelação infinitas) foi estimado em $2,13^\circ$ e o erro estatístico (dados insuficientes no cálculo da tendência) foi de $0,25^\circ$. O desvio padrão produto das duas componentes é obtido como a raiz quadrada da soma ao quadrado das duas componentes, obtendo-se o valor de $2,1^\circ$.

5.4.2. Areia Glacial (Pgs)

Neste material só foram realizados 5 ensaios para obter a resistência ao cisalhamento, sendo 4 ensaios triaxiais e 1 cisalhamento direto. Os ensaios triaxiais foram realizados seguindo diferentes técnicas: 1 isotropicamente consolidado não drenado, 2 anisotropicamente consolidado não drenados, 1 isotropicamente consolidado drenado.

Como pode ser observado o ângulo de atrito de pico foi obtido de diferentes ensaios de laboratório (diferentes populações). Agrupando estes dados, podem-se incrementar as incertezas presentes. É julgado que, assumindo-se as incertezas de cada grupo separadamente, pode levar a um maior erro na determinação da incerteza total, pelo que é decidido agrupar os dados.

A Tabela 5.2 mostra um resumo das propriedades físicas e mecânicas do material.

Tabela 5.2 – Características geotécnicas da areia glacial (Pgs).

Parâmetro do Solo	Intervalo		Média
	Mínimo	Maximo	
Teor de Finos %	34	76	46,1
Limites de Atterberg	Material de baixa plasticidade		
Peso Específico (kN/m ³)	21,3	22,6	22,1
Ângulo de atrito de Pico (graus)	33,3	39,2	35,74

Os desvios padrão do ângulo de atrito, devido à variabilidade espacial inerente, foi de 1,97 e o produto do erro estatístico foi de 0,50. Estes valores foram computados de acordo aos critérios mostrados no Capítulo 3. O desvio padrão, produto das duas componentes, é obtido como a raiz quadrada da soma ao quadrado das duas componentes, obtendo-se o valor de 2,03°.

5.4.3. Rejeito de Areia (TS)

Neste material foram realizados poucos ensaios, ou seja, os dados são limitados. Análises paramétricas mostram que o efeito da resistência ao cisalhamento deste material tem efeito reduzido no resultado da análise de estabilidade do dique. O ângulo de atrito não foi, portanto, considerado como uma variável aleatória.

Pelo exposto, considera-se uma coesão efetiva nula, e um ângulo de atrito de 34° ($c'=0$, $\phi'=34^\circ$). Nenhum ensaio de laboratório foi realizado na areia glacial-fluvial (Pf4). Portanto, os parâmetros de resistência não são conhecidos, mas o impacto de estes parâmetros na análise é mínimo, sendo, portanto, considerados iguais aos parâmetros dos rejeitos.

5.4.4. Argila Glacial (Pgc) e Argilito (Kcw)

A análise de estabilidade determinística mostra que a superfície de ruptura crítica não passa através destes materiais. Não é, portanto necessária à quantificação destes parâmetros.

5.5. Poropressões

Diversos piezômetros foram instalados durante a construção do dique nas diferentes camadas de solo, tendo maior importância os colocados na camada Kca.

A Figura 5.4 mostra os piezômetros colocados nas diferentes camadas.

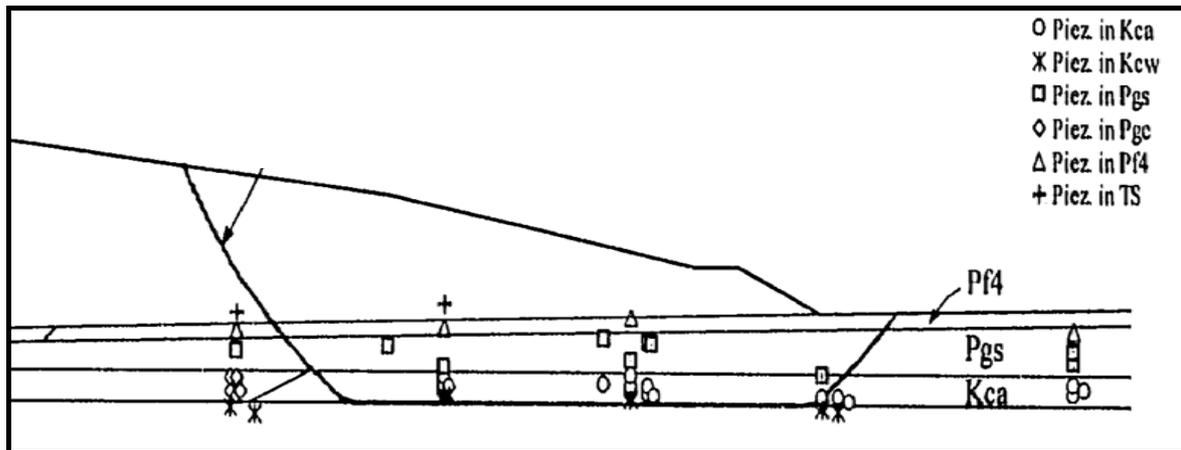


Figura 5.4 – Localização dos piezômetros na zona de estúdio.

5.5.1. Poropressões na Camada Kca

Como foi exposto, nesta camada encontraram-se os maiores deslocamentos. A superfície de deslizamento passa, portanto, através desta camada, e o conhecimento das poropressões é de muita importância. Foram instalados 18 piezômetros na seção 53+00E, como mostrados na Figura 5.5.

