



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Joana Barbosa Rodrigues

ANÁLISE DE FIABILIDADE
DE TALUDES EM SOLOS

Carla Joana Barbosa Rodrigues · ANÁLISE DE FIABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS

UMinho | 2014

outubro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Joana Barbosa Rodrigues

ANÁLISE DE FIABILIDADE
DE TALUDES EM SOLOS

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil / Estruturas e Geotecnia

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor António Gomes Correia

e coorientação de
Doutora Engenheira Ana Teixeira

DECLARAÇÃO

Nome: Carla Joana Barbosa Rodrigues

Endereço eletrónico: carla_jbr@hotmail.com

Número do Bilhete de Identidade: 13622128

Título dissertação: Análise de Fiabilidade de Taludes em Solos

Ano de conclusão: 2014

Orientador: Professor Doutor António Gomes Correia

Coorientadora: Doutora Engenheira Ana Teixeira

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Área de Especialização: Estruturas e Geotecnia

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A
REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram para que fosse possível realizar este trabalho, particularmente:

- ao Professor António Gomes Correia e Engenheira Ana Teixeira, com os quais tive a honra e o prazer de desenvolver este projeto. Agradeço especialmente pelo acompanhamento, dedicação e compreensão prestados;
- ao Professor Tiago Miranda pelo fornecimento do programa TOCHNOG e ao Engenheiro Manuel Parente pela ajuda prestada na aprendizagem do programa TOCHNOG;
- aos meus pais, irmão e familiares, pela dedicação ao longo destes anos bem como o enorme apoio durante esta jornada.
- aos meus amigos por todo o incentivo, paciência e disponibilidade.

RESUMO

O presente trabalho foca-se na análise de fiabilidade de taludes em solos naturais, começando por descrever os fatores e as causas que lhe são inerentes e os métodos disponíveis para proceder com este tipo de análise.

Os métodos determinísticos e probabilísticos são descritos e comparados, nesta dissertação, com recurso a casos de estudo. Na abordagem determinística são discutidos os métodos de equilíbrio limite, de elementos finitos e análise limite. Quanto à abordagem probabilista são tratados o método de primeira ordem segundo momento, método de fiabilidade de primeira ordem e o método de simulação de Monte Carlo.

Dois casos de estudo de taludes são apresentados, com o intuito de perceber qual a influência de considerar a incerteza e variabilidade dos parâmetros na avaliação da segurança do talude. O primeiro diz respeito a um talude infinito, em condições drenadas, no qual são utilizados, para esta análise, o método do talude infinito, o método de simulações de Monte Carlo e o método estocástico com recurso ao programa TOCHNOG. Verifica-se, com os três métodos, que o talude se encontra estável e o parâmetro mais influente na sua segurança é o ângulo de atrito. No entanto, quando se introduz o nível freático no talude, este passa de um estado seguro para um estado de rotura iminente.

Posteriormente, o segundo caso apresenta a análise de segurança de um talude finito, recorrendo ao método determinístico e ao programa TOCHNOG. Trata-se de um caso de rotura documentado na bibliografia.

Nos dois casos estudados, constatou-se que os fatores de segurança determinados pelos métodos estocásticos diferem do fator de segurança obtido pelo método determinístico. O comprimento de correlação tem uma influência determinante em cada um dos casos estudados devendo a sua compreensão ser objeto de estudos futuros.

O objetivo principal deste trabalho é portanto compreender o quão relevante é fazer uma análise probabilística, tendo em conta os parâmetros geotécnicos como estocásticos, de modo a ser possível obter resultados mais consistentes do que realizando somente análises determinísticas.

ABSTRACT

This work focuses on reliability analysis of slopes on natural soils, starting by describing its inherent factors and causes and the available methods to proceed with this kind of analysis.

The deterministic and probabilistic methods are described and compared, in this dissertation, resorting to case studies. In the deterministic approach the limit equilibrium, finite element and limit analysis methods are discussed. Concerning the probabilistic approach the first order second moment method, first order reliability method and the Monte Carlo simulation method are addressed.

Two case studies of slopes are presented, with the intention of understand the influence of considering the uncertainty and variability of the parameters on the slope safety evaluation. The first concerns an infinite slope, in drained conditions, in which are used, for this analysis, the infinite slope method, the Monte Carlo simulation method and the stochastic method resorting to the TOCHNOG software. It is verified, with the three methods, that the slope is stable and the most influential parameter on its safety is the friction angle. However, when the groundwater level is introduced in the slope, it passes from a safe state to a state of imminent failure.

Subsequently, the second case presents the safety analysis of a finite slope, resorting to the deterministic method and the TOCHNOG software. This is a very well documented slope failure in the bibliography.

In the two case studies, it was observed that the safety factors assessed by the stochastic methods differ from the safety factor obtained by the deterministic method. The correlation length has a major influence in both cases and should be further investigated in future works.

The main objective of this work is therefore understand how relevant is to make a probabilistic analysis, taking into account the geotechnical parameters as stochastic, in order to be possible to obtain more consistent results than just performing a deterministic analysis.

LISTA DE ABREVIATURAS

Alfabeto Latino

AF	Análise de Fiabilidade
AFOSM	Método Avançado de Primeira Ordem Segundo Momento
c'	Coesão Efetiva do Solo
c_u	Coesão Não Drenada do Solo
Cov	Coefficiente de Variação (DP / media)
DP	Desvio Padrão
E	Ações ou Efeito das Ações
EC	Eurocódigo
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estados Limites Últimos
Fa	Forças Atuantes
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FORM	Método de Fiabilidade de Primeira Ordem
FOSM	Método de Primeira Ordem Segundo Momento
Fr	Forças Resistentes
FS	Fator de Segurança
$g()$	Função de Desempenho
GLE	Equilíbrio Limite Geral
H	Altura do Talude
Ma	Momentos das Forças Atuantes
MC	Monte Carlo
MEF	Método dos Elementos Finitos
Mr	Momento das Forças Resistente
MVFOSM	Método do Valor Médio de Primeira Ordem Segundos Momentos
pf	Probabilidade de Rotura
R	Resistência
VA	Variáveis Aleatórias
Var	Variância
x	Variável aleatória

Alfabeto Grego

α	Ângulo de Inclinação do Talude
β	Índice de Fiabilidade
γ	Peso Volúmico do Solo
μ	Média
σ	Desvio Padrão
τ_a	Resistência Mobilizada (atuante)
τ_r	Resistência Mobilizável (resistente)
ϕ'	Ângulo de Atrito Efetivo do Solo
Φ	Função Cumulante da Distribuição Normal Reduzida
ψ	Ângulo de Dilatância
ν	Coefficiente de Poisson

ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
ÍNDICE DE TEXTO	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO.....	3
1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.4.1. TABELA DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.4.2. NÍVEIS DE ANÁLISES DE FIABILIDADE.....	10
CAPÍTULO 2	13
ESTABILIDADE DE TALUDES	13
2.1. FATORES CONDICIONANTES NA ESTABILIDADE DE TALUDES	14
2.2. TIPOS DE INSTABILIZAÇÃO EM TALUDES	15
2.3. CAUSAS DA INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES	18
2.4. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA.....	18
CAPÍTULO 3	25
MÉTODOS DETERMINÍSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES	25
3.1. MÉTODOS DETERMINÍSTICOS	25
3.1.1. MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE	26
3.1.2. MÉTODO DA ANÁLISE LIMITE	30
3.1.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	31
3.2. PROGRAMAS DE CÁLCULO	33
3.2.1. EQUILÍBRIO LIMITE.....	33
3.2.2. MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	34
3.2.3. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	35
CAPÍTULO 4	37
MÉTODOS PROBABILÍSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES	37
4.1. INCERTEZAS	37
4.1.1. FONTES DE INCERTEZA.....	38
4.1.2. CLASSIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS	38
4.1.3. VARIÁVEIS ALEATÓRIAS EM GEOTECNIA.....	39

4.1.4.	FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO.....	39
4.1.5.	TEOREMA DE BAYES	43
4.1.6.	VARIABILIDADE ESPACIAL DOS PARÂMETROS DO SOLO	44
4.1.7.	VALORES DE REFERÊNCIA DAS INCERTEZAS DO SOLO	46
4.2.	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS	48
4.2.1.	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS APROXIMADOS	51
4.2.2.	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS EXATOS.....	53
CAPÍTULO 5.....		55
ANÁLISE DE FIABILIDADE APLICADA A UM TALUDE INFINITO.....		55
5.1.	INTRODUÇÃO	55
5.2.	MÉTODO DETERMINÍSTICO	56
5.3.	MÉTODO DE MONTE CARLO.....	57
5.4.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	59
5.5.	CAMPOS ESTOCÁSTICOS	64
5.5.1.	ESTUDO PARAMÉTRICO: INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE CORRELAÇÃO.....	74
CAPÍTULO 6.....		79
ANÁLISE DE FIABILIDADE APLICADA A UM TALUDE FINITO		79
6.1.	INTRODUÇÃO	79
6.2.	DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	79
6.3.	RESULTADOS.....	83
6.4.	ESTUDO PARAMÉTRICO: INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE CORRELAÇÃO	87
CAPÍTULO 7.....		91
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....		91
BIBLIOGRAFIA.....		95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Deslizamento de um talude (à esquerda) e posterior estabilização (à direita) (adaptado de GersCovich, 2009)	13
Figura 2.2 – Rotura de talude da Mina de Bingham Canyon, Kennecott Utah (USA) (adaptado de Caldwell, 2013)	15
Figura 2.3 - Classificação dos movimentos de um talude (adaptado de Varnes, 1978)	17
Figura 2.4 - Resistência mobilizável e resistência mobilizada (adaptado de Silva, 2011)	21
Figura 3.1 – Talude infinito (adaptado de Gomes Correia et al., 1996)	27
Figura 3.2 - Forças atuantes no Método das Fatias em superfície de rotura circular e não circular de taludes finitos (adaptado de Fredlund et al., 1981).....	29
Figura 3.3 - Análise de estabilidade de talude aplicando o método dos elementos finitos	31
Figura 4.1 – Exemplo de uma distribuição Normal, à esquerda, e uma distribuição Lognormal, à direita (adaptado de Baecher & Christian, 2003).....	41
Figura 4.2 - Curvas de frequência de distribuição Normal e Lognormal (adaptado de Teixeira, 2012).....	42
Figura 4.3 – Exemplo de um histograma (adaptado de Afonso, 2012)	42
Figura 4.4 - Probabilidade de rotura vs Índice de fiabilidade para uma distribuição normal (adaptado de Christian et al., 1994)	49
Figura 4.5 - Função densidade de probabilidade para Resistências (R) e Ações / Efeitos (E) (adaptado de Teixeira, 2012)	50
Figura 4.6 - Função densidade de probabilidade e probabilidade de rotura (adaptado de Christian et al., 1994)	50
Figura 4.7 - Transformação da função de estado limite no espaço das variáveis normais reduzidas	52
Figura 5.1 – Geometria dos taludes para a altura de 10m e 5m.....	56
Figura 5.2 – Curvas de Gauss do FS	59
Figura 5.3 – Função densidade cumulativa do FS	59
Figura 5.4 - Variância do FS	61
Figura 5.5 – Probabilidade de rotura para as análises de sensibilidade e análise inicial	63
Figura 5.6 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 1ª análise.....	64
Figura 5.7 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 2ª análise.....	64
Figura 5.8 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 3ª análise.....	64
Figura 5.9 – Estudo paramétrico para o comprimento do talude.....	66

Figura 5.10 – Malha de elementos finitos adotada	67
Figura 5.11 – Condições de fronteira	67
Figura 5.12 – Deformação da malha e respetivos vetores velocidade associados ao movimento da massa instável do talude.....	68
Figura 5.13 – Campos estocásticos da média das 100 análises	69
Figura 5.14 – Evolução do FS com o número de cálculos	70
Figura 5.15 – Campos estocásticos obtidos para 1 cálculo e para 40 cálculos	72
Figura 5.16 – Análise de duas fatias do talude	73
Figura 5.17 – Campos estocásticos do talude com nível freático	74
Figura 5.18 – Campos estocásticos gerados para os diferentes comprimentos de correlação	77
Figura 6.1 – Geometria do talude em estudo (Suchomel & Mašín, 2009)	80
Figura 6.2 – Distribuição das cargas de pressão no talude (adaptado de El-Ramly, 2006)	81
Figura 6.3 – Distribuição estatística de c e ϕ (adaptado de Suchomel & Mašín, 2009).....	81
Figura 6.4 – Malha de elementos finitos utilizada.....	83
Figura 6.5 – Condições de fronteira admitidas para o talude	83
Figura 6.6 – Vetores velocidade associados ao movimento da massa instável	84
Figura 6.7 – Exemplos de campos estocásticos.....	84
Figura 6.8 – Método de Fellenius – forças aplicadas a uma fatia de solo (adaptado de Gomes Correia et al., 1996)	85
Figura 6.9 – Superfície de rotura do talude	85
Figura 6.10 – Campos estocásticos e superfície de rotura do cálculo 2 e 79	86
Figura 6.11 - Campos estocásticos gerados para os diferentes comprimentos de correlação	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Organização da dissertação “Análise da fiabilidade de taludes em solo”.....	4
Tabela 1.2 – Revisão Bibliográfica	5
Tabela 1.3 - Níveis de fiabilidade (adaptado de Teixeira et al., 2012)	11
Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos de um talude (adaptado de Varnes, 1978)	16
Tabela 2.2 – Recomendação para FS admissíveis em termos de risco de perdas económicas e de perda de vidas humanas para novos taludes (adaptado de GEO, 1984).....	22
Tabela 2.3 - Recomendação para FS admissíveis em termos de risco de perda de vidas humanas para taludes já existentes (adaptado de GEO, 1984)	23
Tabela 3.1– Expressões analíticas do FS de taludes infinitos em condições drenadas e não drenadas	28
Tabela 3.2 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite	29
Tabela 4.1 – Resumo do Comprimento de Correlação de algumas propriedades geotécnicas (adaptado de Phoon & Kulhawy, 1999).....	45
Tabela 4.2 - Valores típicos para o Cov (adaptado de Lacasse & Nadim, 1996)	47
Tabela 4.3 - Valores típicos para o Cov e FDP (adaptado de Lacasse & Nadim, 1996)	48
Tabela 4.4 - Valores recomendados pelo Eurocódigo 0 (CEN, 2002a) para o índice de fiabilidade, considerando um tempo de vida útil de 50 anos.....	49
Tabela 5.1 - Parâmetros avaliados e respetiva média, desvio padrão e coeficiente de variação (adaptado de Johari & Javadi, 2012).	56
Tabela 5.2 – Resultados obtidos para a pf e β do talude de 10m e 5m	58
Tabela 5.3 – Valores médios dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade	60
Tabela 5.4 – Fatores de Segurança obtidos na análise de sensibilidade	60
Tabela 5.5 – Variância do Fator de Segurança para os taludes de 10m e 5m.....	61
Tabela 5.6 – Resultados obtidos para a pf e β na análise de sensibilidade	62
Tabela 5.7 – Parâmetros do solo de valor constante.....	66
Tabela 5.8 – Valor dos comprimentos de correlação usados.....	75
Tabela 5.9 – FS obtido no método determinístico e no método estocástico para diferentes comprimentos de correlação	75
Tabela 6.1 – FS determinados por diferentes autores para a rotura do talude em Lodalén, Noruega.....	80
Tabela 6.2 – Parâmetros avaliados e respetiva média, desvio padrão e coeficiente de variação (adaptado de Suchomel & Mašín, 2009).....	82

Tabela 6.3 – Parâmetros do solo de valor constante	82
Tabela 6.4 – Comprimentos de correlação adotados	87
Tabela 6.5 - FS obtido no método determinístico e no método estocástico para diferentes comprimentos de correlação	88

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A estabilidade de taludes é uma das grandes preocupações da engenharia geotécnica devido às consequências desastrosas para as populações em caso de rotura. Considera-se um talude quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de solo, de rocha ou ambos, podendo estes ser naturais (como por exemplo encostas) ou artificiais (como são exemplo os taludes de aterro e escavação).

A fiabilidade de taludes é um tema bastante complexo, visto envolver grandes massas de terra que têm a si associadas uma grande heterogeneidade e uma longa história de tensões que influenciam e condicionam o seu comportamento.

Devido à importância dos taludes em obras geotécnicas, é necessário aprofundar o estudo em torno de um método o mais eficaz possível, de forma a determinar as condições de projeto que garantam a sua segurança; pois, apesar dos progressos realizados na compreensão desta temática, mesmo sob condições de projeto favoráveis, continuam a dar-se roturas tanto em taludes artificiais como naturais, levando a perdas de vidas e bens materiais.

Com a busca incessante de respostas eficazes e económicas, vários investigadores têm dedicado tempo e esforço a esta questão. Atualmente os métodos utilizados para a análise de fiabilidade (AF) de taludes podem ser determinísticos, semi-probabilísticos ou probabilísticos. A grande diferença entre estes métodos deve-se ao facto de na abordagem probabilística serem explicitamente consideradas as incertezas envolvidas.

Como resultado, a análise probabilística fornece informação sobre os parâmetros que influenciam significativamente o problema. Para determinar esses parâmetros pode recorrer-se a uma análise de sensibilidade que consiste numa série de cálculos onde cada parâmetro significativo é variado sistematicamente dentro de um intervalo possível, com o objetivo de determinar a sua influência no comportamento do talude.

Ao contrário do que acontece em engenharia estrutural, em que as filosofias de segurança utilizadas já seguem uma base probabilística, a verificação da segurança em geotécnica utilizada desenrola-se tradicionalmente num quadro normativo estabelecido pelos Eurocódigos, nomeadamente os Eurocódigos 0, 1, 7 e 8 (CEN, 2002a, 2002b, 2004, 2007).

Nestes, as metodologias de cálculo consideram as fontes de incerteza através de elevados coeficientes de segurança, globais ou parciais, na maioria com base empírica, que afetam os efeitos das ações, as propriedades dos materiais e as grandezas geométricas.

No entanto, estas abordagens não apresentam uma base racional para compreender a influência das incertezas e variabilidade no dimensionamento, o que é indispensável para uma boa análise da segurança das obras geotécnicas. Por este motivo os engenheiros devem melhorar a sua capacidade de tratar as incertezas e gerir probabilidades de forma a ser possível controlar melhor o comportamento da estrutura e determinar as potenciais causas de efeitos adversos sobre a mesma, minimizando e controlando os riscos a um nível aceitável o mais economicamente possível.

Neste contexto, pretende-se desenvolver um estudo que permita contribuir para o desenvolvimento, ou melhoramento, de modelos de verificação da segurança de taludes usando análises de fiabilidade.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação foca-se na AF de taludes em solos, usando métodos determinísticos, probabilísticos e estocásticos, tendo como meta principal expor a importância da contribuição da abordagem probabilística e estocástica nas obras geotécnicas, nomeadamente em taludes finitos e infinitos, alinhada com a filosofia do Eurocódigo (EC), de forma a este tipo de análise passar a ter uma maior aplicação na prática em projetos de estabilidade de taludes.

Pretende-se, nesta dissertação, em primeiro lugar, mencionar alguns fatores e causas que provocam instabilidade, bem como os critérios de segurança e algumas técnicas de estabilização de taludes. De seguida abordam-se os métodos disponíveis para avaliação da segurança e AF de taludes, descrevendo as metodologias de estudo e o intuito de cada uma delas.

Na análise determinística é abordado o método de equilíbrio limite, o método de elementos finitos e o método de análise limite. Quanto à análise probabilística é apresentado o método de primeira ordem segundo momento (FOSM), método de fiabilidade de primeira ordem (FORM) e o método de simulação de Monte Carlo (MC).

A abordagem probabilística tem em conta as várias incertezas envolvidas na análise da estabilidade de taludes, considerando importantes parâmetros como variáveis aleatórias, cada um com uma determinada distribuição de probabilidade, média e desvio padrão. Esta análise

fornece indicadores de desempenho como a probabilidade de rotura (pf) e o índice de fiabilidade (β).

De modo a analisar a influência da variabilidade dos parâmetros no comportamento do maciço, recorre-se à teoria dos campos aleatórios e à caracterização estatística dos parâmetros geotécnicos. Para tal, o programa TOCHNOG que emprega a técnica dos campos estocásticos para a sua modelação numérica foi utilizado.

Com o intuito de exibir a importância de análises probabilísticas e estocásticas, é feita a comparação destes com os métodos determinísticos na análise de dois casos de estudo de taludes. Inicialmente é analisado um talude infinito, em condições drenadas, de forma a perceber qual a influência da incerteza e variabilidade dos parâmetros geotécnicos e da geometria na sua segurança. Nesta análise são utilizados o método do talude infinito, método de simulações de MC e o programa TOCHNOG.

No segundo caso é estudada a segurança de um talude finito, recorrendo à modelação dos campos estocásticos através do programa TOCHNOG, de modo a verificar a importância da consideração da incerteza e variabilidade dos parâmetros no comportamento de taludes.

Assim sendo, pretende-se demonstrar que os resultados obtidos por métodos probabilísticos e estocásticos podem ser mais próximos da realidade do que os das análises determinísticas, sendo por isso, recomendado o uso conjunto destas análises.

1.3. ORGANIZAÇÃO

Sendo o objetivo principal desta dissertação o de criar um documento que mostre a importância e contribuição de uma abordagem probabilística e estocástica nas obras geotécnicas, nomeadamente em taludes finitos e infinitos e também de fornecer apoio para as aplicações práticas no projeto de estabilidade de taludes, esta dissertação foi dividida em sete capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução. Todos os capítulos estão esquematizados na Tabela 1.1, que inclui uma breve descrição de cada um.

Tabela 1.1 - Organização da dissertação “Análise da fiabilidade de taludes em solo”

<p>Capítulo 1: Introdução Engloba a motivação, objetivos e organização desta dissertação. No final apresenta-se uma revisão bibliográfica, realizada no sentido de identificar quais os métodos de cálculo existentes para a avaliação da segurança de taludes, apresentados nos Capítulos 3 e 4, e as variáveis mais influentes no seu comportamento.</p>	
<p>Capítulo 2: Avaliação da estabilidade de taludes Numa primeira fase deste trabalho, apresentam-se algumas considerações gerais sobre taludes. Abordam-se diversos temas tais como os fatores que mais influenciam a estabilidade de um talude, os tipos e causas que levam à sua instabilização, bem como os critérios de segurança e algumas das técnicas utilizadas para a sua estabilização.</p>	
<p>Capítulo 3: Métodos determinísticos na análise de estabilidade de taludes Os métodos determinísticos para a avaliação da segurança de taludes são apresentados neste capítulo, descrevendo as suas metodologias e o campo de aplicação de cada uma delas. Contemplam-se os métodos determinísticos de equilíbrio limite para taludes infinitos e finitos, o método de análise limite e o método de elementos finitos. Posteriormente são descritos, de forma sucinta, alguns programas de cálculo para a realização de análises de estabilidade de taludes.</p>	
<p>Capítulo 4: Métodos probabilísticos na análise de estabilidade de taludes Apresenta-se uma visão geral sobre a temática da incerteza, definindo a sua origem e as consequências no comportamento dos taludes, sendo neste considerado o tema da variabilidade espacial dos parâmetros do solo. Seguidamente abordam-se os métodos probabilísticos, definindo os seus modos de implementação, bem como as suas vantagens e desvantagens. Os métodos descritos são o FOSM, FORM e simulações de MC.</p>	
Exemplos de aplicação	
<p>Capítulo 5: Análise de fiabilidade aplicada a um talude infinito É apresentada a avaliação da segurança de um talude infinito perante condições drenadas, considerando as incertezas e variabilidade associadas às suas propriedades geotécnicas e à sua geometria. A análise e comparação dos resultados são feitas recorrendo ao método do talude infinito, ao método de simulações de MC e ao programa TOCHNOG.</p>	<p>Capítulo 6: Análise de fiabilidade aplicada a um talude finito É apresentada a segurança de um talude finito, recorrendo à modelação dos campos estocásticos através do programa TOCHNOG, de modo a verificar a importância de considerar as incertezas e variabilidade dos parâmetros no comportamento de taludes</p>
<p>Capítulo 7: Conclusões e Trabalhos Futuros Finalizada a presente dissertação apresentam-se as conclusões relevantes, os resultados obtidos e ainda recomendações para futuras pesquisas nesta área.</p>	

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As AF de taludes em solos tiveram uma notória evolução ao longo dos tempos. De maneira a conhecer a forma como este assunto foi abordado e analisado em estudos anteriores e saber quais são as variáveis do problema em questão realizou-se uma avaliação do estado

atual de conhecimento sobre as técnicas da segurança (fiabilidade) de taludes infinitos e finitos.

1.4.1. Tabela de Revisão Bibliográfica

Uma pesquisa aprofundada foi realizada no sentido de identificar os diversos métodos de cálculo existentes para avaliação da segurança de taludes e as incertezas associadas. De seguida, apresenta-se uma tabela de revisão bibliográfica, onde constam os artigos utilizados ao longo desta dissertação. Os artigos apresentam-se divididos por temas e datados do mais recente para o mais antigo (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Revisão Bibliográfica

Autor	Ano	Título
Fator de Segurança		
Johari, A. Javadi, A.A.	2012	Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method <i>Avaliação da fiabilidade de taludes infinitos usando o método da distribuição de probabilidades conjunta de variáveis aleatórias</i>
Schweckendiek, T. Calle, E.O.F.	2010	A factor of safety for geotechnical characterization <i>Um fator de segurança para a caracterização geotécnica</i>
Duncan, J.M.	2000	Factors of safety and reliability in geotechnical engineering <i>Fatores de segurança e fiabilidade em engenharia geotécnica</i>
Método de Equilíbrio Limite		
Griffiths, D.V. Huang, Jinsong Fenton, Gordon A.	2011	Probabilistic infinite slope analysis <i>Análise probabilística da estabilidade taludes infinitos</i>
Bolton, Hermanus Heymann, Gerhard Groenwold, Albert	2003	Global search for critical failure surface in slope stability analysis <i>Pesquisa da superfície crítica global de deslizamento na avaliação da estabilidade de taludes</i>
Cala, M. Flisiak, J.	2001	Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods <i>Avaliação da estabilidade de taludes com FLAC e métodos de equilíbrio limite</i>
Yu, H.S. Salgado, R. Sloan, S.W. Kim, J.M.	1998	Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability <i>Comparação entre análise limite e equilíbrio limite na avaliação de estabilidade de taludes</i>
Fredlund, D.G. Krahn, J. Pufahl, D.E.	1981	The relationship between limit equilibrium slope stability methods <i>Relação entre os métodos de equilíbrio limite de taludes</i>

Autor	Ano	Título
Law, K.T. Lumb, P.	1978	A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes <i>Análise de equilíbrio limite de uma rotura progressiva da estabilidade de taludes</i>
Fredlund, D.G. Krahn, J.	1977	Comparison of Slope Stability Methods of Analysis <i>Comparação de métodos de análise de estabilidade de taludes</i>
Análise Limite		
Yu, H.S. Salgado, R. Sloan, S.W. Kim, J.M.	1998	Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability <i>Comparação entre análise limite e equilíbrio limite na avaliação de estabilidade de taludes</i>
Drucker, D.C. Prager, W.	1952	Soil mechanics and plastic analysis or limit design <i>Mecânica dos solos e análises de plasticidade ou dimensionamento limite</i>
Métodos dos Elementos Finitos		
Schweiger, H.F. Peschl, G.M.	2005	Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method <i>Análises de fiabilidade em geotecnia usando o método de elementos finitos e variáveis aleatórias</i>
Zheng, H. Liu, D.F. Li, C.G.	2005	Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method <i>Estabilidade de taludes com recurso ao método elasto-plástico de elementos finitos</i>
Griffiths, D.V. Fenton, Gordon A.	2004	Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements <i>Análise probabilística de estabilidade de taludes com elementos finitos</i>
Pham, H.T.V. Fredlund, D.G.	2003	The application of dynamic programming to slope stability analysis <i>A aplicação de programação dinâmica na análise de estabilidade de taludes</i>
El-Ramly, H. Morgenstern, N.R. Cruden, D.M.	2002	Probabilistic slope stability analysis for practice <i>Análise probabilística da estabilidade de taludes na prática</i>
Pham, H.T.V. Fredlund, D.G. Jr, G. Gitirana	2001	Slope stability analysis using dynamic programming combined with finite element stress analysis <i>Análises de estabilidade de taludes usando programação dinâmica em combinação com o método de elementos finitos</i>
Cala, M. Flisiak, J.	2001	Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods <i>Avaliação da estabilidade de taludes com FLAC e métodos de equilíbrio limite</i>
Griffiths, D.V. Lane, P.A.	1999	Slope stability analysis by finite elements <i>Estabilidade de taludes com recurso a elementos finitos</i>

Autor	Ano	Título
Christian, J.T. Ladd, C.C. Baecher, G.B.	1994	Reliability applied to slope stability analysis <i>Fiabilidade aplicada a análise de estabilidade de taludes</i>
Naylor, D.J.	1982	Finite elements and slope stability <i>Método dos elementos finitos e estabilidade de taludes</i>
Incertezas		
Papaoannou, Iason Straub, Daniel	2012	Reliability updating in geotechnical engineering including spatial variability of soil <i>Atualização da fiabilidade em engenharia geotécnica incluindo variabilidade espacial do solo</i>
Li, DianQing Tang, XiaoSong Zhou, ChuangBing Phoon, Kok-Kwang Teixeira, Ana	2012	Uncertainty analysis of correlated non-normal geotechnical parameters using Gaussian copula <i>Análise de incertezas não-normais e correlacionadas de parâmetros geotécnicos recorrendo ao uso de cópula gaussiana</i>
Gomes Correia, A. Henriques, A.A. Honjo, Y.	2012	Dimensionamento e avaliação da segurança de uma estaca com carga vertical baseado em análises de fiabilidade
Griffiths, D.V. Huang, Jinsong Fenton, Gordon A.	2011	Probabilistic infinite slope analysis <i>Análise probabilística da estabilidade taludes infinitos</i>
Wang, Yu Cao, Zijun Au, Siu-Kui	2010	Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic Slope stability analysis <i>Método de simulação de Monte Carlo eficiente na avaliação da sensibilidade dos parâmetros considerados numa análise probabilística da estabilidade de taludes</i>
Suchomel, R. Mašín, D.	2009	Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c-u soil <i>Comparação de diferentes métodos probabilísticos na previsão da estabilidade de um talude caracterizado com c-u do solo variando espacialmente</i>
Cho, Sung Eun	2007	Effects of spatial variability of soil properties on slope stability <i>Efeitos da variabilidade espacial das propriedades do solo na estabilidade de taludes</i>
Low, B.K. Lacasse, S. Nadim, F.	2007	Slope reliability analysis accounting for spatial variation <i>Análise de fiabilidade de taludes tendo em conta a variabilidade espacial</i>
Šejnoha, Michal Šejnoha, Jiří Kalousková, Marie Zeman, Jan	2007	Stochastic analysis of failure of earth structures <i>Análise estocástica do modo de rotura de estruturas em terra</i>
Babu, G. Sivakumar Mukesh, M.D.	2004	Effect of soil variability on reliability of soil slopes <i>Efeitos da variabilidade do solo na fiabilidade de taludes</i>
Baecher, Gregory B. Christian, John T.	2003	Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering <i>Fiabilidade e estatística em engenharia geotécnica</i>

Autor	Ano	Título
El-Ramly, H. Morgenstern, N.R. Cruden, D.M.	2002	Probabilistic slope stability analysis for practice <i>Análise probabilística da estabilidade de taludes na prática</i>
Liang, R.Y. Nusier, O.K. Malkawi, A.H	1999	A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams <i>Uma abordagem baseada na fiabilidade para a avaliação da estabilidade de taludes em barragens de terra</i>
Phoon, Kok-Kwang Kulhawy, Fred H	1999	Characterization of geotechnical variability <i>Caracterização da variabilidade geotécnica</i>
Lacasse, S. Nadim, F.	1998	Risk and reliability in geotechnical engineering <i>Risco e fiabilidade em engenharia geotécnica</i>
Beck, J.L. Katafygiotis, J.L.	1998	Updating Models and Their Uncertainties. I: Bayesian Statistical Framework <i>Atualização de modelos e suas incertezas: I: enquadramento bayesiano estatístico</i>
Lacasse, S. Nadim, F.	1996	Uncertainties in characterising soil properties, Proceedings of uncertainty <i>Incertezas na caracterização de solos, procedimentos de incerteza</i>
Der Kiureghian, A.	1989	Measures of structural safety under imperfect states of knowledge <i>Medidas de segurança de estruturas sub estados de conhecimento imperfeito</i>
Análises de fiabilidade		
Teixeira, Ana Gomes Correia, A. Henriques, A.A. Honjo, Y.	2012	Dimensionamento e avaliação da segurança de uma estaca com carga vertical baseado em análises de fiabilidade
Johari, A. Javadi, A.A.	2012	Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method <i>Avaliação da fiabilidade de taludes infinitos usando o método da distribuição de probabilidades conjunta de variáveis aleatórias</i>
Griffiths, D.V. Huang, Jinsong Fenton, Gordon A.	2011	Probabilistic infinite slope analysis <i>Análise probabilística da estabilidade taludes infinitos</i>
Abbaszadeh, Mohsen Shahriar, Kourosch Sharifzadeh, Mostafa Heydari, Mehrdad	2011	Uncertainty and Reliability Analysis Applied to Slope Stability: A Case Study From Sungun Copper Mine <i>Análise de incertezas e fiabilidade aplicada a estabilidade de taludes: caso de estudo Sungun Copper Mine</i>
Wang, Yu Cao, Zijun Au, Siu-Kui	2010	Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic Slope stability analysis <i>Método de simulação de Monte Carlo eficiente na avaliação da sensibilidade dos parâmetros considerados numa análise probabilística da estabilidade de taludes</i>

Autor	Ano	Título
Huang, Jinsong Griffiths, D.V. Fenton, Gordon A.	2010	System Reliability of slopes by RFEM <i>Fiabilidade do sistema na análise de taludes com RFEM</i>
Honjo, Y. Hara, T. Le, T.C. Kieu Griffiths, D.V. Huang, Jinsong Fenton, Gordon A.	2010	Level III Reliability Based Design of Examples set by ETC10 <i>Dimensionamento baseado em análises de fiabilidade nível III dos exemplos definidos pelo ETC10</i>
Suchomel, R. Mašín, D.	2009	Comparison of Slope Reliability Methods of Analysis <i>Comparação entre métodos de análises de fiabilidade de taludes</i>
Wu, Tien H.	2009	Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c-u soil <i>Comparação de diferentes métodos probabilísticos na previsão da estabilidade de um talude caracterizado com c-u do solo variando espacialmente</i>
Griffiths, D.V. Huang, Jinsong Fenton, Gordon A.	2008	Reliability of geotechnical predictions <i>Fiabilidade de previsões geotécnicas</i>
Cho, Sung Eun	2007	Probabilistic Stability Analysis of Shallow Landslides using Random Fields <i>Análise probabilística da estabilidade de pequenos movimentos de terras com recurso ao uso de campos aleatórios</i>
Low, B.K. Lacasse, S. Nadim, F. Šejnoha, Michal Šejnoha, Jiří Kalousková, Marie Zeman, Jan Fenton, Gordon A. Griffiths, D.V.	2007	Effects of spatial variability of soil properties on slope stability <i>Efeitos da variabilidade espacial das propriedades do solo na estabilidade de taludes</i>
Babu, G. Sivakumar Mukesh, M.D. El-Ramly, H. Morgenstern, N.R. Cruden, D.M. Christian, J.T. Ladd, C.C. Baecher, G.B.	2007	Slope reliability analysis accounting for spatial variation <i>Análise de fiabilidade de taludes tendo em conta a variabilidade espacial</i>
Hasofer, A.M. Lind, N.C.	2007	Stochastic analysis of failure of earth structures <i>Análise estocástica do modo de rotura de estruturas em terra</i>
	2005	A slope stability reliability model <i>Modelo de estabilidade e fiabilidade de taludes</i>
	2004	Effect of soil variability on reliability of soil slopes <i>Efeitos da variabilidade do solo na fiabilidade de taludes</i>
	2002	Probabilistic slope stability analysis for practice <i>Análise probabilística da estabilidade de taludes na prática</i>
	1994	Reliability applied to slope stability analysis <i>Fiabilidade aplicada a análise de estabilidade de taludes</i>
	1974	Exact and invariant second-moment code format <i>Formato normativo segundo o segundo momento exato e invariante</i>

1.4.2. Níveis de análises de fiabilidade

As AF podem ser realizadas por diferentes métodos possíveis, cada um, com um determinado grau de complexidade e de exatidão. Essas possibilidades são normalmente organizadas em diferentes níveis (Tabela 1.3), considerando-se os níveis descritos seguidamente (Teixeira, 2012).

- **Análises Determinísticas (Nível 0):** Forma tradicional de dimensionamento, onde as variáveis aleatórias (VA) têm valores estritamente determinísticos, sendo as incertezas englobadas nos coeficientes globais de segurança que normalmente são estimados através de experiências passadas, da intuição do engenheiro ou do seu julgamento face ao problema em estudo.
- **Análises Semi-probabilísticas (Nível I):** São obtidos pelos mesmos métodos de cálculo que os determinísticos, mas as VA são multiplicadas por fatores parciais de segurança que por sua vez são calibrados através de análises probabilísticas de nível II ou III.
- **Análises Probabilísticas Aproximadas (Nível II):** as VA são descritas através da sua média e desvio padrão ou coeficiente de variação e caracterizadas pela sua distribuição. A avaliação probabilística da segurança é feita através de técnicas numéricas aproximadas.
- **Análises Probabilísticas Puras (Nível III):** Tem em conta todas as características probabilísticas, nomeadamente a média, desvio padrão e função de distribuição da probabilidade das VA. Quando o problema é complexo, e a solução matemática com o nível II é complicada de determinar, são utilizados métodos de simulação como o método de Monte Carlo, que será o utilizado nesta dissertação.
- **Análises de Risco (Nível IV):** O risco é usado como medida de fiabilidade, em que os custos das consequências são multiplicados pela probabilidade de rotura. As consequências da rotura tidas em conta podem ser tanto a nível de custos materiais como não materiais.

Tabela 1.3 - Níveis de fiabilidade (adaptado de Teixeira et al., 2012)

Informação tida em conta	Nível de fiabilidade				
	Zzero	I	II	III	IV
Parâmetros geotécnicos					
Método de cálculo (determinístico)					
Parâmetros de dimensionamento (base estatística)					
Variabilidade dos parâmetros - média e DP - PDF					
Custos					
Tipo de análise:	CS global	CS parcial	p.ex.: FORM*	p.ex.: MC **	Risco

* Método de fiabilidade de primeira ordem (*First Order Reliability Method*)
 ** simulações de Monte Carlo

Nesta dissertação as análises determinísticas (Nível 0) serão estudadas no capítulo 3 e as análises probabilísticas propriamente ditas nível II e III serão descritas no capítulo 4 mais pormenorizadamente.

CAPÍTULO 2

ESTABILIDADE DE TALUDES

Os fenómenos naturais de instabilidade decorrem e manifestam-se independentemente do domínio da ciência e da tecnologia que o homem desenvolve para os prever. No entanto, com o passar do tempo, há todo um acumular de experiência que permite o aumento do conhecimento, uma mais rigorosa análise das causas e dos mecanismos que se desenvolvem e conseqüentemente uma maior diversidade de respostas de defesa.

As análises de estabilidade de um talude são realizadas com o objetivo de avaliar se existe necessidade de aplicar medidas preventivas para impedir que se dê a rotura do mesmo. Na Figura 2.1 é possível observar um talude natural que se tornou um mecanismo, provocando uma derrocada (à esquerda), e a posterior forma de estabilização (à direita) a que foi sujeito de forma a impedir novos acidentes (Silva, 2011).



Figura 2.1 - Deslizamento de um talude (à esquerda) e posterior estabilização (à direita) (adaptado de GersCovich, 2009)

Na avaliação da estabilidade de um talude é necessário o conhecimento da sua estrutura geológica e do comportamento geomecânico dos materiais que o constituem, bem como dos fatores que influenciam, condicionam e desencadeiam as instabilidades e possíveis modelos ou mecanismos de rotura que se podem originar (Miranda, 2012).

O comportamento de taludes depende de uma série de parâmetros entre os quais a geologia, a geometria, a topografia, a hidrogeologia, o clima, a sismografia e a ação humana. Geralmente estes parâmetros não atuam isoladamente, sendo a instabilidade provocada pela combinação de alguns ou de todos eles, criando assim fontes de incertezas responsáveis pela variabilidade desses parâmetros que fazem com que o problema tenha um carácter probabilístico.

2.1. FATORES CONDICIONANTES NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Os fatores que influenciam a estabilidade de um talude podem ser fatores geométricos, como a altura e inclinação; fatores geológicos e geotécnicos, tais como planos e zonas de menor resistência e comportamento do maciço em termos de resistência e deformabilidade; mas também fatores hidrogeológicos, como presença de água (Miranda, 2012).

Para além de ter em consideração os fatores referidos anteriormente, existem fatores fundamentais a ter em conta na estabilidade de taludes que controlam os movimentos de massa, sendo esses:

- Fraturas: representam importantes descontinuidades, tanto em termos mecânicos quanto hidráulicos.
- Falhas: têm um papel destacado no condicionamento dos movimentos de massa. Como as juntas afetam a dinâmica hidrológica, favorecem as intempéries e, quando silicatadas, geram uma barreira ao fluxo de água pela impermeabilização do plano de falha.
- Foliação e/ou bandeamento composicional: a sua orientação influencia diretamente a estabilidade das encostas em áreas onde afloram rochas metamórficas.
- Descontinuidades no solo: incluem, principalmente, feições estruturais reliquias do embasamento rochoso (fraturas, falhas, foliação, bandeamentos etc.) e horizontes de solo formados por processos pedogenéticos.
- Morfologia da encosta: em perfil e em planta, pode condicionar de forma direta ou indireta a geração de movimentos de massa.
- Depósitos de encosta: tanto na forma de talude como de colúvio, estão diretamente relacionados com as zonas de convergência na morfologia descrita anteriormente. Em geral, uma das suas principais características é a grande heterogeneidade interna. Muitos depósitos de encosta repousam diretamente sobre rocha sã, gerando uma descontinuidade mecânica e hidrológica ao longo desse contacto, favorecendo a geração de escorregamentos planares.

Com uma combinação crítica dos fatores descritos pode estabelecer-se a condição de rotura, desde que seja cinematicamente possível o movimento de um certo volume de massa do maciço (Pires, 2009). Assim, a obtenção de informações prévias sobre todos estes fatores possibilitará uma correta análise do talude e avaliação da sua estabilidade.