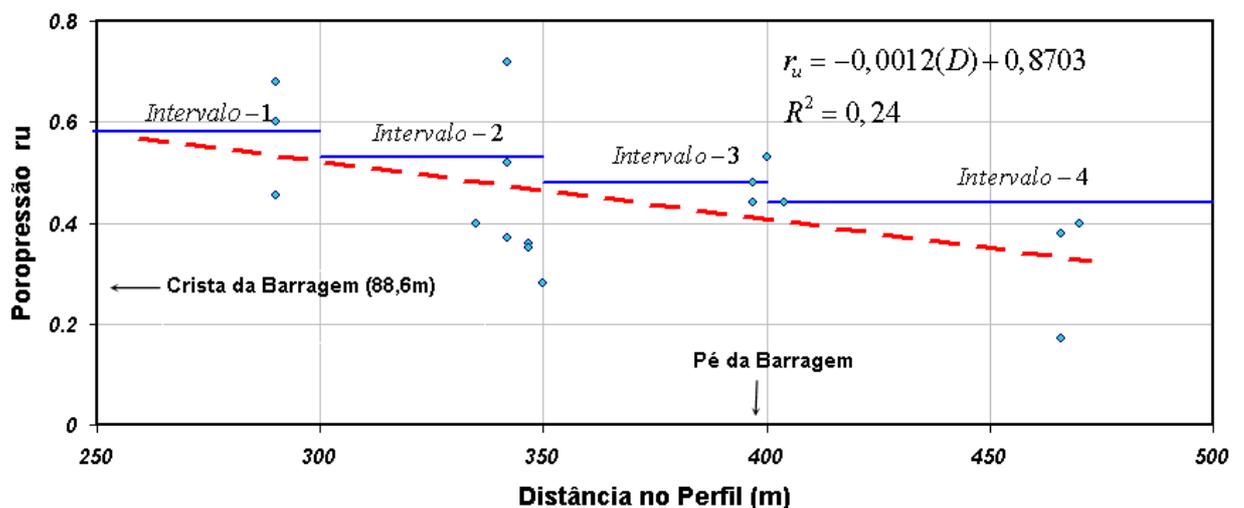


Figura 5.5 – Poropressões ao longo da seção 53+00E na camada Kca

Como pode-se observar na Figura 5.5, existe uma grande dispersão dos dados ao redor da tendência (linha tracejada). O coeficiente de determinação R^2 é muito baixo, já que, como se sabe, uma linha de tendência é mais confiável quando o coeficiente de determinação aproxima-se de 1,0.

A equação da linha de tendência da reta tracejada, ($r_u = -0,001 D + 0,859$, onde D é a distância), que representa a variação do coeficiente de poropressão com a distância, foi obtida segundo os procedimentos descritos no Capítulo 3. Porém, estas não podem ser utilizadas desta maneira devido ao programa Slope/W não considerar a variação do coeficiente de poropressão com a distância na análise de estabilidade. Portanto, procedimentos adicionais devem ser efetuados.

Da Figura 5.5, pode-se dizer que os dados se encontram num intervalo de 0,20 ate 0,72, com uma média de 0,45. Pode-se observar também um valor de 0,17 a uma distancia de 465m, aproximadamente. Este valor foi eliminado da análise, por ser excessivamente baixo.

Para poder usar os dados dos coeficientes de poropressões na análise com o programa Slope/W, é preciso fazer algumas modificações. Na realidade a linha de tendência tracejada foi trocada por quatro linhas contínuas, como mostrados na Figura 5.5. As médias e desvios padrão foram calculados segundo os critérios descritos no Capítulo 3. A Tabela 5.3 mostra os intervalos propostos com seus respectivos desvios padrão e valores médios.

Tabela 5.3 – Coeficiente de poropressão r_u , nos intervalos propostos na camada kca.

Intervalo (m)	Média (r_u)	Desvio Padrão	
		Inerente Variabilidade Espacial	Erro Estatístico
236 - 300	0,58	0,11	0,066
300 - 350	0,53	0,15	0,056
350 - 400	0,48	0,05	0,026
400-500	0,44	0,07	0,033

Todos os intervalos mostram coeficientes de poropressão (r_u) superiores aos dos calculados com a tendência (Linha tracejada), mas do lado da segurança.

5.5.2. Poropressões na Camada Pgs

Nesta camada foram instalados 14 piezômetros em diferentes profundidades, e localizados ao longo da seção 53+00E, como se apresenta na Figura 5.6.