2.2. TIPOS DE INSTABILIZAÇÃO EM TALUDES

A análise dos processos de instabilização de taludes e as suas formas de contenção são cada vez mais estudados nos dias de hoje, devido às desastrosas consequências que estes processos acarretam.

A instabilização traduz-se pela possibilidade de, sob certas condições, uma parte do talude, em reduzida ou grande escala, poder desprender-se e escorregar ao longo da encosta, no qual a gravidade desempenha o papel de principal motor. Na Figura 2.2 é representado um caso real, onde é possível ver uma superfície de deslizamento da massa instabilizada.



Figura 2.2 – Rotura de talude da Mina de Bingham Canyon, Kennecott Utah (USA) (adaptado de Caldwell, 2013)

Existem inúmeros critérios para classificar os movimentos dos taludes fazendo intervir parâmetros como a natureza do material, a velocidade de instabilização, a morfologia e tipo de superfície de rotura, a causa da rotura, a idade da instabilização, entre outros (Gomes Correia et al., 1996). O critério mais utilizado para classificação do movimento de um talude é proposto por Varnes (1978). Na Tabela 2.1 e Figura 2.3 é possível ver essas classificações.

Tabela 2.1 - Classificação dos movimentos de um talude (adaptado de Varnes, 1978)

Classificação do tipo de movimento de um talude		
Queda (<i>fall</i>): decorrentes da ação da gravidade, ocorrem com velocidades elevadas.		
Desprendimento (<i>topples</i>): rotação com basculamento de placas de material rochoso; causado pela ação da gravidade ou pressões intersticiais em fissuras.		
Escorregamento (<i>slide</i>): movimentos de massas de terreno, em regra bem definidas quanto ao seu volume.	Rotacional: em geral ocorrem com materiais homogêneos e a massa instável é considerada rígida.	Simples: uma superfície de rotura, rasa ou profunda. Sucessivo: mais de uma superfície de rotura; podem ser progressivos ou retrogressivos.
	Planares: solos com anisotropias marcadas e superfície de rotura plana relacionada com a existência de planos de menor resistência do que o material que os rodeia.	
	Composto: ocorrem em taludes naturais de solos não homogêneos, com superfícies de rotura não lineares.	
Escoamento (<i>flow</i>): movimentos contínuos de solos, rochas e/ou detritos com zona de rotura bem definida; material com comportamento viscoso.	Lento (<i>creep</i>): também denominados fluência, ocorrem em materiais com comportamento plástico; movimentos contínuos sem superfície de rotura definida, sob tensões totais constantes.	Raso: profundidade da massa em movimento inferior a 5m.
		Profundo: profundidade da massa em movimento superior a 5m.
		Progressivo: movimentos com aceleração gradual com o tempo.
		Pós rotura: a massa permanece em movimento após o escorregamento.
	Rápido: em forma de língua com espalhamento na base; usuais em taludes suaves; material com comportamento de fluido pouco viscoso e sob condições não drenadas.	Corrida de terra (<i>flow slide</i>): rotura de estruturas constituídas por solos arenosos e siltosos, com acréscimo de pressões intersticiais devido a vibrações ou saturação.
		Corrida de lama (<i>mud flow</i>): movimentos rápidos em solos moles sensitivos. Corrida de detritos (<i>debris flow</i>): avalanches de grandes volumes de massas de blocos de rocha, solo e detritos vegetais.
Complexo: envolvem vários tipos de movimentos; comuns em encostas íngremes.		

Material		Solo
Tipo de movimento		
Queda	Queda de solo	
Desprendimento	Desprendimento de solo	
Escorregamento	Escorregamento rotacional	
Espalhamento	Espalhamento de solo	
Escoamento	Escoamento de solo (Corridas de lama)	

Figura 2.3 - Classificação dos movimentos de um talude (adaptado de Varnes, 1978)

Os movimentos de um talude podem ser também classificados quanto às suas condições de perturbação e drenagem do mesmo, descritos de seguida:

- Classificação dos movimentos quanto às condições de perturbação do talude:
 - Escorregamentos virgens: Ocorrem em geral em material indeformado, com parâmetros de resistência associados à condição de pico da curva tensão-deformação.
 - Escorregamentos reativados: Ocorrem com material remexido, em superfícies pré-existentes, que sofreram escorregamentos anteriores. A resistência do material tende para a condição residual.
- Classificação dos movimentos quanto às condições de drenagem do talude:
 - Condições drenadas (longo prazo): Pressão intersticial associada ao fluxo permanente no material. Dissipação total das pressões intersticiais geradas pelo corte.

- Condições parcialmente drenadas (prazo intermediário): Parte da pressão intersticial gerada pelo corte é dissipada.

- Condições não drenadas (curto prazo): Materiais com baixo valor de coeficiente de consolidação (permeabilidade). Geração de excessos de pressão intersticial associados ao corte do material.

2.3. CAUSAS DA INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES

A instabilidade nos taludes pode resultar de causas externas, que são ações que atuam exteriormente ao talude, de causas internas, isto é, ações que atuam no próprio talude e de causas intermédias, que dizem respeito a ações exteriores ao maciço que desencadeiam mecanismos de instabilização atuando no seu interior. Estas causas advêm de diversos fatores e podem atuar em conjunto ou isoladamente (Gomes Correia et al., 1996). Seguidamente estas causas são descritas em maior detalhe:

- As **causas externas** que afetam os taludes devem-se a aumentos da sua inclinação por escavação ou erosão, a aumentos de altura do talude (escavação no pé ou aterro na crista), aplicação de sobrecargas particularmente na parte superior, abalos sísmicos ou vibrações induzidos nos terrenos e variação sazonal da temperatura e humidade.
- As **causas internas** são provocadas pelo aumento das pressões intersticiais, diminuição da coesão do solo e aumento das tensões de origem tectónica.
- As **causas intermédias** resultam dos efeitos do rebaixamento rápido do nível freático, da erosão interna provocada pela circulação da água no interior do talude e da liquefação do solo.

2.4. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

Todos os projetos de obras de engenharia civil têm aspetos geotécnicos, embora o seu grau de relevância possa variar em cada um. Tradicionalmente, a verificação de segurança geotécnica utilizada desenrola-se num quadro normativo estabelecido pelo Eurocódigo (EC) 7 (CEN, 2007) que institui uma metodologia (requisitos e critérios) para a avaliação da resistência, estabilidade, condições de serviço e durabilidade das estruturas geotécnicas. O EC 7 deve ser utilizado juntamente com o EC 0 (CEN, 2002a), que diz respeito às bases para o projeto de estruturas, com o EC 1 (CEN, 2002b) relacionado com as ações em estruturas de

engenharia civil e com o EC 8 (CEN, 2004) que é dedicado ao projeto de estruturas resistentes à ação sísmica.

O EC 7 encontra-se dividido em duas partes. Na parte 1 este apresenta as regras gerais do dimensionamento geotécnico e descreve os princípios gerais e os requisitos que garantem a segurança, a utilização e a durabilidade das estruturas suportadas. A parte 2 diz respeito à prospeção geotécnica e ensaios.

Nestes Eurocódigos (CEN, 2002a, 2002b, 2004, 2007), as metodologias de cálculo podem considerar as fontes de incerteza através de um coeficiente de segurança global determinado com base empírica, respeitante aos métodos clássicos e determinísticos; ou introduzindo o método dos coeficientes parciais de segurança, calibrados por vezes através de análises probabilísticas de nível II ou III. Com este último, as incertezas são tratadas na origem através da introdução do valor característico e do valor de cálculo das variáveis envolvidas no dimensionamento (nomeadamente ações, resistências e grandezas geométricas). Os valores característicos obtêm-se recorrendo ao uso de métodos estatísticos (Martins, 2006). Os valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos, obtêm-se segundo o EC 7, através da divisão do valor característico por um coeficiente parcial respeitante a um parâmetro do solo (propriedade de um material) que tem em conta as incertezas inerentes aos modelos, para situações persistentes e transitórias, definido no Anexo A do EC 7 (CEN, 2007).

De forma a introduzir as incertezas na modelação dos efeitos das ações (E) e da capacidade resistente (R), o EC 7 recorre a três diferentes abordagens de cálculo, sendo a maior diferença entre elas, o modo como distribuem os coeficientes globais pelas ações, pelos efeitos das ações, pelas propriedades dos materiais e pelas capacidades resistentes.

Os critérios de segurança são definidos para os estados limite últimos (ELU), que estão associados à rotura do próprio talude ou à rotura de estruturas afetadas pela sua instabilização e para os estados limites de serviço (ELS) que se baseiam na deformação do talude (CEN, 2007).

O EC 7 tem em conta cinco diferentes ELU, que devem ser verificados quando relevantes: perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno (EQU), rotura interna ou deformações excessivas da estrutura ou de elementos estruturais (STR), rotura ou deformação excessiva do terreno (GEO), perda de equilíbrio ou do terreno devido ao levantamento global originado por pressão da água (flutuação) ou por outras ações verticais (UPL) e levantamento hidráulico (HYD). A verificação da estabilidade global de taludes em relação aos ELU aplica-se principalmente em situações persistentes e transitórias, sendo que os coeficientes parciais definidos no Anexo A do EC 7 apenas são válidos nestas situações. No caso de situações

acidentais todos os valores dos coeficientes parciais para as ações ou efeito das ações tomam o valor de 1 e para a determinação da capacidade resistente os valores adotados dependem das circunstâncias particulares de cada situação (Martins, 2006).

Os ELS dizem respeito às condições de funcionalidade que devem ser garantidas nas estruturas existentes nas proximidades do talude que possam ser afetadas pela deformação desse talude. (Gomes Correia et al., 1996). Neste, deve ser considerada a subsidência do terreno devido a variações das condições de água do terreno e correspondentes pressões intersticiais, fenómenos de fluência, perda de volume de estratos profundos solúveis e trabalhos mineiros ou similares (CEN, 2007).

Para cumprir os requisitos para os ELU, segundo o EC7 é necessário verificar que o valor de cálculo das ações ou do efeito das ações E , é igual ou inferior ao valor de cálculo da resistência R – equação (2.1).

$$E \leq R \quad (2.1)$$

Os taludes naturais existem na natureza com um certo grau de estabilidade, pretendendo-se, por isso, avaliar a necessidade ou não de medidas de estabilização para impedir que esse grau baixe e se dê a rotura. Quanto aos taludes artificiais, executam-se análises de estabilidade quando se está perante problemas de instabilidade ou em fase de execução de projetos de taludes.

Na análise de estabilidade de taludes a massa de solo ou de rocha limitada pela superfície de rotura deve ser encarada como um ou vários corpos rígidos movendo-se simultaneamente. As superfícies de rotura e superfícies de contato entre corpos rígidos podem ter diferentes formas, designadamente planar (talude infinito), circular ou mais complexas (talude finito) (as metodologias utilizadas para o cálculo determinístico na avaliação da estabilidade destes taludes encontram-se no subcapítulo 3.1.1. Em alternativa aos métodos tradicionais, a estabilidade pode ser verificada através da análise limite ou utilizando o método dos elementos finitos, como se descreve no subcapítulo 3.1.2 e 3.1.3, respetivamente (CEN, 2007).

Atualmente, o meio mais comum para saber o grau de estabilidade de um talude é recorrendo ao cálculo de fator de segurança (FS). Este parâmetro permite perceber se o talude está mais ou menos estável mediante o seu valor. Considera-se que um talude está estável se o valor do FS for superior a 1.

No estudo de um talude as análises de estabilidade devem ser capazes de antecipar o aumento de sollicitação que o mesmo será capaz de suportar até se transformar num mecanismo de rotura. Assim, é possível definir o FS que se traduz na razão entre a resistência mobilizável (τ_r) e a resistência mobilizada (τ_a) – equação (2.2).

$$FS = \frac{\int \tau_r}{\int \tau_a} \quad (2.2)$$

Na Figura 2.4 é possível visualizar este conceito. A resistência mobilizada representa as forças que incitam ao escorregamento (setas azuis) e a resistência mobilizável são as forças que se opõem ao movimento (setas vermelhas).

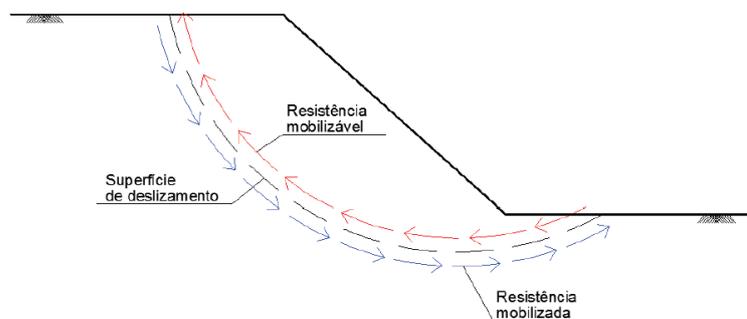


Figura 2.4 - Resistência mobilizável e resistência mobilizada (adaptado de Silva, 2011)

Segundo o EC 7 quando se está perante uma análise de estabilidade de taludes deve-se verificar o equilíbrio dos momentos e de forças verticais da massa de terreno potencialmente deslizante (CEN, 2007). Assim, o FS pode também ser calculado via equilíbrio de momentos e equilíbrio de forças. O equilíbrio de momentos é a razão entre o somatório de momentos das forças resistentes (M_r) e o somatório de momentos das forças atuantes (M_a) – equação (2.3) – e é aplicado usualmente em análises de movimentos rotacionais considerando superfícies de rotura circulares.

$$FS = \frac{M_r}{M_a} \quad (2.3)$$

O equilíbrio de forças traduz-se pela razão entre o somatório de forças resistentes (F_r) e o somatório de forças atuantes (F_a) – equação (2.4) – e é aplicado em análises de movimentos planares ou rotacionais, considerando-se superfícies planas ou poligonais.

$$F = \frac{Fr}{Fa} \quad (2.4)$$

Diversos autores como Duncan (2000) e Johari & Javadi (2012), entre outros, referem os parâmetros a ponderar no cálculo do FS e qual o seu valor para se poder considerar o talude estável.

Os métodos de análise de estabilidade de taludes visam verificar se o talude está seguro. Os métodos determinísticos utilizados tradicionalmente, consideram que quanto maior o FS obtido maior a estabilidade do talude, não tendo em conta a probabilidade de rotura (*pf*). Normalmente é utilizado o valor de 1 para se verificar se o talude está no estado iminente de rotura, sendo que este é o limiar entre o instável e o estável. Por vezes, o facto de FS ser igual à unidade não significa que o talude esteja seguro, pois a *pf* não é nula o que também se tem de ter em consideração (Johari & Javadi, 2012).

Alguns dos fatores que influenciam o valor do FS admissível são as consequências a nível de rotura, em termos económicos e muito importante em termos de perda de vidas humanas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Recomendação para FS admissíveis em termos de risco de perdas económicas e de perda de vidas humanas para novos taludes (adaptado de GEO, 1984)

FS admissíveis		Risco de perda de vidas humanas		
		Desprezível	Médio	Elevado
Risco de perdas económicas	Desprezível	1.1	1.2	1.4
	Médio	1.2	1.3	1.4
	Elevado	1.4	1.4	1.5

Nota 1: Fatores de segurança para um período de recorrência de 10 anos.

Nota 2: Para condições de riscos elevados e subsolo mole, o valor admissível de FS pode ser majorado até 10% .

Considerando apenas o risco de perda de vidas humanas em taludes já existentes, os FS admissíveis encontram-se na Tabela 2.3. Nestes casos, os FS são tidos em conta, para propostas de obras corretivas ou preventivas.

Os valores para os FS que se encontram nestas tabelas não se adequam a todas as situações possíveis de rotura de taludes, por isso nunca é dispensado o espírito crítico do engenheiro aquando a construção da obra, de forma a aplicar as medidas que mais se adequam à situação, tendo em conta o método de cálculo utilizado.

Tabela 2.3 - Recomendação para FS admissíveis em termos de risco de perda de vidas humanas para taludes já existentes (adaptado de GEO, 1984)

Risco de perda de vidas humanas		
Desprezível	Médio	Elevado
FS>1.1	FS>1.2	FS>1.3

Nota: Fatores de segurança para período de recorrência de 10 anos

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DETERMINÍSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Quando se está perante situações de instabilidade ou na execução de projetos de taludes, realizam-se análises de estabilidade de forma a estabelecer as medidas de correção ou de estabilização apropriadas para impedir movimentos indesejados.

O objetivo da análise de fiabilidade (AF) de taludes é o de garantir a sua segurança, averiguando a possibilidade/probabilidade de ocorrer um determinado comportamento da estrutura com base no conhecimento das incertezas e aleatoriedades da geometria do problema, nas propriedades constitutivas e ações.

Os métodos utilizados para a análise da estabilidade de taludes podem ser determinísticos, semi-probabilísticos ou probabilísticos. O tema da abordagem probabilística será aprofundado no próximo capítulo.

Neste capítulo serão abordados os métodos determinísticos que permitem perceber se o talude é ou não estável, através do conhecimento ou por suposição das condições do talude. Este método consiste em escolher os valores característicos adequados dos parâmetros físicos e resistentes que controlam o comportamento dos materiais para depois caracterizar o FS do talude ou as suas condições de estabilidade. Neste contexto aborda-se o Método de Equilíbrio Limite, o Método Análise Limite e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

No final deste capítulo, são apresentados, de forma breve, alguns programas de cálculo, que permitem a execução de análises de estabilidade de taludes.

3.1. MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Os métodos determinísticos são usados comumente na análise de estabilidade de taludes. Estes pressupõem que obter um FS superior a 1 deve ser suficiente para garantir a segurança da estrutura. Este método tem em conta as incertezas através de um coeficiente de segurança global e considera as VA através de pequenas quantidades de amostras ou observações feitas para definir o valor característico.

As análises de estabilidade determinísticas são assim influenciadas pelo julgamento do engenheiro não concedendo informações dos parâmetros com mais influência na estabilidade.

Os métodos determinísticos são passíveis de superestimar o FS. Isto porque nestes métodos é necessário assumir *à priori* uma superfície potencial de rotura não permitindo que a superfície de rotura encontre o caminho mais crítico através do solo (Griffiths et al., 2011).

Estas análises recorrem a diferentes abordagens, sendo uma baseada nas relações tensão-deformação dos materiais, onde se destaca o MEF, outra na análise limite e por último no conceito de equilíbrio limite que é a mais utilizada atualmente.

Hoje em dia estes modelos de cálculo já não têm de ser executados manualmente, pois existem vários programas de cálculo como o SLOPE/W, o SLIDE e o STABL que os incorporam calculando o FS para cada um dos métodos

3.1.1. Método de Equilíbrio limite

O método de equilíbrio limite é o mais utilizado devido à sua simplicidade (Yu, Salgado et al., 1998), no qual é feito uma série de pressupostos para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos na formulação do FS, tais como:

- A superfície potencial de rotura é previamente conhecida ou arbitrada
- A massa de solo encontra-se em condições iminentes de rotura generalizada
- O critério de rotura de Mohr-Coulomb é satisfeito ao longo de toda a superfície de rotura.
- O FS é único ao longo da superfície potencial de rotura.

Quando se realiza esta análise deve-se ter em conta qual a resistência máxima suportada pelo talude antes de se tornar num mecanismo. Esta resistência máxima é calculada pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb, que indica que, para não ocorrer rotura no talude, é necessário que as tensões aplicadas sejam inferiores às tensões mobilizáveis pelo talude.

Vários autores como Bolton et al. (2003); Cala & Flisiak (2001); Yu et al. (1998); Fredlund et al. (1981); Law & Lumb (1978) apresentam a formulação dos métodos de equilíbrio limite e a sua evolução ao longo do tempo.

Nestes estudos verifica-se que os principais métodos determinísticos de análise de estabilidade de taludes são o de talude infinito e os de talude finito, como o de Hoek e Bray (1981), equilíbrio limite geral (GLE) (Fredlund & Krahn, 1977), Sarma (1973, 1979), Janbu rigoroso (1972), Corpo de Engenheiros (1970), Spencer (1967), Morgenstern e Price (1965), Lowe-Karafiath (1959), Bishop Simplificado (1955), Janbu simplificado (1954), Taylor (1948), Fellenius (1936), sendo alguns de cálculo mais complexo surgindo a necessidade de

recorrer a programas de cálculo. Estes métodos serão descritos mais detalhadamente nos pontos seguintes.

Talude infinito

Os taludes infinitos caracterizam-se pela reduzida espessura da camada de solo potencialmente instável quando comparada com a sua grande extensão. A rotura, quando ocorre é do tipo planar, sendo o plano de rotura paralelo à superfície de terreno (Figura 3.1).

No caso em que qualquer fatia considerada do talude é igual a todas as outras, o talude é infinito e uniforme. As forças laterais aplicadas de cada lado das fatias são iguais em magnitude e opostas em sentido (Lambe & Whitman, 1979).

A equação de talude infinito é normalmente implementada com a suposição de propriedades do solo homogéneo em que a rotura ocorre sempre na base do talude (Griffiths et al., 2011). O cálculo do FS é baseado na soma das forças perpendiculares e paralelas ao plano de deslizamento assumindo uma superfície de rotura plana.

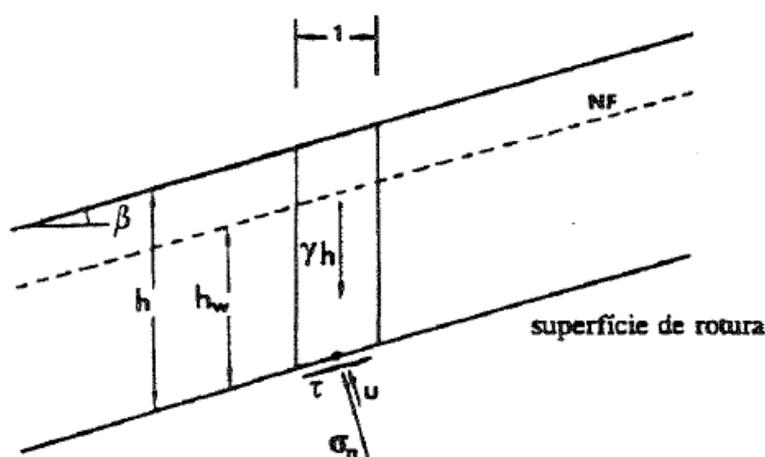


Figura 3.1 – Talude infinito (adaptado de Gomes Correia et al., 1996)

A segurança de taludes infinitos pode ser analisada perante condições drenadas e não drenadas (Tabela 3.1), considerando a influência das incertezas associadas às suas propriedades geotécnicas como a coesão, ângulo de atrito, peso volúmico e nível freático e da sua geometria como a altura e inclinação do talude, e verificando as que mais condicionam o talude.

Tabela 3.1– Expressões analíticas do FS de taludes infinitos em condições drenadas e não drenadas

Condições drenadas	Condições não drenadas
$F_s = \frac{c' + \gamma \cdot h \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \text{tg}(\phi')}{\gamma \cdot h \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}$	$F_s = \frac{c_u}{\gamma \cdot h \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}$
Sendo: h - altura do talude α - ângulo de inclinação do talude relativamente à horizontal c' - coesão efetiva do solo γ - peso volúmico do solo φ' - ângulo de atrito efetivo do solo	Sendo: h - altura do talude α - ângulo de inclinação do talude relativamente à horizontal c _u - coesão não drenada do solo γ - peso volúmico do solo

Taludes finitos

Na análise de estabilidade de taludes finitos pode recorrer-se a diferentes métodos de equilíbrio limite, na Tabela 3.2 constam os métodos mais utilizados que se apoiam no método das fatias: a massa instável de solo é dividida em fatias verticais em que cada uma está em contacto com a superfície de rotura, podendo a potencial superfície de rotura ser circular ou não circular (Figura 3.2) e procede-se ao cálculo do equilíbrio da massa de solo através das equações da estática (Bolton et al., 2003).

As equações de equilíbrio estático resolvidas pelo método de fatias, não têm em conta o comportamento das tensão-deformação do solo nem a relação de tensão horizontal e vertical, não permitindo determinar o mecanismo de rotura. Isto levou a que se tentasse encontrar novos métodos em que fosse possível determinar a forma da superfície de rotura (Bolton et al., 2003).

As maiores diferenças entre os métodos de equilíbrio limite no cálculo do FS baseiam-se na formulação das equações de equilíbrio, nas forças inter-fatias e nas limitações impostas pelas superfícies de rotura não circulares (Fredlund et al., 1981).

Tabela 3.2 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite

Método	Forma da superfície		Parâmetro analisado	
	Circular	Não Circular	Momentos	Forças
Fellenius (1936)				
Bishop simplificado (1955)				
Janbu simplificado (1954)				
Spencer (1967)				
Lowe-Karafiath (1959)				
Janbu generalizado (1968)				
Morgentern-Price (1965)				
Sarma (1973)				
GLE (Fredlund & Krahn, 1977)				

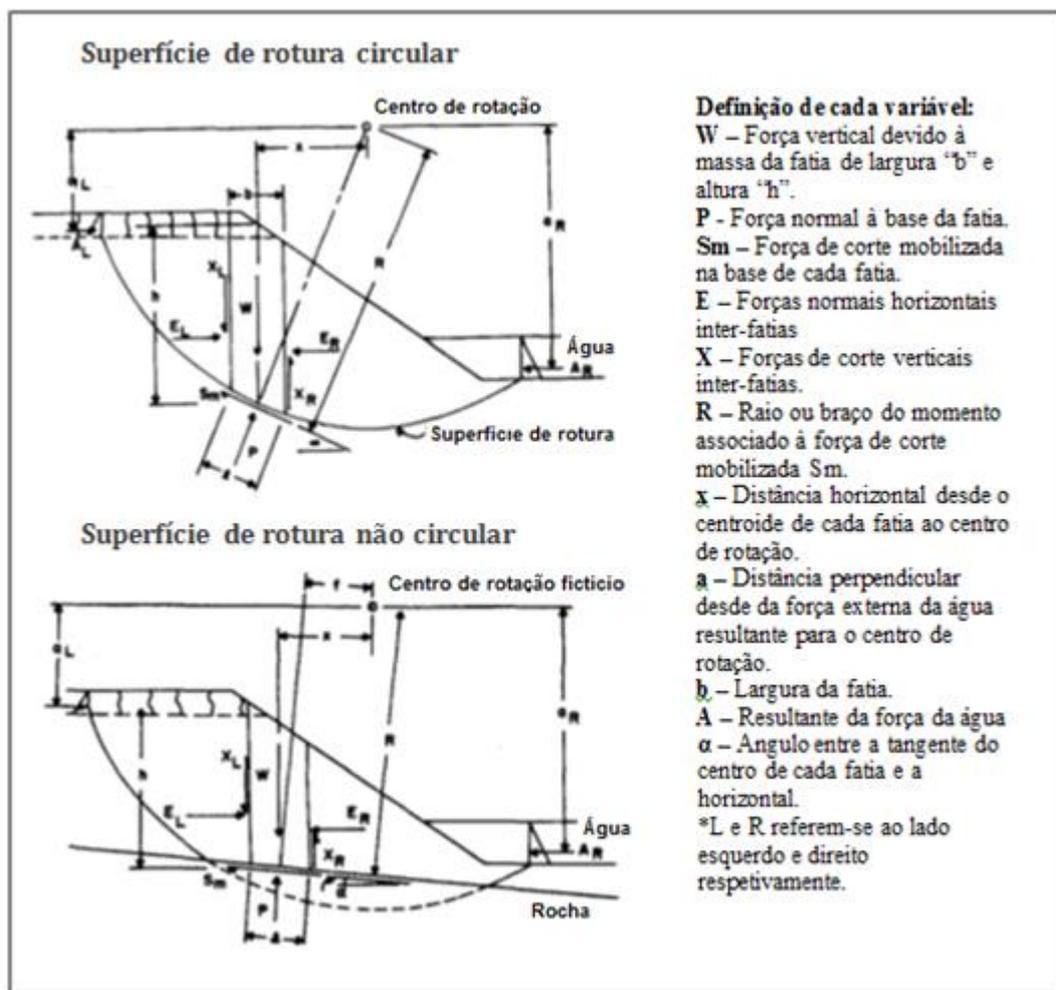


Figura 3.2 - Forças atuantes no Método das Fatias em superfície de rotura circular e não circular de taludes finitos (adaptado de Fredlund et al., 1981)

O conceito de equilíbrio limite é usado exhaustivamente nas análises convencionais de estabilidade de taludes e por isso, ao longo dos anos foram realizados muitos trabalhos de onde é possível tirar diversas conclusões. Verifica-se que os métodos de equilíbrio limite são

aplicados pelo lado da segurança, obtendo-se resultados conservativos. Os métodos mais rigorosos como Sarma, Spencer e Morgenstern-Price dão valores similares entre si e geralmente um pouco acima dos de Bishop. O método de Fellenius é de simples aplicação, fornecendo valores mais conservativos.

De seguida são apresentadas algumas conclusões de diferentes autores sobre vários métodos de equilíbrio limite na verificação da estabilidade de taludes:

- (Cala & Flisiak, 2001) Quanto mais tipos de solo diferentes constituem o talude, mais diverge o FS para cada método. Verifica-se que o FS obtido pelo método de Bishop e Morgenstern-Price é o mais semelhante e mais alto, seguindo-se o de Janbu e por fim o de Fellenius.
- (Law & Lumb, 1978) Avaliando o método de Bishop e Morgenstern-Price verifica-se que mesmo variando o ângulo de inclinação de um talude obtém-se FS iguais e que o seu valor diminuiu com o aumento da inclinação. É possível também concluir que estes métodos resultam numa solução conservativa.
- (Fredlund et al., 1981) Considerando um talude com uma superfície de rotura circular com um solo homogéneo verifica-se que o FS obtido pelos métodos de GLE e de Morgenstern-Price é bastante semelhante. Comparando este talude a um talude composto por uma camada de rocha obtém-se FS muito superiores para o primeiro. É possível observar que no segundo talude o método de GLE, Spencer e Janbu Simplificado fornecem FS iguais.

3.1.2. Método da Análise Limite

Os teoremas fundamentais da Análise Limite foram apresentados por Drucker & Prager (1952) e Chen (1975) baseados na teoria clássica de plasticidade.

O objetivo da análise limite é determinar a carga que conduz a estrutura à rotura. As formulações existentes na análise limite para a carga de rotura são baseadas nos teoremas de análise limite inferior ou superior, isto é soluções onde a ocorrência de instabilidade é estimada de forma conservativa ou não conservativa, respetivamente.

Esta análise fornece soluções aproximadas assumindo um mecanismo de rotura cinematicamente admissível para uma solução de limite superior; ou assumindo um campo de tensões estaticamente admissíveis para uma solução de limite inferior; ou finalmente existe a solução mista que tem a forma da formulação pelo limite inferior, com variáveis em tensões, mas o campo de tensões não é estaticamente admissível, a não ser de forma aproximada.

As soluções são limitadas a situações geométricas simples tais como cortes verticais e taludes infinitos e consideram que o material, na rotura, se comporta como perfeitamente plástico, associado a uma lei de escoamento. Dado que as soluções simples para a maioria dos problemas práticos não estão disponíveis, atualmente o método de análise limite é usado em associação com o MEF, existindo vários programas de cálculo disponíveis (Yu et al., 1998).

O método da análise limite é apresentado nesta dissertação de forma básica e sucinta pois este não será utilizado para a análise dos casos em estudo.

3.1.3. Método dos Elementos Finitos

Os métodos numéricos avançados como o MEF foram introduzidos por Clough & Woodward (1967) na verificação da estabilidade de taludes (Figura 3.3). O primeiro livro sobre o MEF foi publicado por Zienkiewicz & Cheung em 1967.

O mesmo representa uma abordagem alternativa poderosa para a análise de estabilidade de taludes, é um método preciso, que exige menos suposição à priori, especialmente em relação ao mecanismo de rotura (Griffiths & Lane, 1999). Segundo Naylor (1982) o MEF é muito útil para se conseguir apurar como é que a rotura se inicia e qual o mecanismo de rotura provável.

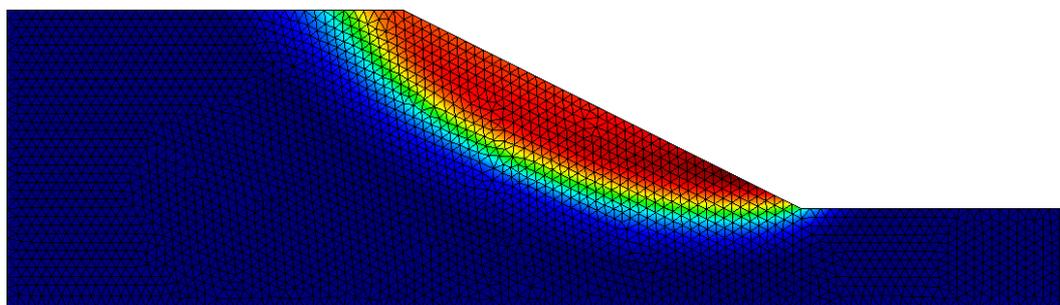


Figura 3.3 - Análise de estabilidade de talude aplicando o método dos elementos finitos

Zheng et al., 2005 mencionam algumas vantagens do MEF relativamente ao método de equilíbrio limite:

- É possível prever qual o mecanismo de rotura para o estado limite último da estrutura.
- O processo de rotura progressiva resultante da redução da tensão de corte pode ser monitorizada e assim, o reforço pode ser colocado nesses locais vitais para a estabilidade.

- As influências de diferentes procedimentos de construção na estabilidade de taludes podem ser comparadas.
- Alguns fatores que influenciam a estabilidade de talude mais complexos podem ser tidos em consideração, por exemplo o processo de precipitação.

Este método é mais versátil na verificação da estabilidade global comparativamente com os outros dois (equilíbrio limite e análise limite). É o mais apropriado nos casos onde a instabilidade inclui rotura combinada de membros estruturais e do terreno, tais como superfícies de rotura intersectando cortinas flexíveis, estacas, ancoragens ou pregagens no solo, em tais casos deve ser considerada a interação solo-estrutura tendo em conta a diferença na sua rigidez relativa.

Ao contrário dos métodos de equilíbrio limite, o MEF não necessita de definir à partida a forma e localização da superfície de rotura, as leis constitutivas do solo são preservadas pela análise feita por elementos finitos sendo as condições de equilíbrio de forças e momentos rigorosamente satisfeitas e têm em conta as relações tensão-deformação envolvidas no comportamento dos solos (Pham et al., 2001).

O MEF é utilizado não só numa abordagem determinística, mas também nas análises probabilísticas. A análise de estabilidade de taludes é um ramo da engenharia geotécnica, que é altamente favorável ao tratamento probabilístico, e tem recebido considerável atenção na literatura (Griffiths & Fenton, 2004). El-Ramly et al. (2002) produziram uma revisão útil da literatura sobre o tema, constatando que a geotecnia demorou bastante a adotar as abordagens probabilísticas para projetos geotécnicos, especialmente em problemas tradicionais, como taludes e fundações.

Os primeiros trabalhos surgiram na década de sessenta e continuam firmemente até aos dias de hoje. Alguns dos autores que estudam os métodos dos elementos finitos são: Schweiger & Peschl (2005), Zheng et al. (2005), Griffiths & Fenton (2004), Pham & Fredlund (2003), El-Ramly et al. (2002), Cala & Flisiak (2001), Pham et al. (2001), Griffiths & Lane (1999), Christian et al. (1994) e Naylor (1982).

Alguns destes autores como Pham et al. (2001), Zheng et al. (2005), entre outros, realizaram estudos com programas de elementos finitos comparando-os posteriormente aos métodos tradicionais de equilíbrio limite e concluíram que os métodos de elementos finitos fornecem resultados mais precisos e próximos da realidade do que os métodos de equilíbrio limite.

A evolução deste método inicialmente foi um pouco complicada devido às limitações das tecnologias e ao seu tempo de processamento. Hoje em dia isto já não é uma preocupação

e a sua utilização na análise de estabilidade de taludes generalizou-se, nomeadamente pelo aparecimento de vários programas comerciais como o PHASE2, o PLAXIS e o TOCHNOG.

Estes programas resolvem os problemas de forma eficaz obtendo-se resultados confiáveis e fornecendo uma completa informação acerca da distribuição de deslocamentos, deformações e tensões que ocorrem durante a simulação.

3.2. PROGRAMAS DE CÁLCULO

A evolução a nível informático foi notável nas últimas décadas o que permitiu desenvolver sofisticados programas. Os programas são ferramentas muito importantes na análise de estabilidade de taludes, eles não só facilitam no processo de cálculos de métodos mais complexos como permitem economizar bastante tempo, obtendo-se resultados mais rigorosos.

Nas análises de estabilidade de taludes são usados vários programas de cálculo tanto para proceder ao cálculo determinístico como probabilístico. De seguida é feita uma breve descrição de possíveis programas que se baseiam nos métodos de equilíbrio limite e nos métodos numéricos, sendo que este último se divide nos métodos de elementos finitos e método de diferenças finitas.

3.2.1. Equilíbrio limite

- **SLOPE/W:** O Slope/W é um programa desenvolvido pela Geo-Slope que utiliza a teoria de equilíbrio limite para calcular o FS de taludes em rocha ou solo. Este programa veio facilitar a análise de estabilidade de taludes complexos, usando simultaneamente vários métodos de análise, tais como, Bishop, Janbu, corpo de engenheiros 1 e 2, Spencer, Morgenstern-Price, GLE e Lowe-karafiath.
- **SLIDE:** O slide 2D é um dos programas mais populares desenvolvido pela Rocscience que usa os convencionais métodos de equilíbrio limite para a análise da estabilidade de taludes de forma a avaliar o FS de superfícies circulares de rotura. O programa abrange diversos métodos como Bishop, corpo de engenheiros, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, GLE e Lowe-karafiath. O Slide possui também uma extensa capacidade de análise probabilística, sendo possível atribuir distribuições

estatísticas para quase todos os parâmetros de entrada, incluindo propriedades do material, propriedades de apoio, cargas e localização do nível freático.

3.2.2. Métodos dos elementos finitos

- **PLAXIS:** O PLAXIS foi desenvolvido para análises de problemas geotécnicos como a estabilidade de talude com base no MEF. Neste programa, os materiais são representados por elementos ou zonas, de tal forma que a malha gerada pode adequar-se perfeitamente às condições de contorno do problema. Cada elemento obedece a relações tensões deformações pré-definidas, lineares ou não lineares, em respostas às forças e condições limites impostas ao modelo.
- **PHASE2:** O PHASE2 é um programa desenvolvido pela Rocscience de cálculo de análise bidimensional elasto-plástica de elementos finitos, utilizado principalmente no cálculo de tensões e deslocamentos em escavações subterrâneas ou superficiais de rocha ou de solo. Ele pode ser usado para uma ampla gama de projetos de engenharia incluindo o projeto de estabilidade de taludes, águas subterrâneas entre outros, sendo também eficaz em análise probabilística.
- **D-GEO STABILITY:** Programa desenvolvido para o projeto e controle de estabilidade de taludes em solos moles. As análises de fiabilidade seguem o estipulado no Eurocódigo 7, permitindo a entrada de FS parciais. Os cálculos neste programa baseiam-se no MEF e pode recorrer tanto a análises semi-probabilísticas, como análises probabilísticas.

Usando os parâmetros do modelo padrão para as propriedades estocásticas, o programa permite facilmente mudar de uma análise de segurança padrão para uma AF sem dados de entrada adicionais, sendo possível ter em conta a variação espacial dos parâmetros.

- **TOCHNOG:** O TOCHNOG é um programa de elementos finitos que oferece uma variedade de opções geotécnicas e mecânicas:
 - Análises estáticas, quasi-estáticas e dinâmicas
 - Análises de tensões, temperatura e pressões intersticiais
 - Malha Lagrangiana e Euleriana no espaço

- Uma biblioteca completa de elementos isoparamétricos (como os típicos elementos estruturais como vigas, interfaces, molas, etc.)
- Geometria baseada em condições de contorno/fronteira
- Pós-processamento da malha usando pontos físicos, linhas, superfícies ou volumes, assim como refinamento da malha 2D e 3D
- No que respeita aos modelos disponíveis no programa, este inclui:
 - o Elasticidade: modelos isotrópicos e modelos transversalmente isotrópicos
 - o Elasto-plasticidade: modelos de Von-Misses, Mohr-Coulomb e Gurson

O TOCHNOG implementa domínios computacionais em 1, 2 e 3D ou axi-simétrico, cada um consistindo em elementos finitos conectados por nós. Contudo, ao contrário de outros programas de elementos finitos, todos os campos são contínuos ao longo do domínio considerado. Essa continuidade apresenta um esquema numérico mais difuso e mais estável, com a adicional vantagem de que os campos são armazenados não nos pontos de integração mas nos nós de cálculo. Assim, a implementação de uma nova malha e das técnicas de refinamento da malha torna-se mais fácil.

Nos estudos realizados nos capítulos 4 e 5, para avaliar a estabilidade de taludes, recorre-se a este programa, pois permite avaliar a influência da variabilidade no comportamento da estrutura, utilizando a técnica dos campos estocásticos para a sua modelação numérica. Para implementar a metodologia de uma abordagem estocástica é utilizada a teoria dos campos aleatórios que permite simular a variabilidade espacial, tendo em conta o comprimento de correlação. Na geração desses campos estocásticos o programa recorre ao método baseado na decomposição da matriz de correlação de Cholesky (Roddeman, 2014). A descrição pormenorizada sobre o tema da variabilidade espacial, englobando a técnica dos campos estocásticos, a teoria dos campos aleatórios e o comprimento de correlação encontra-se no subcapítulo 4.1.6.

3.2.3. Método das diferenças finitas

- **FLAC e UDE** são programas bidimensionais de diferenças finitas desenvolvidos especificamente para análise geomecânica. Estes programas podem simular variações de carregamentos e pressões intersticiais e têm diversos modelos pré-definidos para representação do comportamento da massa rochosa.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS PROBABILÍSTICOS NA ESTABILIDADE DE TALUDES

O uso das análises probabilísticas na engenharia geotécnica tem crescido progressivamente. No entanto, a sua aplicação prática ainda é um grande desafio, pois normalmente os dados de campo disponíveis são escassos para realizar uma análise probabilística adequada.

Esta abordagem baseia-se em alguns princípios dos métodos determinísticos mas tem como vantagem possibilitar a introdução explícita das incertezas inerentes ao problema, fornecendo resultados sobre os parâmetros que mais o condicionam.

O objetivo é permitir que os engenheiros (profissionais do sector) possam combinar a prática tradicional, a experiência e o julgamento da engenharia com a quantificação estatística da incerteza, a fim de se obter um critério aceitável.