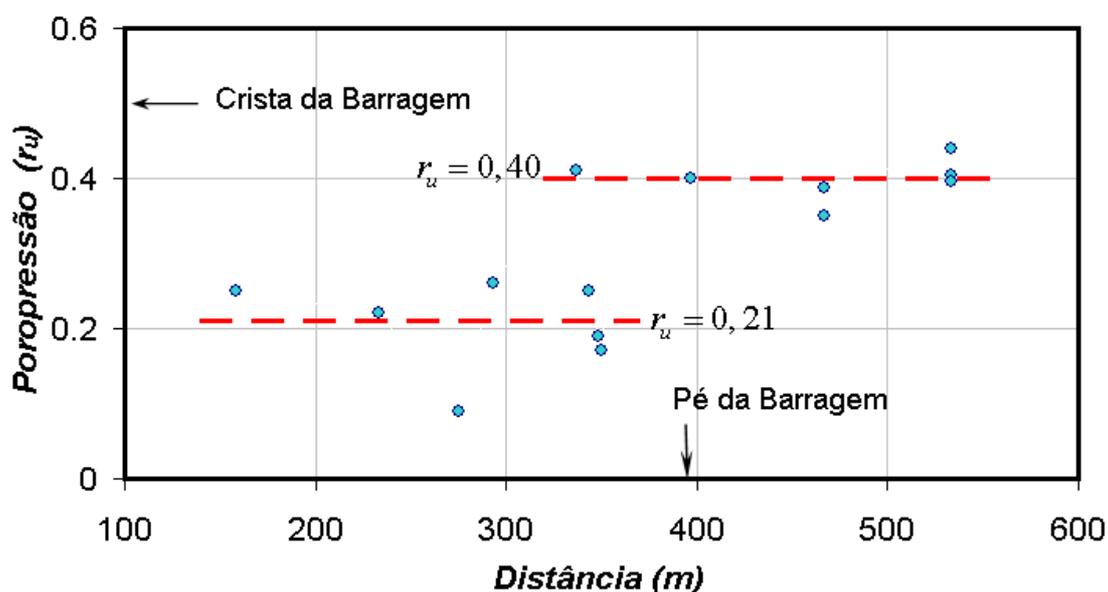


Figura 5.6 – Poropressões ao longo da seção 53+00E na camada Pgs.

Como se pode observar na Figura 5.6, os coeficientes de poropressão (r_u) se encontram num intervalo de 0,10 até 0,46, com valor médio de 0,30. Pode-se observar também que existe uma clara tendência dos valores, entre as distâncias 150m e 350m (meio do talude), e desde 350m até 550m (pé do talude). Assim, foi decidido subdividir os coeficientes de poropressão nestes dois intervalos. A Tabela 5.4 mostra as médias e desvios padrão dos intervalos propostos. Todos estes dados foram obtidos segundo os procedimentos mostrados no Capítulo 3.

Tabela 5.4 – Coeficiente de poropressão r_u , camada Pgs.

Intervalo (m)	Média	Desvio Padrão	
		Inerente Variabilidade Espacial	Erro Estatístico
150 – 350	0,21	0,06	0,023
350 – 550	0,40	0,03	0,010

5.5.3. Poropressões no Rejeito

Baseados nos dados de 3 piezômetros, a superfície freática no rejeito foi inferida, como mostrado na Figura 5.7. Como os dados dos piezômetros têm pouca dispersão, e a superfície de deslizamento tem pouca extensão, a linha freática foi considerada determinística e não uma variável aleatória.

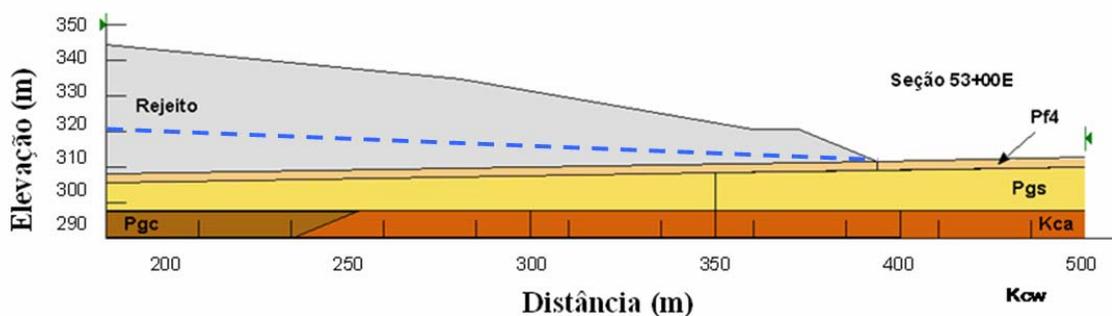


Figura 5.7 – Posição da linha freática dentro do rejeito.

5.5.4. Poropressões na Camada Pf4

Nesta camada foram instalados 4 piezômetros e devido às mesmas considerações encontradas no rejeito (pequena dispersão dos dados e superfície de deslizamento com pequena extensão nesta camada), decidiu-se que as poropressões podem ser tratadas como variáveis determinísticas.

Os dados dos piezômetros foram divididos em dois intervalos: o primeiro se encontra embaixo do rejeito e o segundo no Pé do dique, como mostrado na Figura 5.7. Os valores de coeficiente de poropressão (r_u) foram respectivamente iguais a 0,11 e 0,30.

5.6. Análise Determinística da Estabilidade do Talude

Com os dados médios de resistência ao cisalhamento e os coeficientes de poropressão descritos nas seções 5.4 e 5.5, foram calculados os fatores de segurança determinísticos, pelos métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price (considerando-se função constante ou senoidal). As superfícies de ruptura críticas e seus respectivos valores de FS são mostrados na Figura 5.8 e na Tabela 5.5.

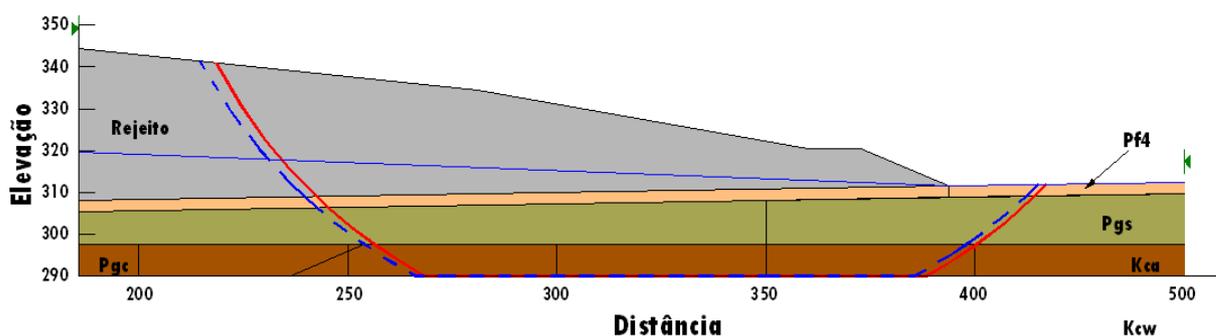


Figura 5.8 – Superfícies de ruptura críticas.

Foram realizadas análises de estabilidade de taludes pelo método de Morgenstern-Price (Função constante), porque o método de Spencer resulta em probabilidades de ruptura ligeiramente inferiores às obtidas com o método de Morgenstern-Price (Função seno) ou de Bishop.

Tabela 5.5 – Resultados das análises determinísticas.

Método de Análise	Fator de Segurança	Superfície de Ruptura
Bishop	1,307	Linha Contínua
Spencer	1,328	Linha Tracejada
M. Price (F. seno)	1,288	Linha Contínua
M. Price (F. const.)	1,328	Linha Tracejada

Uma das diferenças entre os métodos de Spencer e de Morgenstern-Price é a função que descreve a variação de forças entre fatias. As análises e principais conclusões estão apresentadas nos seguintes itens.

5.7.

Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes

Aqui serão apresentados os resultados das análises probabilísticas pelos métodos de Segundo Momento e de Estimativas Pontuais. Inicialmente considerando-se toda a inerente variabilidade espacial das propriedades dos solos (considerando-se perfeita autocorrelação ou distâncias de autocorrelação infinitas). A seguir, aplicou-se o fator de correção (f) da inerente variabilidade espacial, para avaliar sua relevância neste caso.

A Tabela 5.6 mostra um resumo das propriedades consideradas como variáveis aleatórias e seus respectivos desvios padrão.

O desvio padrão total é calculado como a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada componente (Inerente variabilidade Espacial, Erro Estatístico). Como pode ser observado, foram considerados 8 variáveis aleatórias em cada análise.

Tabela 5.6 – Propriedades das variáveis aleatórias consideradas na análise.

Solo	Variável Aleatória	Valor Médio	Desvio Padrão		
			Inerente Variabilidade Espacial	Erro Estatístico	Total
Kca	\emptyset_{Kca}	7,5	2,13	0,25	2,15
	r_u (236-300)	0,58	0,11	0,066	0,13
	r_u (300-350)	0,53	0,15	0,056	0,16
	r_u (350-400)	0,48	0,05	0,026	0,05
	r_u (400-500)	0,44	0,07	0,033	0,07
Pgs	\emptyset_{Pgs}	35,74	1,97	0,50	2,03
	r_u (150-350)	0,24	0,06	0,023	0,06
	r_u (350-550)	0,40	0,03	0,010	0,03

5.7.1.

Análises Probabilísticas Assumindo Perfeita Correlação das Variáveis Aleatórias

Este tipo de análise contempla uma perfeita autocorrelação das propriedades dos solos, em qualquer direção (distâncias de autocorrelação infinita). Portanto, o desvio padrão da inerente variabilidade espacial não é reduzido, como foi explicado no Capítulo 3. Isto não é totalmente correto, pois as propriedades dos solos só mostram uma perfeita autocorrelação até uma determinada distância, desaparecendo com o incremento da distância de autocorrelação (r_0), pelo que poderia ser considerada alguma redução no desvio padrão.

Na análise de Segundo Momento também foi pesquisado o efeito dos incrementos utilizados no cálculo das derivadas parciais. Estes incrementos foram: valor do desvio padrão, 50% do desvio padrão, 10% do valor do parâmetro, 5% do valor do parâmetro.

Tabela 5.7 – Probabilidades de ruptura, considerando distribuição normal.

Método de Análisis	Segundo Momento - Valor do Incremento				Estimativas Pontuais
	Desvio P.	50% do D. Padrão	10% do Parâmetro	5% do Parâmetro	
Bishop	2,28%	2,19%	2,42%	2,42%	2,10%
Spencer	1,54%	1,51%	1,67%	1,60%	1,45%
M. Price (FC)	1,54%	1,51%	1,67%	1,60%	1,45%
M. Price (FS)	2,23%	2,03%	2,13%	2,31%	2,18%

Tabela 5.8 - Probabilidades de ruptura, considerando distribuição log-normal.

Método de Análisis	Segundo Momento - Valor do Incremento				Estimativas Pontuais
	Desvio P.	50% do D. Padrão	10% do Parâmetro	5% do Parâmetro	
Bishop	1,30%	1,23%	1,40%	1,39%	1,16%
Spencer	0,75%	0,73%	0,83%	0,79%	0,69%
M. Price (FC)	0,75%	0,73%	0,83%	0,79%	0,69%
M. Price (FS)	1,30%	1,16%	1,23%	1,37%	1,26%

As Tabelas 5.7 e 5.8 mostram os distintos resultados encontrados. Pode-se notar que a hipótese de uma distribuição normal de FS corresponde a maiores probabilidades de ruptura. Portanto, esta é uma hipótese conservativa, a favor da segurança.