Este tipo de análise é relevante para a confecção de mapas de risco de rotura, mapas de ocupação e aproveitamento de solos, entre outros. Os métodos probabilísticos são também aplicados em estudos de estabilidade de taludes, com o intuito de quantificar algumas incertezas inerentes ao fator de segurança (FS) obtido por métodos determinísticos.

4.1. INCERTEZAS

A incerteza é uma das características principais da geotecnia e da geologia. Os engenheiros podem lidar com a incerteza ignorando-a, sendo conservadores, usando o método da observação, ou quantificando-a (Christian, 2004).

Nos últimos anos as análises de fiabilidade (AF) e os métodos probabilísticos possibilitaram a introdução explícita das incertezas inerentes ao estudo. Assim, é possível obter resultados sobre os parâmetros que mais condicionam o problema, fornecendo desta forma, informações adicionais de modo a ser possível melhorar em questões de segurança e funcionamento no decorrer da obra (Lacasse & Nadim, 1998).

4.1.1. Fontes de incerteza

As fontes de incertezas dependem do tipo de estudo e do tipo de questões a que se pretende responder. As incertezas podem ser descritas, através das seguintes definições (Schweiger & Peschl, 2005):

- **Incerteza aleatória ou estatística:** incertezas que resultam do fato dos parâmetros se comportarem de forma aleatória (estocásticos, incerteza objetiva também conhecida como variabilidade espacial).
- **Incerteza epistémica ou sistemática:** incertezas que resultam da falta de conhecimento sobre os parâmetros não os conseguindo controlar inteiramente.

Estes dois tipos de incertezas têm de ser tratados de formas diferentes. Em grande parte dos problemas que os engenheiros geotécnicos ou geológicos enfrentam, as incertezas são epistêmicas e não aleatórias (Christian, 2004).

4.1.2. Classificação das incertezas

Nos problemas de AF, as incertezas na estabilidade de taludes podem ser divididas em quatro categorias: incerteza física, incerteza estatística, incerteza no modelo e incerteza humana (Der Kiureghian, 1989).

- As **incertezas físicas** estão associadas às propriedades dos materiais, à sua geometria, variabilidade e simultaneidade de diferentes ações. Estas podem ser estimadas através de observações/problemas semelhantes, da própria experiência de quem está a analisar e de dados históricos.
- A **incerteza estatística** está relacionada com as limitações físicas. Provêm sobretudo da insuficiência na recolha de dados ou falta de homogeneidade dos resultados ou amostras.
- A **incerteza nos modelos** refletem a impossibilidade que qualquer modelo adotado tem de descrever com rigor absoluto o comportamento real do sistema, levando à aproximação de teorias e simplificações.
- A **incerteza humana** diz respeito ao próprio erro humano, desde a execução de técnicas de ensaio, ao registo de dados e dimensionamento e utilização da própria estrutura. Estas incertezas são inevitáveis, mas devem ser reduzidas tanto quanto possível, e as inevitabilidades serem tratadas da melhor forma.

4.1.3. Variáveis aleatórias em geotecnia

Os parâmetros geotécnicos que representam as principais fontes de incerteza são tratados como variáveis aleatórias (VA), isto é, os parâmetros deixam de ser caracterizados com um valor único e determinístico para passar a assumir um qualquer valor dentro de um intervalo e uma probabilidade de ocorrência. As VA são definidas pela média, desvio padrão e correlação entre propriedades do solo.

Para além disso, o comprimento de correlação descreve a variabilidade espacial de uma certa propriedade do solo na direção horizontal e/ou vertical, sendo uma característica importante pois pode contribuir para uma redução da incerteza dessa propriedade.

De modo a definir todos estes parâmetros é necessário uma grande quantidade de dados experimentais sobre as propriedades do solo *in situ* e por meio de ensaios de laboratório (Suchomel & Mašín, 2009).

Existem inúmeras VA, como coesão, ângulo de atrito e peso volúmico, entre outras. Para ter uma boa perceção das mais relevantes para o caso em estudo pode recorrer-se a uma análise de sensibilidade, de forma a identificar quais as variáveis mais condicionantes. Esta análise é fundamental, pois tal como Baecher & Christian (2003) afirmam, apenas as variáveis mais importantes e influentes vale a pena considerar.

As VA devem ser construídas de modo a contabilizar todo o tipo de incertezas relevantes na análise da obra geotécnica. É possível modelar as incertezas nas VA atribuindo às mesmas uma função distribuição (tipo de distribuição) e as suas características distributivas (forma da distribuição) estimado com base nas estatísticas (El-Ramly et al., 2002).

Nas AF geotécnicas consideram-se normalmente variáveis contínuas, assumindo um intervalo de valores contínuo, com uma probabilidade associada, definida pela função densidade de probabilidade (FDP) que usualmente assumida como Normal ou Lognormal (Teixeira et al., 2012).

4.1.4. Funções de distribuição

As análises de fiabilidade têm como primeiro passo recolher os dados necessários para se obter uma função densidade de probabilidade (FDP) representativa de cada parâmetro que representa uma incerteza. Por vezes a seleção do tipo, ou forma, da distribuição pode ser baseada na simplificação dos cálculos (Li et al., 2012). Vários autores como Šejnoha et al.,

(2007); Baecher & Christian (2003) e Liang et al, (1999) estudaram esta questão do tipo e forma da distribuição das variáveis aleatórias.

A forma da distribuição é definida pela média e o desvio padrão, sendo estes valores medidas estatísticas clássicas usadas para descrever variáveis aleatórias. De seguida são apresentadas algumas medidas estatísticas fundamentais:

- **Média da variável aleatória:** Para uma variável aleatória x , com uma FDP definida pela função $f(x)$, a média (μ_x) é definido por:

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

- **Variância da variável aleatória:** A variância (Var) mede a dispersão ou a incerteza dos dados sobre o valor médio e é calculado por:

$$\text{Var} [x] = \sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad (4.2)$$

- **Desvio padrão da variável aleatória:** O desvio padrão (σ_x) é definido como a raiz quadrada da Var:

$$\sigma_x = \sqrt{\text{Var} [x]} \quad (4.3)$$

- **Coefficiente de variação da variável aleatória:** As propriedades da variabilidade do solo são geralmente expressadas pelos parâmetros conhecidos como o coeficiente de variação (Cov), o qual é o quociente entre o desvio padrão e a média, como descrito por:

$$\text{Cov} [x] = \frac{\sigma_x}{u_x} \quad (4.4)$$

É necessário assumir um tipo de distribuição específico para cada variável aleatória. Como referido, normalmente assume-se um tipo de distribuição Normal ou Lognormal (Figura 4.1), apesar de existirem muitos outros como Binomial Geométrica, Exponencial, Gama, Beta, entre outras.

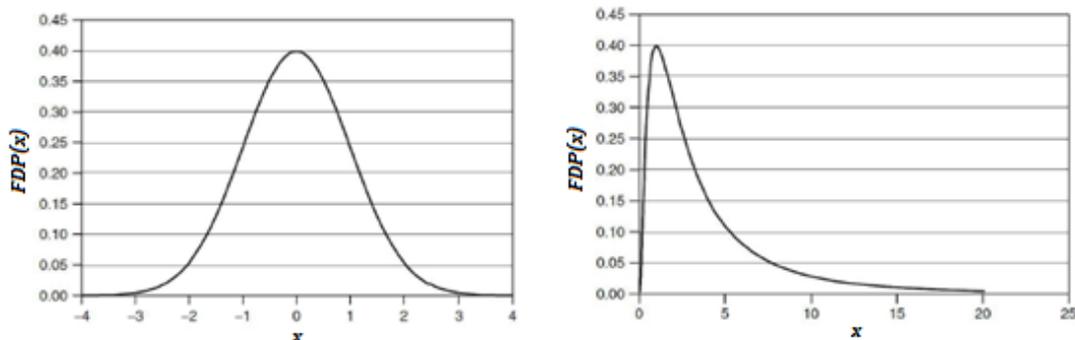


Figura 4.1 – Exemplo de uma distribuição Normal, à esquerda, e uma distribuição Lognormal, à direita (adaptado de Baecher & Christian, 2003).

- A FDP para a **distribuição Normal** de média (μ), e desvio padrão (σ), é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (4.5)$$

A distribuição Normal é simétrica em relação ao valor médio, e a variável aleatória pode assumir valores entre $-\infty$ e $+\infty$.

- Uma variável aleatória x tem **distribuição Lognormal**, com uma média (μ) e um desvio padrão (σ), quando o seu logaritmo natural $\ln(x)$, é distribuído normalmente. A FDP de uma distribuição Lognormal é dada pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{1}{\zeta \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x)-\lambda}{\zeta} \right)^2} \quad (4.6)$$

Considerando que x é uma variável aleatória com distribuição Lognormal, que tem um valor médio λ e desvio padrão ζ .

$$\mu = e^{\lambda + \frac{1}{2} \cdot \zeta^2}; \sigma = \mu \cdot \sqrt{e^{\zeta^2} - 1} \quad (4.7)$$

$$\lambda = E[\ln(x)]; \zeta = \sqrt{Var[\ln(x)]} \quad (4.8)$$

O intervalo da distribuição Lognormal encontra-se entre zero e infinito, portanto ao contrário da Normal, esta não inclui valores negativos.

Na Figura 4.2 é possível ver a diferença entre as FDP Normal e Lognormal.

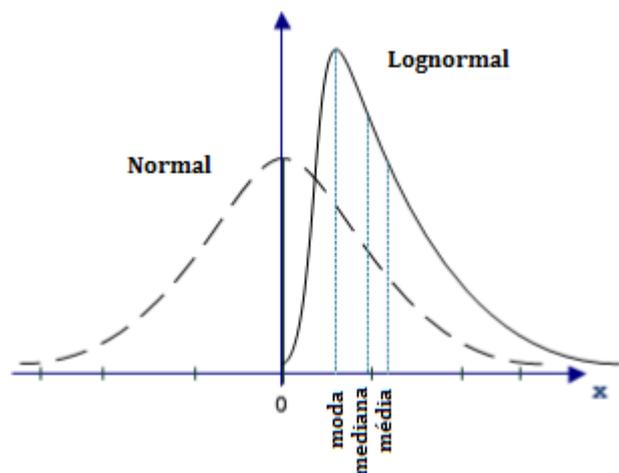


Figura 4.2 - Curvas de frequência de distribuição Normal e Lognormal (adaptado de Teixeira, 2012)

Uma forma de ter uma melhor percepção dos resultados obtidos é recorrer à construção de um histograma que é um importante indicador da distribuição de dados.

O histograma é um gráfico de barras que quantifica um conjunto de dados previamente definidos que se encaixam dentro de um determinado intervalo. A base de cada barra representa um intervalo e a altura representa a quantidade ou frequência com que o valor desse intervalo ocorreu no conjunto de dados. A distribuição de frequências é construída a partir de um histograma pela divisão de cada barra vertical pelo número total de dados. Com isto, obtém-se a frequência relativa dos valores observados em cada intervalo. A distribuição de frequência cumulativa é definida como uma linha contínua e representa o número de dados com um valor menor ou igual a um valor em análise. Na Figura 4.3 é apresentado um exemplo de um histograma.

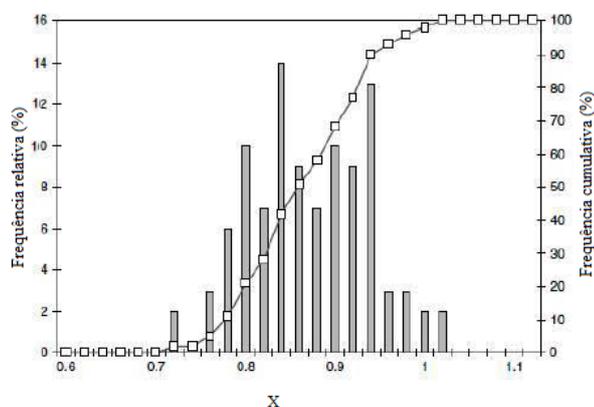


Figura 4.3 – Exemplo de um histograma (adaptado de Afonso, 2012)

4.1.5. Teorema de Bayes

Na engenharia geotécnica é comum utilizar o método observacional para lidar com as incertezas. Nas verificações de segurança, considerar as incertezas significa introduzir o conhecimento probabilístico dos fenómenos inerentes ao sistema. Assumindo os caracteres probabilísticos nas grandezas de interesse usa-se a definição probabilística de Bayes (Papaioannou & Straub, 2012).

O teorema de Bayes defende que na falta de conhecimento os parâmetros deverão ser assumidos como variáveis probabilísticas, sendo essas ferramentas probabilísticas um meio de modelar as limitações do conhecimento, de modo a tentar ultrapassar a dificuldade de lidar com as incertezas na geotecnia.

Os trabalhos baseados na estatística pelo Teorema de Bayes podem ser usados como modelos de atualização, em que o objetivo não é só prever respostas mais precisas, mas também fornecer uma avaliação quantitativa da precisão. Isto torna possível a escolha dos parâmetros mais influentes (Beck & Katafygiotis, 1998).

No entanto em alguns estudos, para quantificar explicitamente o efeito das incertezas inerentes aos parâmetros mais influentes, a análise de Bayes apenas fornece resultados equivalentes aos obtidos nas análises de sensibilidade (Wang, Cao, & Au, 2010).

Os princípios e metodologias usados numa análise de dados que provém de uma probabilidade subjetiva são designados de estatística Bayesiana. O processo de aplicação da técnica Bayesiana inicia-se com uma dada distribuição de probabilidade para cada variável. Os valores assumidos para os parâmetros são baseados na experiência e conhecimento existente. A incerteza dos parâmetros é representada por esta distribuição inicial. Quando se obtêm novas informações, estas são utilizadas para atualizar a distribuição inicial numa distribuição posterior através do teorema de Bayes (Miranda et al., 2008).

Na perspetiva Bayesiana a probabilidade de dado evento é formulada como o grau de confiança que se tem na ocorrência desse evento. Nesta análise considera-se que um parâmetro pode ter uma distribuição de valores possíveis e a FDP reflete o grau de confiança de onde o valor real (desconhecido) do parâmetro possa estar, ao contrário da abordagem tradicional que assume um parâmetro como uma grandeza fixa mesmo que desconhecida (Miranda et al., 2008)

4.1.6. Variabilidade espacial dos parâmetros do solo

As propriedades mecânicas de um solo têm uma dispersão acentuada que vem da sua inerente variabilidade espacial. A variabilidade espacial é a variação real das propriedades do solo de um ponto no espaço para outro, e pode ocorrer dentro de uma camada suposta homogênea (Suchomel & Mašín, 2009; Cho, 2007).

Uma das muitas fontes de heterogeneidade é a variabilidade espacial intrínseca do solo. Esta é atribuída a fatores como a variação da composição mineralógica, condições durante a deposição, história de tensões e processos de decomposição físicos e mecânicos (Cho, 2007; El-Ramly et al., 2002).

Para ter em conta a variabilidade espacial dos parâmetros do solo é possível recorrer a uma abordagem estocástica que é capaz de modelar de forma realista as características do maciço espacialmente. Os métodos de simulação estocástica podem ser definidos de uma forma genérica, como procedimentos que envolvem a geração de números aleatórios com o objetivo de explorar o espaço de incerteza, ou campo de possibilidades, de um dado fenómeno físico, ou qualquer outro tipo de variável de estudo, cujo comportamento possa ser quantificado matematicamente. Na aplicação do modelo estocástico utiliza-se a técnica matemática dos campos aleatórios.

A teoria do campo aleatório é a técnica mais comumente utilizada para modelar a variabilidade espacial das propriedades do solo, em que o desvio de uma dada propriedade do valor médio é analisado com recurso a uma distribuição estatística adequada. As propriedades do solo podem ser descritas estocasticamente usando três parâmetros: média, desvio padrão (ou variância) e comprimento de correlação (Suchomel & Mašín, 2009; Cho, 2007; Babu & Mukesh, 2004).

A média e o desvio padrão são medidas estatísticas que não têm em consideração a correlação espacial, no entanto as variações inerentes nas propriedades de um solo de um local para o outro são espacialmente correlacionáveis e são controladas pela localização no espaço. A variabilidade espacial é então medida por meio do comprimento de correlação, que descreve a distância dentro da qual as propriedades do solo mostram forte correlação de ponto a ponto. Este pode ser descrito como a distância em que duas variáveis são significativamente correlacionáveis, considerando-se que dois pontos são pouco correlacionáveis se estiverem separados por uma distância maior do que o comprimento de correlação (Afonso, 2012).

Muitas das análises de fiabilidade de taludes retratadas na literatura, têm geralmente ignorado a correlação espacial das propriedades do solo, pois existem algumas dificuldades na

sua aplicação prática e pode ser um pouco dispendiosa, tornando as análises de fiabilidade bastante mais lentas. Alguns autores de estudos recentes que englobam este fator são Papaioannou & Straub (2012), Afonso (2012), Griffiths et al. (2011), Suchomel & Mašín (2009), Griffiths et al. (2008), Low et al. (2007), Babu & Mukesh (2004) e El-Ramly et al. (2002).

Avaliando os diversos estudos é possível afirmar que a correlação espacial das propriedades do solo afeta claramente a probabilidade de rotura (pf), pois esta pode diminuir significativamente com o aumento do comprimento de correlação, devendo-se isto ao facto de quanto maior o comprimento de correlação maior a homogeneidade do solo considerada no estudo proporcionando uma maior fiabilidade na previsão do comportamento.

Realizar análises probabilísticas sem considerar a correlação espacial fornece resultados conservativos, mas tecnicamente incorretos (Teixeira et al., 2012; Lacasse & Nadim, 1996).

A quantificação deste comprimento em engenharia geotécnica é, por vezes, bastante complicada devido aos inúmeros dados necessários. Porém, é possível ter uma noção da gama de valores atendendo aos estudos de diversos autores em que se pode observar que, dependendo da história geológica e composição do solo, o comprimento de correlação na direção horizontal é muito maior do que o vertical (Suchomel & Mašín, 2009).

O valor do comprimento de correlação é pouco documentado na literatura, relativamente a outras propriedades estatísticas como a média e desvio padrão. No entanto (Phoon & Kulhawy, 1999), registaram alguns valores do comprimento de correlação, conforme resumido na Tabela 4.1. É possível observar que os comprimentos de correlação verticais geralmente variam entre 0.1 e 12.7m, enquanto na horizontal variam ente 3 e 70m.

Tabela 4.1 – Resumo do Comprimento de Correlação de algumas propriedades geotécnicas (adaptado de Phoon & Kulhawy, 1999).

Parâmetro do solo	Símbolo	Tipo de Solo	Nº de Estudos	Comprimento de Correlação (m)	
				Intervalo	Valor médio
Direção Vertical					
Resistência não drenada	Su	Argila	5	0.8 – 6.1	2.5
Resistência de ponta CPT	qc	Areia, Argilas	7	0.1-2.2	0.9
Resistência de ponta corrigida CPT	qc	Argila	10	0.2-0.5	0.3
Resistência não drenada	Su (FVT)	Argila	6	2.0-6.2	3.8

Parâmetro do solo	Símbolo	Tipo de Solo	Nº de Estudos	Comprimento de Correlação (m)	
				Intervalo	Valor médio
Número de pancadas SPT	N	Areia	1	-	1.6
Limite de plasticidade	W_p	Argila, Limo	3	1.6-12.7	5.7
Limite de liquidez	W_L	Argila, Limo	2	1.6-8.7	5.2
Peso volúmico	γ	Argila	1	-	1.6
Peso volúmico submerso	γ'	Argila, Limo	2	2.4-7.9	5.2
Direção Horizontal					
Resistência de ponta CPT	qc	Areia, Argila	11	3.0-80.0	47.9
Resistência de ponta corrigida CPT	qt	Argila	2	23.0-66.0	44.5
Resistência não drenada	S_u (FVT)	Argila	3	46.0-60.0	50.7
Limite de plasticidade	W_p	Argila	1	-	70.0

Su e S_u (FVT), resistência não drenada de ensaios de laboratório e ensaios de molinete, respetivamente.

4.1.7. Valores de referência das incertezas do solo

O conhecimento de todas as incertezas, em geral, é limitado, pois podem não estar disponíveis dados sobre o local específico em estudo, ou estes não serem suficientes para estimar a variabilidade do solo.

No entanto, na ausência de dados adequados, os parâmetros podem ser alcançados através da observação de valores normalmente utilizados na literatura, o mesmo acontece para a escolha do tipo de distribuição.