A diferença encontrada entre os métodos de Segundo Momento e de Estimativas Pontuais é mínima, podendo ser considerada desprezível.

As análises feitas pelo método de Spencer resultaram em probabilidades de ruptura ligeiramente inferiores aos encontrados pelo método de Bishop e Morgenstern-Price (Função seno). Assim, foram calculadas as probabilidades de ruptura por Morgenstern-Price com função constante, para comparação com o método de Spencer.

Uma das diferenças entre os métodos de Spencer e Morgenstern-Price é a função que descreve a variação das forcas entre fatias. O método de Morgenstern-Price com função constante deveria fornecer as mesmas probabilidades de ruptura que o método de Spencer. A pequena diferença na probabilidade de ruptura é atribuída à escolha da função.

Na análise de Segundo Momento (FOSM) pode-se observar que os incrementos escolhidos para o cálculo da derivada parcial têm pouco efeito no cálculo da probabilidade de ruptura.

Uma das principais vantagens do método FOSM é poder observar por inspeção a contribuição de cada parâmetro (variável aleatória) na variância total de FS. Como mostrado na Figura 5.9, resultados similares foram encontrados nos demais métodos. Outro aspecto importante é poder visualizar qual parâmetro contribui mais para a probabilidade de ruptura (inerente variabilidade espacial ou erro estatístico).

A probabilidade de ruptura está muito influenciada pelos parâmetros na camada Kca, sendo o parâmetro de resistência (ângulo de atrito) o que mais contribui, seguido pelos coeficientes de poropressão (r_u).

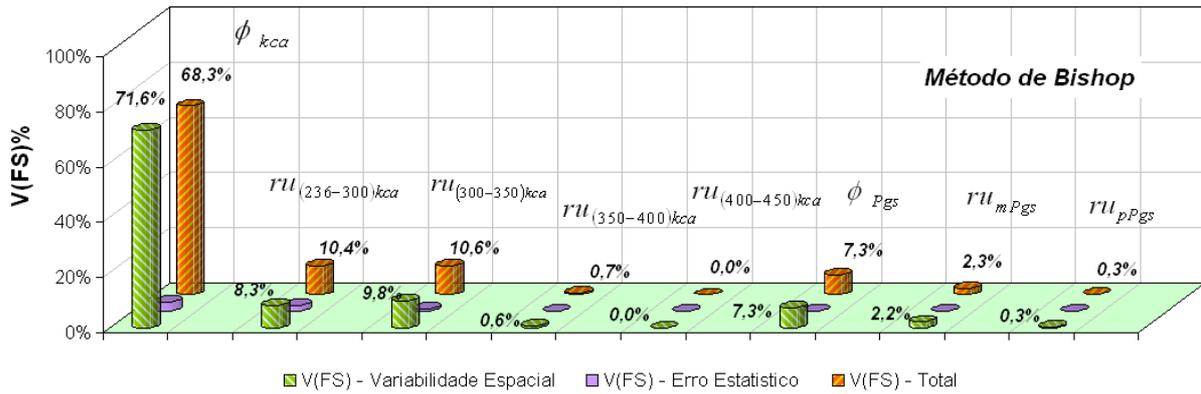


Figura 5.9 – Contribuição de cada variável na variância de FS.

Em geral, a contribuição da variância ou desvio padrão da variabilidade espacial é a que mais contribui na probabilidade de ruptura, pelo que seu cálculo deveria ser o mais exato possível.

Todas as análises feitas neste item foram realizadas na superfície crítica obtida deterministicamente. Como foi exposto no Capítulo 4, é razoável considerá-la como a mais desfavorável (Sandroni e Sayão 1992).

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

Como visto no Capítulo 3, as variâncias resultantes da dispersão dos dados (inerente variabilidade espacial) ao redor da tendência mostram uma correlação no espaço. Esta correlação não é infinita e depende da distância de autocorrelação e da escala de flutuações do material, devendo ser considerada na análise e não podendo ser desprezada.

Para considerar esta correção na componente da variância da inerente variabilidade espacial, foi utilizada a equação 3.27 (Capítulo 3), que é função da distância de autocorrelação e a extensão da superfície de deslizamento na camada de análise. Esta equação é multiplicada à componente da variância da variabilidade espacial de cada parâmetro em análise.

No caso do Método de Segundo Momento (FOSM) o fator de correção será multiplicado só à componente da variância da inerente variabilidade espacial, já que o método permite visualizar esta componente (equação 5.1).

$$V(FS) = \left(\frac{dFS}{dx} \right)^2 \sigma(x)^2 \times f \quad (5.1)$$

No Método de Estimativas Pontuais não se pode multiplicar o fator de correção só à inerente variabilidade espacial, devido a que o método não quantifica por separado esta parcela. No método, a variância ou desvio padrão do fator de segurança contém as duas parcelas (inerente variabilidade espacial, erro estatístico). Assim, o fator de correção é aplicado à variância do fator de segurança obtido (equação 5.2).

$$V(FS) = E[FS^2] - (E[FS])^2 \times f \quad (5.2)$$

A Figura 5.8 mostra que cerca de 70% da superfície de ruptura se encontram na camada Kca, pelo que só será utilizado o fator de correção (equação 3.27) nas variâncias resultantes das variáveis aleatórias deste material (σ_{Kca} , σ_{Kca}), enquanto as demais variáveis permanecem invariáveis (σ_{Pgs} , σ_{Pgs}).

Um dos aspectos mais importantes no uso do fator de correção (f) é a determinação da distância de autocorrelação, como foi exposto no Capítulo 3. Os solos na direção horizontal apresentam uma distância de autocorrelação média entre 20m até 50m e, na direção vertical, desde 1m até 6m.

A superfície de deslizamento que atravessa a camada Kca é em sua maioria horizontal. Assim, a análise é controlada pela variabilidade espacial das propriedades dos solos nesta direção. Ademais, considera-se que esta argila tem uma estrutura contínua (e não errática) nesta direção horizontal, podendo-se esperar distâncias de autocorrelação maiores.

Segundo El-Ramly (2001), uma distância de autocorrelação horizontal entre 28m e 38m é razoável neste caso, com uma média de 33m. Estes valores foram usados na análise.

Similar às análises feitas no item 5.7.1, a superfície de deslizamento determinística foi considerada como a mais crítica na análise.

As Figuras 5.10 a 5.12 mostram os diferentes cálculos feitos pelos métodos de Segundo Momento e Estimativas pontuais, considerando-se diferentes distâncias de autocorrelação e distribuições de probabilidade do fator de segurança.

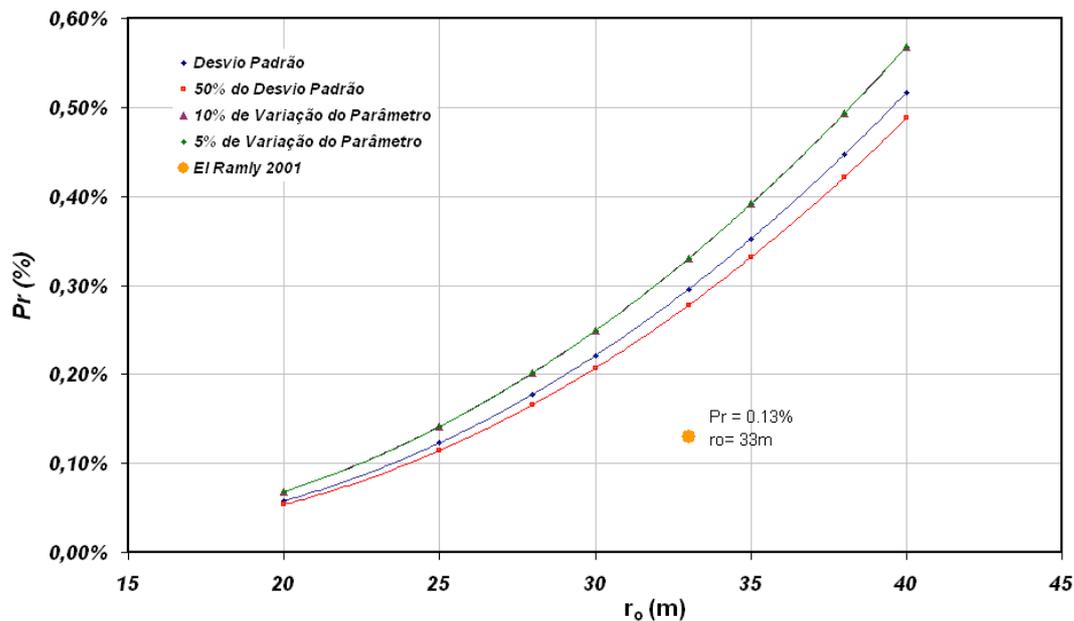


Figura 5.10 – Análise probabilística pelo método de segundo momento, com distribuição normal do fator de segurança.

El-Ramly (2001) e El-Ramly et al (2003a) reportaram uma probabilidade de ruptura (Pr) de 0,13%, numa distância de autocorrelação (r_o) de 33m. Eles fizeram uma análise de sensibilidade com respeito à distância de autocorrelação dentro do intervalo proposto (28m a 38m), encontrando uma variação da probabilidade de ruptura (Pr) entre 0,10% e 0,30%. Esta variação, do ponto de vista prático é bastante reduzida.