O coeficiente de variação (Cov) é um dos exemplos em que normalmente se recorre à literatura para determinar o seu valor. Lacasse & Nadim (1996) compilaram os valores reportados de Cov para uma ampla variabilidade de propriedades do solo (Tabela 4.2). Publicaram também uma tabela de sugestões de FDP e Cov para algumas propriedades do solo (Tabela 4.2)

Tabela 4.2 - Valores típicos para o Cov (adaptado de Lacasse & Nadim, 1996)

Parâmetro do solo	Símbolo	Cov%	Referência(s)
Peso volúmico	γ	3 – 8	Harr (1984), Kulhawy (1992), Wolff (1994).
Peso volúmico submerso	γ'	0 – 10	Lacasse e Nadim (1997), Duncan (2000).
Índice de vazios	e	7 – 30	Lacasse e Nadim (1997)
Ângulo de atrito efetivo (areias)	ϕ'	2 – 13	Harr (1984), Kulhawy (1992).
Ângulo de atrito efetivo (argilas)	ϕ'	10-50	Phoon e Kulhawy (1999)
Limite de liquidez (argilas)	W_L	3 – 20	Lacasse e Nadim (1997).
Limite de plasticidade (argilas)	W_P	3 – 20	Lacasse e Nadim (1997).
Resistência drenada (areias)	S	3.7 – 12	Schultze (1972), Wolff (1994).
Resistência drenada (argilas)	S	7.5 – 10	Wolff (1985).
Resistência não drenada	S_u	13 – 40	Fredlund e Dahlman (1972), Kulhawy (1992), Lacasse e Nadim (1997), Duncan (2000).
Índice de compressibilidade	C_c	10 – 37	Lacasse e Nadim (1997), Duncan (2000).
Tensão de pré-consolidação	σ_p	10 -35	Harr (1984), Kulhawy (1992), Duncan (2000).
Coef. de permeabilidade de argilas saturadas	k	68 -90	Harr (1984), Duncan (2000).
Coef. de permeabilidade de argilas não saturadas	k	130 – 240	Harr (1984), Benson et al (1999).
Coef. de consolidação vertical	c_v	33 – 68	Duncan (2000).
Número de pancadas SPT	N	15 – 45	Harr (1984), Kulhawy (1992).
Resistência de ponta CPT elétrico	q_c	5 – 15	Kulhawy (1992).
Resistência de ponta CPT mecânico	q_c	15 – 37	Harr (1984), Kulhawy (1992).
Resistência do ensaio dilatométrico	q_{DMT}	5 – 15	Kulhawy (1992).
Resistência ao corte não drenada do ensaio de molinete	S_u	10 – 20	Kulhawy (1992).
Módulo de elasticidade	E	2-42	Lee et al. (1983)

Tabela 4.3 - Valores típicos para o Cov e FDP (adaptado de Lacasse & Nadim, 1996)

Parâmetro do solo	Símbolo	Tipo de solo	FDP	Cov %
Resistência de ponta	q_c	Areia, argila	LN, N/LN	*
Resistência não drenada	S_u^{**}	Argila (triaxial)	LN	5 – 20
		Argila (S_u)	LN	10 – 35
		Limo argiloso	N	10 – 30
Limite de plasticidade	W_L	Argila	N	3 – 20
Limite de liquidez	W_P	Argila	N	3 – 20
Peso volúmico submerso	γ'	Todos os solos	N	0 – 10
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	Areia	N	2 – 13
Índice de vazios	E	Todos os solos	N	7 – 30

N/LN Distribuição Normal e Lognormal respetivamente.

* Os valores dependem do local e tipo de solo

** A S_u é anisotrópica e dependente do tipo de tensões impostas. O coeficiente de variação para os ensaios de boa qualidade (triaxial consolidado de compressão/extensão, corte direto simples, triaxial verdadeiro, deformação plana) deverá ser 5-20%.

4.2. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Os métodos probabilísticos possibilitam ter em conta as incertezas envolvidas na análise de estabilidade de taludes, de modo a avaliar com mais precisão os riscos associados à sua segurança.

Hoje em dia é possível executar uma análise probabilística, de forma rápida e eficiente, através de diversos programas de cálculo, tais como os descritos no capítulo 3.2.

A verificação da segurança de taludes é realizada através de AF, que geralmente se divide em cinco níveis (subcapítulo 1.4.1). Segundo o Eurocódigo 0 (CEN, 2002a), os métodos probabilísticos podem ser divididos em duas classes principais: métodos totalmente probabilísticos (nível III) e métodos de fiabilidade de primeira ordem, FORM (nível II).

Uma AF começa por definir-se o índice de fiabilidade (β) que está relacionado com a probabilidade de rotura (pf). Estes estão relacionados pela equação (4.9).

$$pf = \Phi(-\beta) \quad (4.9)$$

Em que Φ é a função cumulante da distribuição normal reduzida. Alguns valores recomendados segundo o Eurocódigo 0 (CEN, 2002a) para o β , em função da pf , estão indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores recomendados pelo Eurocódigo 0 (CEN, 2002a) para o índice de fiabilidade, considerando um tempo de vida útil de 50 anos

pf	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Como se pode verificar na Figura 4.4 à medida que a pf diminui o β aumenta, podendo dizer-se que são inversamente proporcionais.

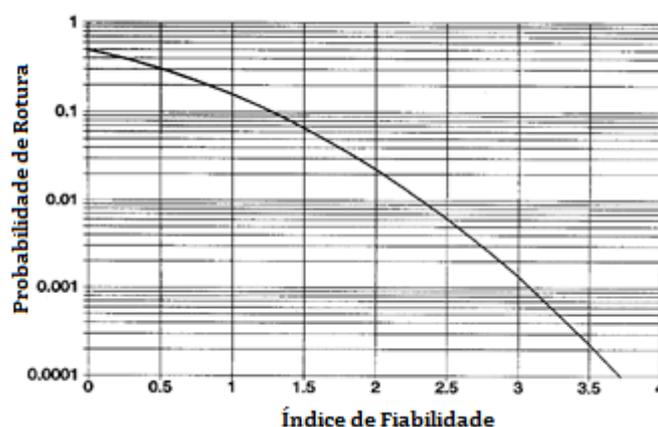


Figura 4.4 - Probabilidade de rotura vs Índice de fiabilidade para uma distribuição normal (adaptado de Christian et al., 1994)

A pf – equação (4.10) – pode expressar-se pela probabilidade relacionada com a função de desempenho (ou margem de segurança) – equação (4.11), a qual é obtida pela diferença entre a resistência (R) e as ações ou efeito das ações (E), considerando-se que se $g(x) \leq 0$ a rotura ocorre, se $g(x) > 0$ a estrutura está em segurança e $g(x) = 0$ é o estado limite.

$$pf = \text{Prob}(g \leq 0) \quad (4.10)$$

$$g(x) = R - E \quad (4.11)$$

Em que g , R e E são variáveis aleatórias.

Em geral as análises de pf começam por definir os dados para se obter uma função de probabilidade representativa, usualmente Normal ou Lognormal, de cada parâmetro que represente uma incerteza no estudo, ou daqueles que mais influenciam os resultados.

As FDP da resistência e das ações estão representadas na Figura 4.5 sendo possível observar que, quanto maior a distância entre os valores médios e menor desvio padrão (curvas mais estreitas), menor será a pf (área a sombreado diminui).



Figura 4.5 - Função densidade de probabilidade para Resistências (R) e Ações / Efeitos (E) (adaptado de Teixeira, 2012)

Christian et al. (1994) mostraram que nem sempre uma maior FDP tem uma menor pf . Concluíram que, uma análise exclusiva do FS através de métodos determinísticos, poderia levar a informações falaciosas.

Como se pode observar através da Figura 4.6, um talude com um FS esperado ($E[FS]$) de 1.5 poderá ter maior pf do que um $E[FS]$ de 1.2, caso este tenha uma maior dispersão. Assim, verifica-se que nem sempre obter um FS é suficiente para apurar a segurança de um talude.

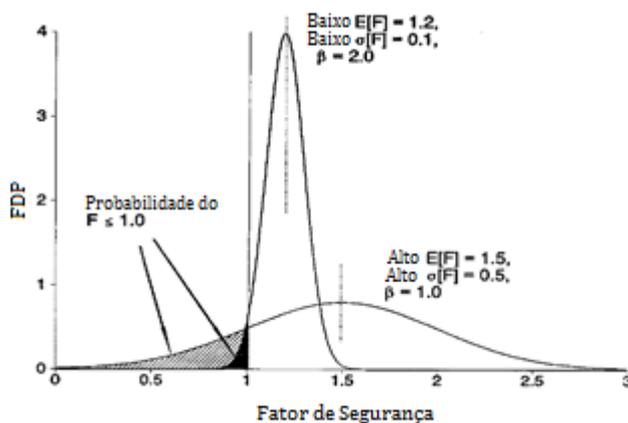


Figura 4.6 - Função densidade de probabilidade e probabilidade de rotura (adaptado de Christian et al., 1994)

Vários estudos (Johari & Javadi, 2012; Griffiths et al., 2011; Huang et al., 2011; Suchomel & Mašín, 2009; Griffiths et al., 2010; Honjo et al., 2010; Wang et al., 2010; Griffiths et al., 2008; Cho, 2007; Low et al., 2007; Šejnoha et al., 2007; Fenton & Griffiths, 2005; Babu & Mukesh, 2004; El-Ramly et al., 2002; Christian et al., 1994) foram elaborados com base na abordagem probabilística para a análise da estabilidade de taludes e todos eles mostram quão importante é ter este tipo de abordagem em consideração.

4.2.1. Métodos probabilísticos aproximados

A AF de nível II diz respeito a métodos probabilísticos aproximados como o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM) e o método de fiabilidade de primeira ordem (FORM), que se encontram descritos de seguida.

- **FOSM** (*first order second moment method*): O método denomina-se de primeira ordem porque só usa a primeira derivada da série de Taylor e segundo momento porque tem em conta a variância (segundo momento estatístico) (Johari & Javadi, 2012). É também referido na literatura como método do valor médio de primeira ordem e dos segundos momentos (MVFOSM) (Cornell, 1969)

A exatidão desta técnica pode ser questionável quando se lida com relações não lineares e variabilidades acentuadas dos parâmetros do solo, devido ao truncamento da primeira derivada das séries de Taylor. Quanto maior é a não linearidade da função de performance, menor é a precisão deste método (Abbaszadeh, Shahriar, Sharifzadeh, & Heydari, 2011).

Hasofer & Lind (1974) propuseram uma metodologia com uma definição invariável relativamente à forma da função de estado limite do β , possibilitando a avaliação da segurança pela ordenação dos valores deste índice, ultrapassando assim uma das limitações do FOSM que impossibilita uma avaliação da segurança com base na grandeza relativa dos valores do β .

- **FORM** (*first order reliability method*): O método de fiabilidade de primeira ordem é um método aproximado, mas para a maioria das aplicações estruturais, os seus resultados são considerados rigorosos. Por vezes, este método é designado por AFOSM (método avançado de primeira ordem segundo momento).

O FORM é um dos métodos mais utilizados nas análises de fiabilidade, apesar de ter algumas limitações quando as funções de desempenho são complexas e não é possível aproximar distribuições normais aos resultados. (Teixeira et al., 2012).

A evolução desta técnica deve-se a diversos investigadores como Johari & Javadi (2012), Griffiths et al. (2011), Wu (2009), Christian et al. (1994) e Hasofer & Lind (1974), entre outros.

O primeiro passo do FORM passa por transformar todas as VA básicas X_i correlacionáveis e/ou com distribuições não normais em VA Y_i não correlacionáveis com distribuições normais, com média zero e desvio padrão unitário. Dependendo das características apresentadas pelas VA básicas de cada problema deve utilizar-se o método de transformação mais adequado (Griffiths et al., 2011).

O β é a distância entre a origem e o ponto y^* , em que y^* corresponde ao ponto de rotura mais provável (Figura 4.7).

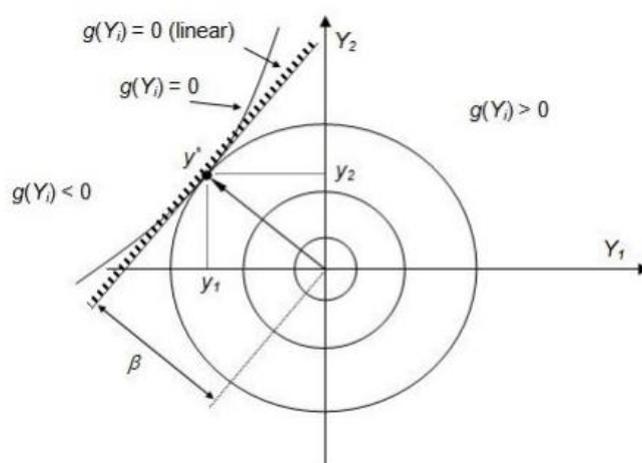


Figura 4.7 - Transformação da função de estado limite no espaço das variáveis normais reduzidas

As análises de fiabilidade de nível II têm como vantagens obter de forma explícita a influência de cada variável na segurança do talude e não necessitam do conhecimento da FDP das variáveis aleatórias. No entanto, têm como desvantagem poder levar a mais do que um resultado da pf para o mesmo problema (Griffiths et al., 2011). Na função de performance é normalmente assumida uma FDP com distribuição normal.

Como referido, a precisão destes métodos probabilísticos aproximados depende da linearidade da função de desempenho, bem como da magnitude das incertezas associadas às variáveis aleatórias. Estes métodos consideram correlação entre variáveis, mas não

consideram a variabilidade espacial, assumindo distâncias de autocorrelação infinitas para as propriedades do solo e partem do princípio que a superfície crítica é sempre na base da coluna de solo (Griffiths et al., 2008). Esta situação propicia, por vezes, a diminuição da precisão destes métodos.

4.2.2. Métodos probabilísticos exatos

O método de Monte Carlo (MC) encontra-se dentro dos métodos totalmente probabilísticos, também designados como métodos probabilísticos exatos. Ele é tão mais preciso quanto maior o número de simulações consideradas de um determinado acontecimento, aproximando-se assim, dos resultados exatos.

Neste ponto apenas se fará referência ao método de MC o qual será utilizado na análise dos casos de estudo dos taludes infinitos. Além de ser de fácil compreensão, o método de MC é também adaptável a diferentes tipos de situações, sendo uma das técnicas de simulação normalmente mais utilizada na análise probabilística de estabilidade de taludes (Wang et al., 2010).

Este método exige o conhecimento das funções de probabilidade das VA. Em cada simulação é atribuído um valor a cada variável aleatória, utilizando geradores de números aleatórios, mediante a distribuição de probabilidade admitida e obtém-se um resultado da função de performance que é armazenado (Cho, 2007). Depois de várias simulações é construído um histograma com os dados armazenados de cada análise

Com isto, é possível definir a FDP de rotura, de modo a posteriormente se calcular a pf e o β , com a rotura do talude definida para um FS menor que 1.0.

Existem certos inconvenientes nestas simulações no caso de ser necessário calcular probabilidades associadas a eventos pouco habituais, pois é necessário um elevado número de simulações. Assim o método de MC pode tornar-se de difícil aplicação nas análises que envolvem modelos de elementos finitos, devido ao grande tempo computacional de cada cálculo.

Outra desvantagem está no facto de este tipo de simulações poderem ficar complicadas quando as VA básicas são correlacionadas, principalmente pela dificuldade para gerar valores aleatórios que preservem essa correlação entre as variáveis. A variabilidade espacial raramente é estudada nas simulações de MC (Wang et al., 2010).

Porém, uma vantagem é o facto da complexidade da análise não ser amplificada pelo incremento do número de variáveis aleatórias, fornecendo melhores resultados quanto maior o número de simulações.

Normalmente o método de MC é mais preciso que os descritos anteriormente (Teixeira et al., 2012). Este método proporciona uma distribuição de probabilidade de resultados possíveis e, portanto, dá uma visão muito mais abrangente do que pode acontecer (Johari & Javadi, 2012).

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE FIABILIDADE APLICADA A UM TALUDE INFINITO

5.1. INTRODUÇÃO

As análises de fiabilidade em obras geotécnicas estão relacionadas com o estudo das várias incertezas que envolvem o problema. Como já foi mencionado anteriormente, é fundamental considerar essas incertezas no contributo para a análise de estabilidade de taludes. Assim, neste capítulo é apresentado o estudo de um caso teórico, relativo a um talude infinito, com o intuito de verificar qual a influência das incertezas e da variabilidade dos parâmetros geotécnicos e da geometria na sua segurança.

Para analisar a influência das incertezas e da variabilidade associada ao talude infinito, recorreu-se ao método de MC (Monte Carlo) e ao programa TOCHNOG. Os resultados obtidos são comparados com os da abordagem tradicional determinística.

As análises determinísticas e de MC foram realizadas para dois taludes, em condições drenadas, com as mesmas características mas diferentes alturas (5m e 10m), nas quais se avaliou a inclinação e altura do talude e os seus parâmetros de resistência: coesão efetiva do solo (c'), ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ') e peso volúmico do solo (γ). No que diz respeito à análise estocástica apenas se considerou um talude de 5m e os parâmetros avaliados foram a coesão efetiva do solo (c') e o ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ'). No final realizou-se uma análise determinística e estocástica, para perceber a influência da presença de nível freático no talude, dado este ser um fator muito relevante para a sua estabilidade.

Estes taludes são formados essencialmente por argila que foi considerada como um material homogêneo. A geometria inicial adotada para o talude com altura de 10m e 5m encontra-se representada na Figura 5.1

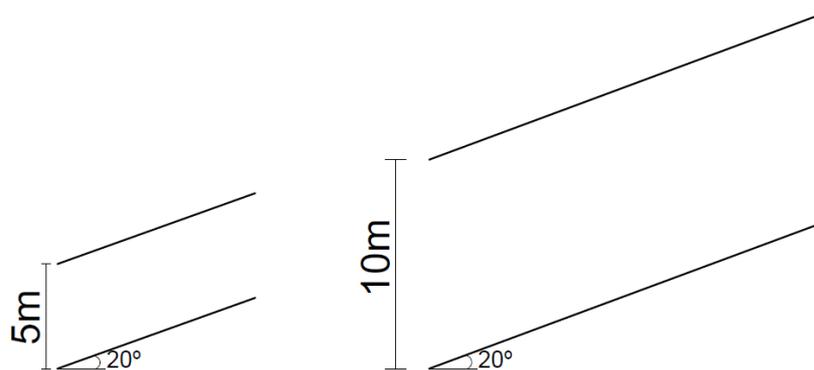


Figura 5.1 – Geometria dos taludes para a altura de 10m e 5m

Os valores das variáveis assumidos para a média (μ), desvio padrão (σ) e tipo de distribuição foram definidos segundo (Johari & Javadi, 2012) (Tabela 5.1). Verifica-se que os valores de Cov e tipo de distribuição definidos nesta tabela se encontram de acordo com os valores compilados anteriormente nas tabelas Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 5.1 - Parâmetros avaliados e respetiva média, desvio padrão e coeficiente de variação (adaptado de Johari & Javadi, 2012).

	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	α (°)	h (m)	
μ	15.00	18.00	20.00	20.00	10.00	5.00
σ	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	1.00
$Cov=\sigma/\mu$	0.20	0.06	0.15	0.05	0.20	0.20
Tipo de distribuição	Normal					

5.2. MÉTODO DETERMINÍSTICO

Numa primeira fase, efetuou-se uma análise de estabilidade do talude, através de uma abordagem determinística, utilizando o método do talude infinito, que se traduz pela equação (5.1).

$$FS = \frac{c' + \gamma \cdot h \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \tan(\phi')}{\gamma \cdot h \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} \quad (5.1)$$

Esta abordagem pressupõe que obter um FS superior a 1.0 deve ser suficiente para garantir a segurança da estrutura, e quanto maior o valor do FS maior a estabilidade da estrutura.

Adotando a equação (5.1) e os valores da Tabela 5.1, obtém-se os resultados apresentados de seguida.

Talude de 10m

$$FS = \frac{15+18 \times 10 \times \cos^2(0.349066) \times \operatorname{tg}(0.349066)}{18 \times 10 \times \operatorname{sen}(0.349066) \times \cos(0.349066)} = 1.26 \quad (5.2)$$

Talude de 5m

$$FS = \frac{15+18 \times 5 \times \cos^2(0.349066) \times \operatorname{tg}(0.349066)}{18 \times 5 \times \operatorname{sen}(0.349066) \times \cos(0.349066)} = 1.52 \quad (5.3)$$

Com a análise determinística, conclui-se que ambos os taludes se encontram em segurança. Comparando os resultados obtidos para os dois taludes, como era previsível, o talude de 10m tem um FS inferior ao de 5m. Avaliando o FS relativamente à Tabela 2.3, verifica-se que o talude de 5m cumpre as condições necessárias ($FS > 1.3$) para situações em que exista um elevado risco de perda de vidas humanas em caso de rotura do talude, enquanto o talude de 10m apenas se pode considerar em segurança para situações em que o risco de perda de vidas humanas em caso de rotura seja médio ($FS > 1.2$).

5.3. MÉTODO DE MONTE CARLO

Foi realizada uma análise probabilística, usando simulações de MC. Este método é de simples e fácil aplicação, não requer um conhecimento matemático e estatístico profundo e fornece bons resultados sobre a influência das incertezas dos parâmetros avaliados na segurança do talude. Considerando que as principais características geotécnicas do solo são totalmente independentes entre si, o método apenas exige o conhecimento das funções de probabilidade das VA (variáveis aleatórias), caracterizadas pelos seus momentos estatísticos: média e desvio padrão (Tabela 5.1).

Na realização desta análise recorreu-se ao EXCEL, no qual foram executadas 30,000 simulações e calculado o respetivo FS para cada uma delas. No cálculo do FS utilizou-se a mesma expressão analítica empregue no método determinístico (equação (5.1)). Seguidamente, foi realizado o somatório de todos os casos em que o FS deu inferior a 1.0 (n°

de roturas). Com isto, foi possível calcular a pf e o respetivo β do talude. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.2.

O número de roturas ($FS < 1$) obtido para o talude com altura de 5m é muito inferior ao alcançado no talude de 10m. A pf é assim mais baixa no caso do talude de 5m, ($pf=0.0058$), do que no talude de 10m ($pf=0.071$).