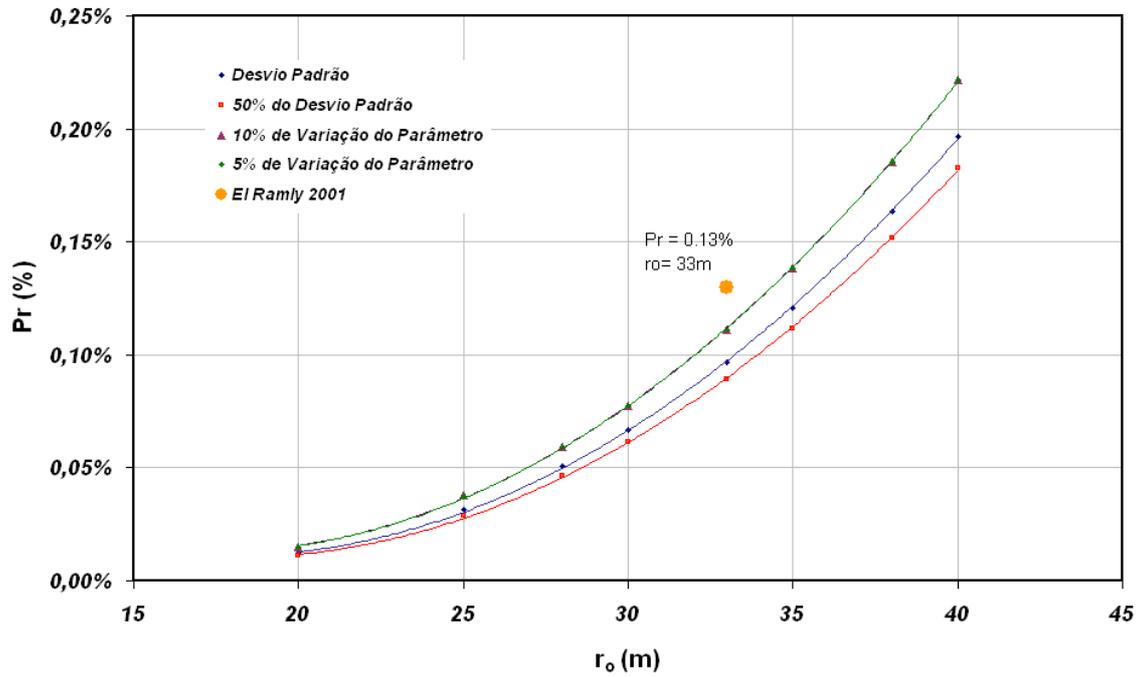


Figura 5.11 - Análise probabilística pelo método de segundo momento com distribuição log-normal do fator de segurança.

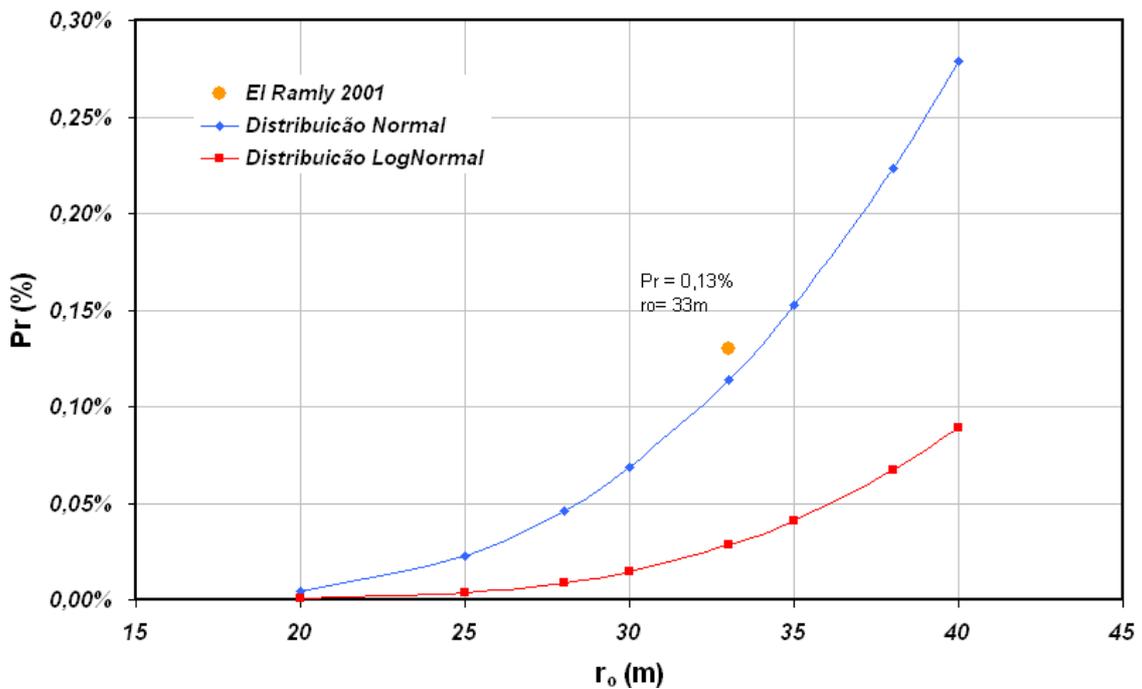


Figura 5.12 - Análise probabilística pelo método de estimativas pontuais, com distribuições normal e log-normal do fator de segurança.

Um resumo das Figuras 5.10 a 5.12, é mostrado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Probabilidades de ruptura encontradas com o método de Bishop.

Distância de Autocorrelação (r_0)	Segundo Momento (Pr)		Estimativas Pontuais (Pr)		El-Ramly
	Distribuição Normal	Distribuição Log-Normal	Distribuição Normal	Distribuição Log-Normal	
28 m	0,19%	0,05%	0,05%	0,01%	0,10%
33 m	0,30%	0,10%	0,11%	0,03%	0,13%
38 m	0,46%	0,17%	0,22%	0,07%	0,30%

As probabilidades de ruptura foram somente calculadas segundo o método de Bishop, já que este foi o único método utilizado por El-Ramly (2001) e El-Ramly et al (2003a). Como indicado no item 5.7.1, os diversos métodos de probabilidade não mostram muita diferença na magnitude de Pr, podendo-se, portanto, esperar resultados similares.