O β , como seria de esperar, é mais alto no talude com 5m ($\beta= 2.52$), do que no talude de 10m ($\beta=1.47$). Recorrendo à literatura (CEN, 2002a) verifica-se que o valor de β se deveria encontrar entre 3 e 4 para garantir a segurança de um talude, no entanto os valores de β determinados estão abaixo do valor recomendado, o que poderá indicar que os taludes terão problemas.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos para a pf e β do talude de 10m e 5m

Nº de roturas (FS<1) em 30,000 simulações	pf	β
Talude 10m		
2132	0.0711	1.4679
Talude 5m		
174	0.0058	2.5241

De forma a ter uma melhor visualização dos resultados obtidos recorreu-se à construção das curvas de Gauss dos FS. De seguida é apresentada a distribuição de frequências (Figura 5.2) e a respetiva função densidade cumulativa (Figura 5.3) para os dois taludes analisados.

Através da análise das curvas de Gauss, é possível constatar que o valor que mais se repete é de 1.25 para o talude de 10m e de 1.51 para o talude de 5m. Tal como se observa na Figura 5.2 estes valores são muito próximos dos conseguidos através do método determinístico.

No gráfico da distribuição de frequências cumulativas, observa-se que a probabilidade do FS ser menor do que 1 para o talude de 10m é de cerca 0.07, enquanto para o de 5m é aproximadamente 0.005.

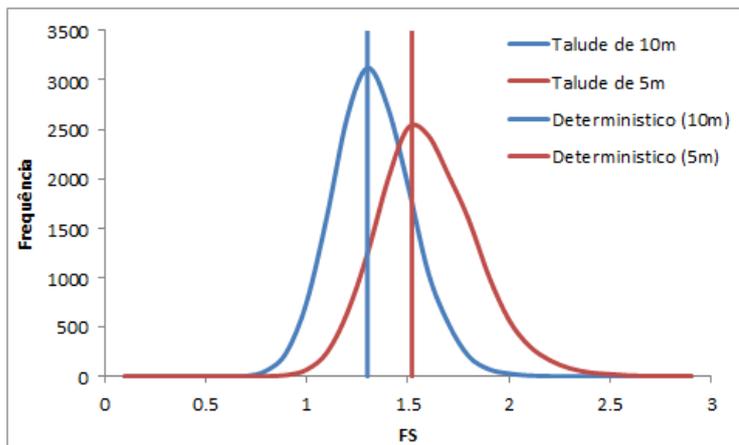


Figura 5.2 – Curvas de Gauss do FS

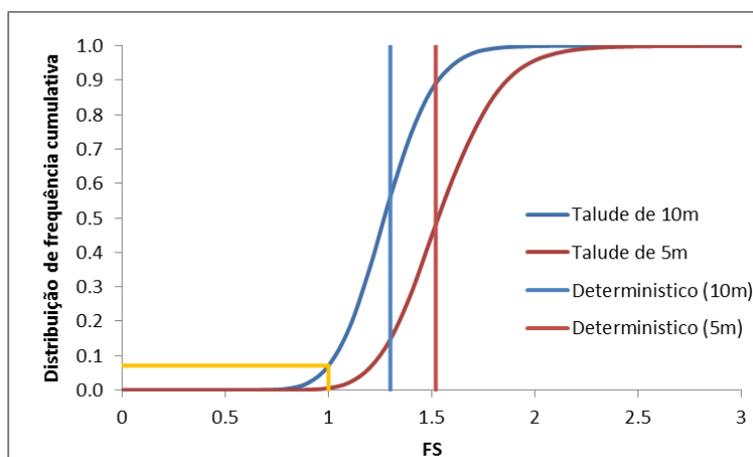


Figura 5.3 – Função densidade cumulativa do FS

5.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para avaliar a influência que cada uma das VA, coesão, ângulo de atrito e peso volúmico, têm na estabilidade do talude, realizou-se uma análise de sensibilidade. Na realização desta análise, procedeu-se sucessivamente, à alteração do valor de um parâmetro, mantendo todos os outros constantes. Assim, foram realizadas três análises começando pelo método determinístico no qual se utilizou a expressão analítica (5.1) e seguidamente recorreu-se ao método de Monte Carlo no qual se manteve o número de simulações anteriores (30,000 simulações).

Os valores médios utilizados nestas análises, para cada uma das VA, encontram-se na Tabela 5.3 sendo os restantes dados necessários iguais aos anteriores (indicados na Tabela 5.1). Os valores sombreados a cinzento correspondem ao parâmetro que está a ser variado em cada uma das análises.

Tabela 5.3 – Valores médios dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade

	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)
1ª análise (ϕ')	15.00	18.00	18.00
2ª análise (c')	12.00	18.00	20.00
3ª análise (γ)	15.00	16.00	20.00

Os resultados obtidos para a análise determinística encontram-se na Tabela 5.4, na qual se constatou que apesar da alteração dos valores dos parâmetros os taludes continuam estáveis em qualquer uma das análises. Contudo, o talude de 10m, na 1ª análise (variação do ângulo de atrito) passa a ter um FS inferior a 1.2. Assim segundo a Tabela 2.3 deixa de ser considerado seguro para um caso de risco médio de perda de vidas humana aquando da rotura do talude e passa apenas a ser indicado para uma situação com um risco desprezível. No caso do talude de 5m, em qualquer uma das análises verifica-se que o talude se pode considerar seguro perante riscos elevados de perdas de vidas humanas em caso de rotura.

Tabela 5.4 – Fatores de Segurança obtidos na análise de sensibilidade

	FS			Análise inicial
	1ª análise (ϕ')	2ª análise (c')	3ª análise (γ)	
Talude 10m	1.15	1.21	1.29	1.26
Talude 5m	1.41	1.41	1.58	1.52

De modo a conseguir ter uma melhor perceção da influência dos parâmetros na segurança dos taludes, calculou-se a variância do FS, recorrendo ao método FOSM.

O valor da média e do desvio padrão das variáveis, encontrados na Tabela 5.5, é o mesmo que o utilizado anteriormente nos subcapítulos 5.2 e 5.3. A variação da média e do FS corresponde à diferença dos valores entre a análise inicial e os assumidos/obtidos, para a análise de sensibilidade. O valor da variância da média é obtido calculando o desvio padrão ao quadrado. Quanto à variância do FS, os valores foram colocados em percentagem e construído o gráfico apresentado na Figura 5.4, que permite uma fácil visualização dos resultados alcançados.

Tabela 5.5 – Variância do Fator de Segurança para os taludes de 10m e 5m

μ	Varição de μ ($d\mu$)	Varição de FS (dFS)	$dFS/d\mu$	σ	$Var(\mu)$	$Var(FS) = (dFS/d\mu)^2 \times Var(\mu)$		
Talude de 10m								
ϕ' (°)	20	-2	0.11	-0.055	3	9	0.0272	82.3%
c' (Kpa)	15	-2	0.05	-0.025	3	9	0.0056	17.0%
γ (KN/m ³)	18	-2	-0.03	0.015	1	1	0.0002	0.7%
Talude de 5m								
ϕ' (°)	20	-2	-0.11	-0.055	3	9	0.0272	49.2%
c' (Kpa)	15	-2	-0.11	-0.025	3	9	0.0272	49.2%
γ (KN/m ³)	18	-2	0.06	0.03	1	1	0.0009	1.6%

Na Figura 5.4 é possível observar a influência de cada VA na análise de estabilidade dos dois taludes. Verifica-se que o ângulo de atrito é a variável mais relevante no caso do talude de 10m, contribuindo cerca de 82% no cálculo da variância do FS. No que diz respeito à coesão, o seu impacto é limitado, afetando em cerca de 17% a variância do FS. Por outro lado, o peso volúmico praticamente não induz qualquer efeito na estabilidade do talude, contribuindo menos de 1% neste cálculo.

No talude de 5m verifica-se que o ângulo de atrito e a coesão têm a mesma importância na análise da estabilidade do talude. Cada uma destas variáveis contribui aproximadamente 49% no cálculo da variância do FS. O peso volúmico, à semelhança do caso anterior, tem um impacto muito reduzido na análise, notando-se que a sua influência é maior no talude de 5m do que no de 10m.

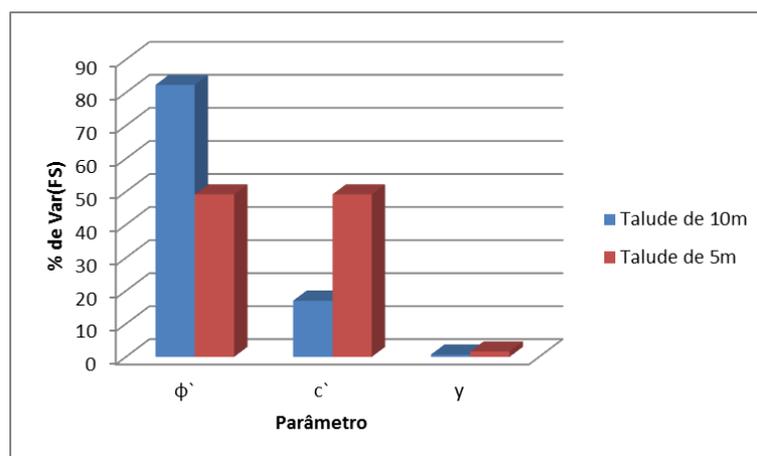


Figura 5.4 - Variância do FS

Na Tabela 5.6 constam os resultados obtidos para a pf e o β quando realizada a análise de sensibilidade, recorrendo ao método de MC. Este método foi executado, para cada uma das

análises, da mesma forma que o descrito no subcapítulo 5.3. Com os resultados obtidos na Tabela 5.6 foi construído o gráfico apresentado na Figura 5.5, por forma a facilitar a sua análise.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos para a pf e β na análise de sensibilidade

	Nº de roturas (FS<1) em 30,000 simulações	pf	B
1ª análise (ϕ')			
Talude 10m	5654	0.1885	0.8836
Talude 5m	699	0.0233	1.9899
2ª análise (c')			
Talude 10m	3552	0.1184	1.1830
Talude 5m	598	0.0199	2.0551
3ª análise (γ)			
Talude 10m	1608	0.0536	1.6109
Talude 5m	98	0.0033	2.7197
Análise inicial			
Talude 10m	2132	0.0711	1.4679
Talude 5m	174	0.0058	2.5241

Analisando a Figura 5.5 verifica-se que o ângulo de atrito é a variável com maior influência na estabilidade de ambos os taludes, sendo aquele que provoca um acréscimo maior na pf quando comparado com os valores da análise inicial. Relativamente à coesão, o seu efeito não é tão significativo como o do ângulo de atrito, contudo a sua influência é considerável, verificando-se que provoca também um aumento da pf .

De notar, que no estudo anterior para o talude com 5m de altura, se verificou que o ângulo de atrito e a coesão tinham o mesmo impacto na análise de estabilidade do talude e com o método de MC isso não se observa, sendo o ângulo de atrito a variável mais influente.

Quanto ao peso volúmico, como seria de esperar, ao contrário dos outros dois parâmetros em estudo, a redução do seu valor é benéfica para a estabilidade do talude. No entanto, é a variável menos influente nesta análise.

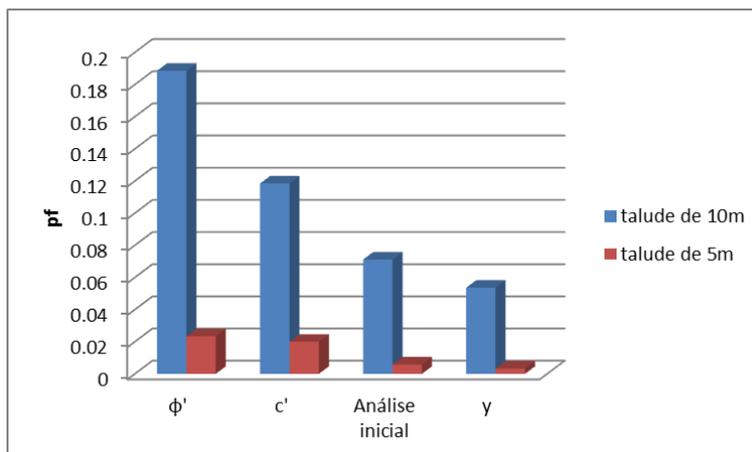


Figura 5.5 – Probabilidade de rotura para as análises de sensibilidade e análise inicial

Mais uma vez, recorreu-se ao uso das curvas de Gauss e da distribuição de frequências cumulativas para ter uma melhor visualização dos valores obtidos com as diferentes análises. É apresentada a distribuição de frequências nas três análises, para os dois taludes (Figura 5.6; Figura 5.7 e Figura 5.8).

Analisando os valores obtidos nestes gráficos, constata-se que a incerteza é idêntica em todos os casos, pois a dispersão dos dados em ambas as curvas é semelhante. E observa-se que o valor determinístico se encontra muito próximo do valor mais frequente obtido com o método de MC.

O ângulo de atrito é o parâmetro mais influente nesta análise, para ambos os taludes, sendo o parâmetro no qual se obtém a maior probabilidade do FS ser menor do que 1, com a sua variação. Este resultado está de acordo com o obtido no estudo realizado por Johari & Javadi (2012).

Neste ponto, constata-se que o método de MC diverge do determinístico e do FOSM, nos quais se determinou que o ângulo de atrito e a coesão tinham a mesma influência na análise de estabilidade do talude de 5m.

1ª análise – ϕ'

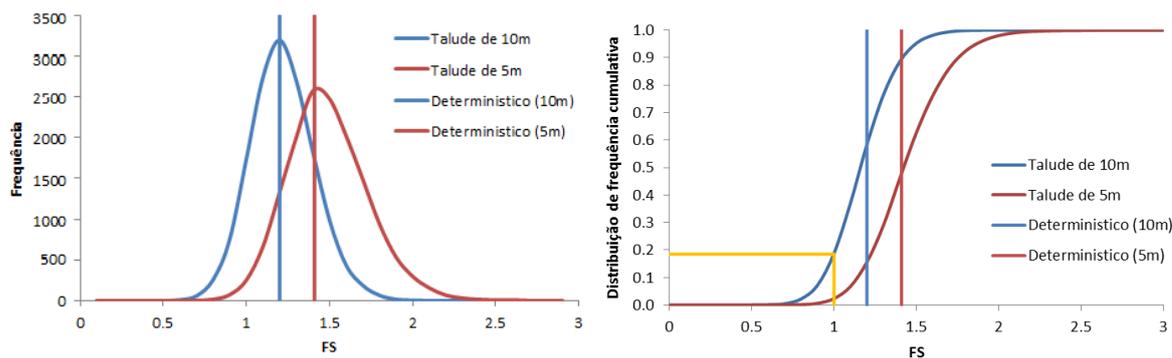


Figura 5.6 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 1ª análise

2ª análise – c'

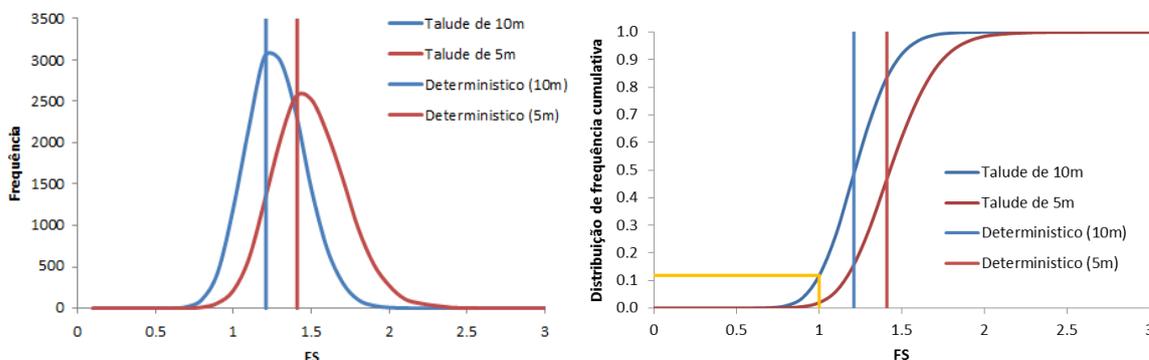


Figura 5.7 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 2ª análise

3ª análise (γ)

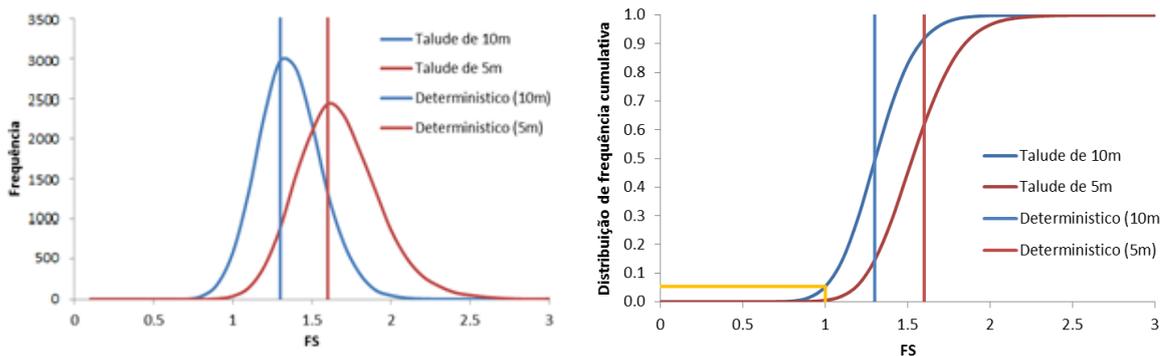


Figura 5.8 – Curva de Gauss e função densidade cumulativa para a 3ª análise

5.5. CAMPOS ESTOCÁSTICOS

Na terceira análise efetuada para o caso de um talude infinito, recorreu-se ao programa de elementos finitos TOCHNOG, de forma a avaliar a variabilidade no comportamento do

talude. Este programa utiliza a técnica dos campos estocásticos para a sua modelação numérica, baseada na teoria dos campos aleatórios.

A variabilidade traduz a dispersão das propriedades do solo de um ponto no espaço para o outro (sendo possível ocorrer dentro de uma camada suposta homogénea). Um meio racional para a sua quantificação, é modelar a distribuição dos parâmetros do solo como um campo aleatório, possibilitando ter em conta o comprimento de correlação.

O comprimento de correlação é um parâmetro usado em campos aleatórios que necessita de ser definido, sendo o mais difícil de avaliar devido à falta de dados na literatura, como já foi referido anteriormente no capítulo 4.1.7. Assim, realizou-se um estudo paramétrico sobre a influência deste parâmetro. Na análise inicial, antes de realizar o estudo paramétrico, adotou-se um comprimento de correlação horizontal de 40m e um vertical 10 vezes inferior, 4m. Selecionaram-se estes valores, pois parecem ser razoáveis, dentro do encontrado na literatura (Papaioannou & Straub, 2012; Afonso, 2012; Griffiths et al., 2011; Suchomel & Mašín, 2009; Griffiths et al., 2008; Low et al., 2007; Babu & Mukesh, 2004; El-Ramly et al., 2002) para os parâmetros em análise (coesão e ângulo de atrito), tendo em conta o tipo de solo.

A análise foi realizada em condições drenadas e os parâmetros efetivos do solo em que se considerou a variabilidade, neste estudo, foram a coesão efetiva do solo e ângulo de atrito efetivo do solo. Optou-se por estes parâmetros, como variáveis aleatórias, por estes terem elevada influência na estabilidade de taludes, tendo por isso uma incerteza considerável associada, tal como se mostrou na análise de sensibilidade no subcapítulo 5.4. Não se considerou o peso volúmico, pois tal como se observou na análise de sensibilidade, este parâmetro tem um efeito reduzido na análise de estabilidade do talude.

Foi assumida uma distribuição probabilística Normal para estas VA, tal como anteriormente, e os valores das incertezas (média e desvio padrão) são os mesmos utilizados nos pontos 5.2 e 5.3 que se encontram resumidos na Tabela 5.1.

Na realização desta análise, os parâmetros do solo que, simplificada, se consideraram constantes foram o módulo de deformabilidade (E), o coeficiente de Poisson (ν), o ângulo de dilatância (ψ) e o peso volúmico do solo (γ). Os valores admitidos para estes parâmetros encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Parâmetros do solo de valor constante

Parâmetro	Valor
E (MPa)	10
ν	0.4
ψ (°)	0
γ (KN/m ³)	18.6

No sentido de encontrar o comprimento mais adequado a adotar para o talude com 5m de altura, de forma a simular uma base infinita, realizou-se um outro estudo paramétrico. Para isso, executou-se uma análise determinística com o TOCHNOG, onde se calculou o FS para cada comprimento, o qual se foi aumentando até o valor do FS estabilizar. Criou-se uma malha de elementos finitos com elementos triangulares de 3 nós, com uma dimensão de 1m para todos os comprimentos.

O cálculo do FS é realizado com o TOCHNOG através da redução do ângulo de atrito e da coesão de modo a encontrar o valor mínimo do ângulo de atrito e da coesão para a estabilidade. A razão entre os valores iniciais e os valores mínimos define o FS.

Os valores do comprimento utilizados para a realização deste estudo, foram de 10, 20, 50, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 700 e 1000m. Como se pode verificar através da análise da Figura 5.9, à medida que se vai aumentando o comprimento o FS diminui até aos 300m. A partir deste comprimento o FS deixa de ter variações significativas, convergindo para o valor de 1.61. O valor é superior ao calculado com a fórmula tradicional determinística (equação (5.1)), na qual se obteve um FS de 1.52. Em ambas as análises se verifica que o talude se encontra estável.