A análise feita pelo método de Segundo Momento com distribuição log-normal do fator de segurança teve resultado mais próximo aos obtidos por El-Ramly (2001) e El-Ramly et al (2003a). Assumindo uma distribuição normal os resultados de probabilidade de ruptura foram superiores, mas à favor da segurança. Em geral o método do Segundo Momento e o fator de correção mostrou-se aceitável.

No caso do método de Estimativas Pontuais, assumindo distribuição Normal do fator de segurança, os resultados foram muito próximos aos encontrados por El-Ramly (2001) e El-Ramly et al (2003a). Admitindo distribuição Log-Normal, os resultados foram muito baixos e, portanto, contra a segurança.

Em geral, os dois métodos mostraram-se aceitáveis. O principal aspecto refere-se ao tipo de distribuição do fator de segurança (Normal ou Log-Normal) a ser utilizado. Como exposto no Capítulo 4, a hipótese de uma distribuição Normal do fator de segurança corresponde a probabilidades de ruptura maiores que com distribuição Log-Normal. Isto foi verificado nestas análises que, portanto,

permitem a recomendação para o uso da distribuição Normal em análises probabilísticas de estabilidade de taludes.

A Tabela 5.10 mostra a comparação dos resultados de probabilidade de ruptura obtidos fazendo a correção da variância da variabilidade espacial, e a não correção de esta variância (item 5.7.1 e 5.7.2). Pode-se observar que a não redução da variância leva a uma superestimativa da probabilidade de ruptura.

Tabela 5.10 – 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)
Distribuição Normal	2,21%	0,12% - 0,34%

As contribuições de cada variável foram obtidas com o Método de Segundo Momento numa distância de autocorrelação $r_0 = 33m$ (Figura 5.13). Observa-se que a contribuição do ângulo de atrito do material kca é a mais importante.

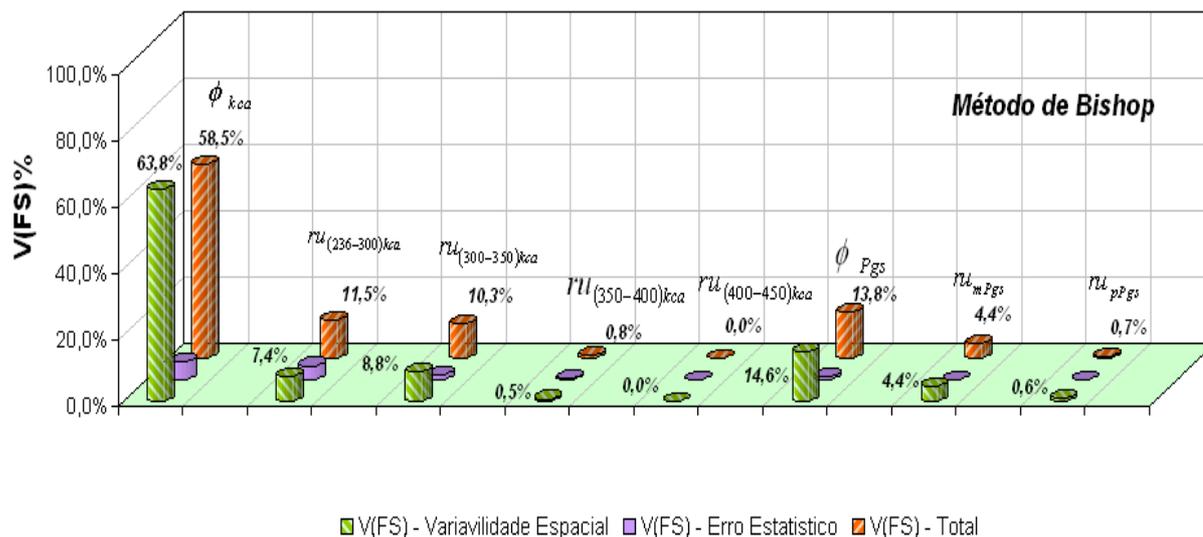


Figura 5.13 - Contribuição de cada variável na variância de FS, para uma distância de autocorrelação (r_0) de 33m.

5.8. Conclusões

Os métodos de Bishop e Morgenstern–Price (Função Seno) deram probabilidades de ruptura maiores do que Spencer, ou seja, a favor da segurança.

São usualmente considerados como aceitáveis fatores de segurança de 1,5 em condições estáticas. Neste caso foi aceito um fator de segurança de 1,31 (Bishop) já que este mostra uma probabilidade de ruptura baixa (0,12% - 0,34%), considerando redução da variância da variabilidade espacial. Aqui é grande a importância do uso de métodos probabilísticos.

Em geral, os métodos probabilísticos aproximados (Segundo Momento, Estimativas Pontuais) junto com o fator de correção (equação 3.27), mostraram-se aceitáveis, desde que se considere uma distribuição Normal do fator de segurança. Obtém-se, assim, probabilidades de ruptura maiores, ou seja, a favor da segurança.

A hipótese de um intervalo provável de distância de autocorrelação (r_0) mostra pouco efeito no valor final da probabilidade de ruptura nas distintas análises. É recomendável, porém, trabalhar com um intervalo de distâncias de autocorrelação, pois esta também é uma variável aleatória.

O efeito da não redução da variância da variabilidade espacial (Tabela 5.10) produz um incremento significativo da probabilidade de ruptura. Isto pode inviabilizar um projeto ou fazer uma interpretação inadequada da verdadeira performance da estrutura.