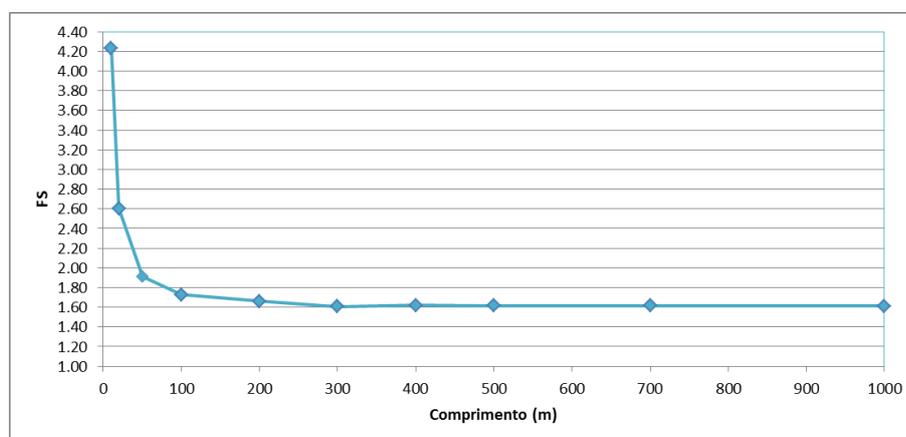


Figura 5.9 – Estudo paramétrico para o comprimento do talude

Para o talude com 5m de altura e 300m de comprimento, criou-se uma malha de elementos finitos com 1918 nós e 3186 elementos triangulares de 3 nós, com uma dimensão máxima de 1m, de modo a não interferir com os resultados, dado o valor mínimo do comprimento de correlação admitido na análise paramétrica (Figura 5.10).

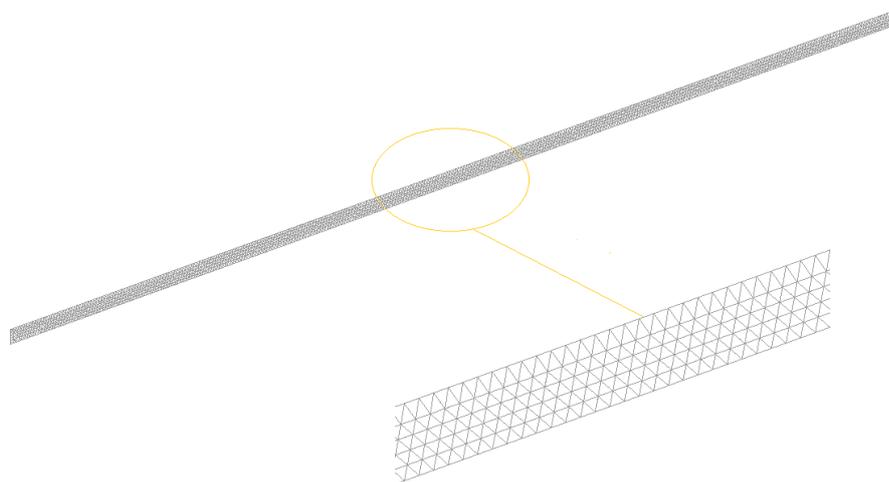


Figura 5.10 – Malha de elementos finitos adotada

Quanto às condições de fronteira, os deslocamentos horizontais são impedidos na margem direita e esquerda e no bordo inferior são suprimidos os deslocamentos horizontais e verticais (Figura 5.11). Estas condições de fronteira deviam ter sido modeladas de forma mais realista, mas não se conseguiu encontrar uma solução para fazer isto na modelação com o TOCHNOG. De modo a minimizar o efeito das condições de fronteira nos resultados obtidos, ignorou-se os primeiros e últimos 10m do talude próximos dos bordos laterais.

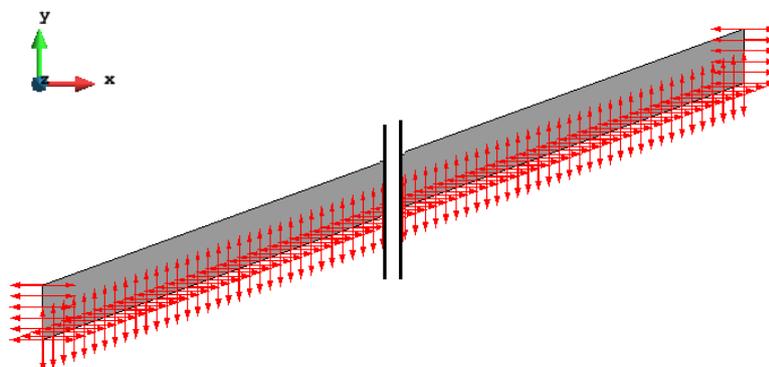


Figura 5.11 – Condições de fronteira

Na Figura 5.12 é apresentada, a deformação da malha e os vetores do campo de velocidades associados ao movimento da massa instável, que se determinaram através da análise determinística.

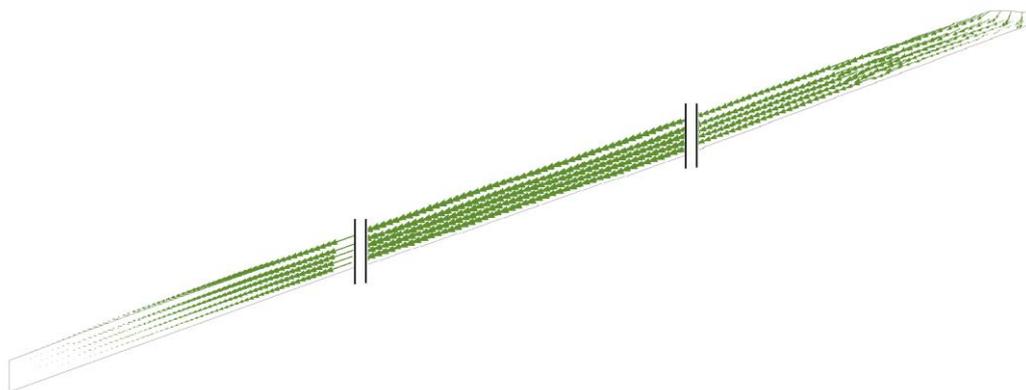


Figura 5.12 – Deformação da malha e respetivos vetores velocidade associados ao movimento da massa instável do talude

Ignorando os 10m próximos das fronteiras laterais do talude, determina-se um novo FS, verificando-se que a influência das condições de fronteira é reduzida, pois existe um ligeiro decréscimo do seu valor, este desce de 1.609 para 1.588. Contudo o valor obtido com o método determinístico (subcapítulo 5.2) continua a ser inferior, podendo considerar-se esta análise mais conservativa do que o cálculo realizado com o TOCHNOG. Esta diferença pode-se dever à forma como foram modeladas as condições de fronteiras da malha de elementos finitos do talude e ao facto de a abordagem determinística tradicional - equação (5.1) - ser aplicada pelo lado da segurança.

Nas abordagens determinísticas, aquando da utilização deste programa, como não há variação dos valores dos parâmetros apenas é necessário realizar um cálculo. No entanto, quando se recorre a uma abordagem estocástica, um cálculo não é suficiente devido à aleatoriedade na geração dos campos estocásticos e por isso, é necessário um grande número de simulações até se conseguir encontrar um padrão.

Neste estudo optou-se por realizar 100 cálculos com campos aleatórios distintos. Assim, o TOCHNOG realiza 100 análises de estabilidade do talude gerando diferentes campos estocásticos para as duas VA em cada um dos cálculos, sendo possível verificar como as VA podem variar no espaço aleatoriamente, dentro de intervalos definidos pelas suas

médias e desvios padrão. No final, o programa fornece os resultados de cada uma das análises e uma média dos resultados obtidos com as 100 análises.

A geração de campos aleatórios permite ter uma noção mais realista da variação dos parâmetros do solo, para isto é necessário ter em conta o comprimento de correlação. Ao introduzir o comprimento de correlação no programa é considerada a direção dos eixos x e y, pelo que as heterogeneidades espaciais não são paralelas ao plano de rotura, dada a inclinação do talude. Contudo, são capazes de simular as zonas heterogêneas do próprio maciço. Se a modelação dos campos estocásticos fosse paralela à superfície de rotura (base), agravaria a segurança. Na Figura 5.13 podem observar-se dois campos estocásticos gerados pela média das 100 análises realizadas, para um comprimento de correlação de 40m na horizontal e 4m na vertical; um criado pela coesão e outro pelo ângulo de atrito.

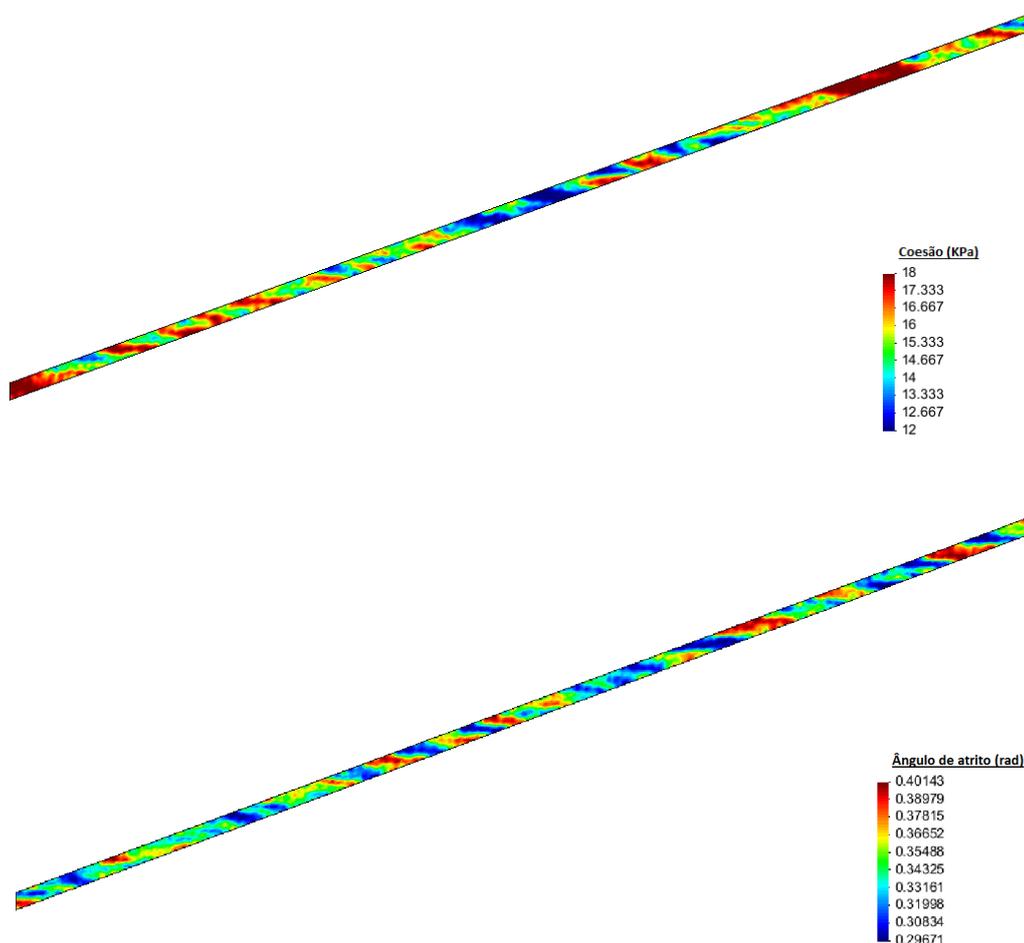


Figura 5.13 – Campos estocásticos da média das 100 análises

O programa TOCHNOG fornece as tensões segundo os eixos do x e y e as tensões em xy. Sabendo que o FS é a razão entre a resistência mobilizável (τ_r) e a resistência mobilizada (τ_a), com as tensões retiradas do programa podemos proceder facilmente ao cálculo do FS.

De forma a avaliar se 100 cálculos são suficientes para os valores convergirem, determinou-se o FS na base do talude realizando duas análises de estabilidade para 1, 20, 40, 60, 80 e 100 cálculos, tendo em conta um comprimento de correlação de 40 na horizontal e 4 na vertical. Estes resultados são comparados com o valor do FS determinístico obtido através do TOCHNOG.

Analisando a Figura 5.14 é possível ver a evolução do FS com o número de cálculos estocásticos realizados, constatando-se que 100 é um número razoável de cálculos para encontrar uma estabilização dos valores. Nesta figura encontra-se também o valor do FS obtido através da análise determinística calculada com o TOCHNOG.

Olhando para os casos em que se realiza apenas um cálculo com a abordagem estocástica, verifica-se que estas análises originaram as situações mais desfavoráveis, obtendo-se assim um FS inferior. A partir dos 60 cálculos o FS tende para um valor constante.

Embora a abordagem estocástica forneça FS ligeiramente inferiores à determinística, de notar, que os valores para ambas as abordagens são da mesma ordem de grandeza.

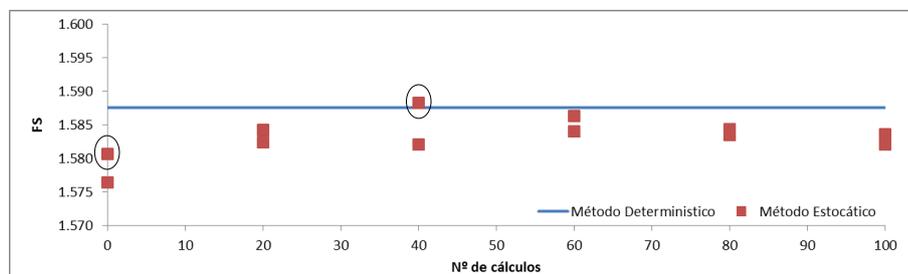


Figura 5.14 – Evolução do FS com o número de cálculos

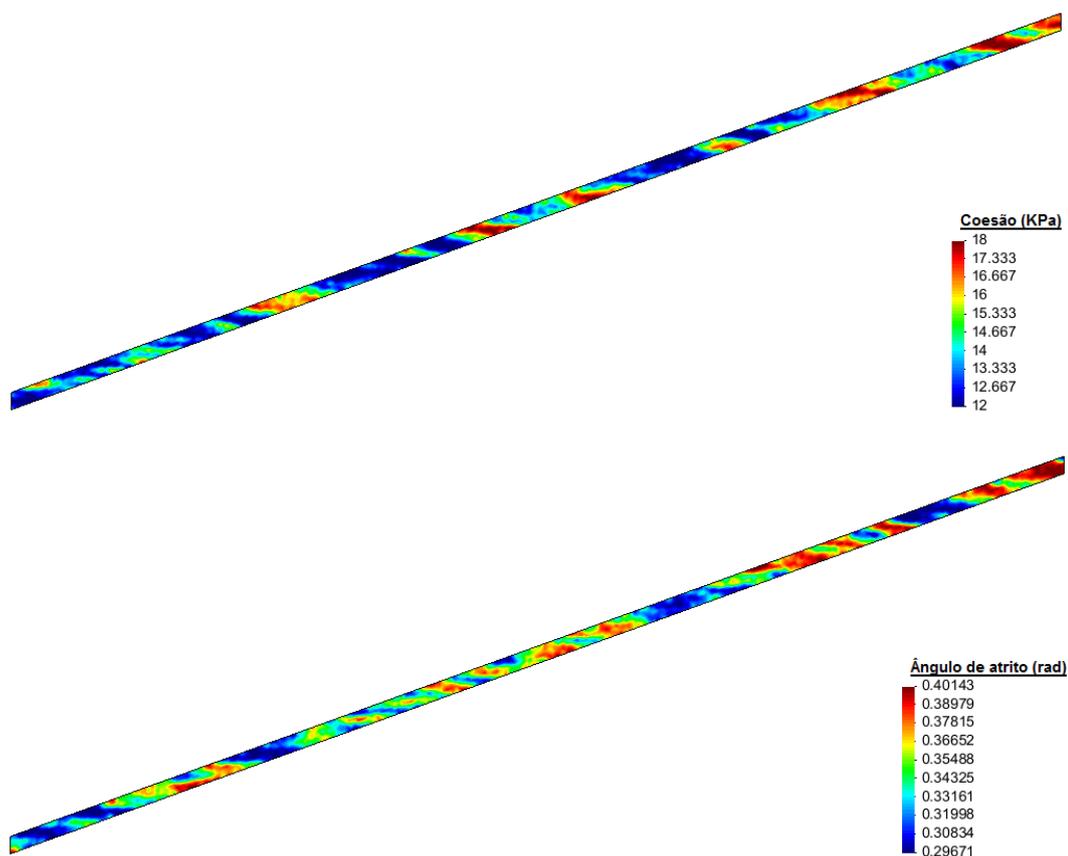
Analisando os FS relativos aos campos estocásticos da coesão e ângulo de atrito gerados para os diferentes cálculos, é possível perceber o quanto a variabilidade dos parâmetros influencia o comportamento dos maciços, apresentando cenários mais e menos desfavoráveis que o método determinístico. Na Figura 5.15 estão representados os campos estocásticos para 1 cálculo e para a média dos 40 cálculos. Para ambos os casos, foram realizadas duas análises, sendo avaliado o valor superior (pontos na Figura 5.14 rodeados com circunferência preta para 1 cálculo e 40 cálculos).

Com a comparação das imagens da Figura 5.15 e Figura 5.13, observa-se que no caso em que se realiza 1 cálculo foram gerados dois campos aleatórios com uma distribuição

desfavorável, ou seja, existem zonas extensas no maciço em que as propriedades do solo tomam valores reduzidos (áreas a azul), originando assim um FS de 1.58, inferior ao determinístico (FS=1.588) e ao determinado realizando 100 cálculos (FS=1.583).

Quando se realizam 40 cálculos verifica-se que os valores ainda não estabilizaram, originando um cenário contrário ao anterior. Neste, o FS obtido foi de 1.5883, ligeiramente superior ao FS determinístico, pois são gerados campos aleatórios para a coesão e ângulo de atrito com uma distribuição dos parâmetros favorável (grandes áreas a vermelho).

Assim sendo, numa análise estocástica é importante encontrar um número de análises suficiente para a qual os valores estabilizem, de forma a se conseguirem considerar o máximo de cenários possíveis nos quais se pode encontrar as situações mais favoráveis e desfavoráveis, criadas pela variabilidade dos parâmetros.



a) 1 cálculo

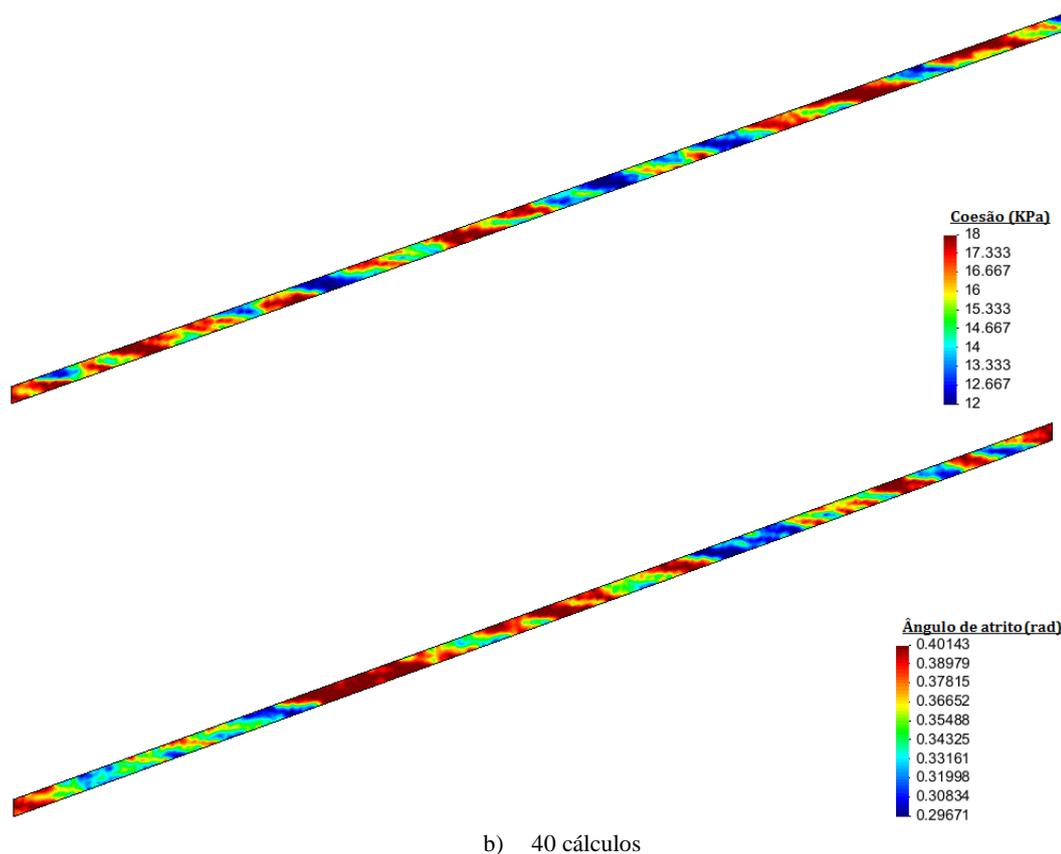


Figura 5.15 – Campos estocásticos obtidos para 1 cálculo e para 40 cálculos

Realizando a análise apenas de duas fatias do talude obtido com os 100 cálculos, nota-se o quanto a influência da variabilidade é relevante, pois quando introduzida na análise de estabilidade verifica-se que nem sempre o FS mais baixo se encontra na base do talude, como acontece nos métodos determinísticos. Esta análise é realizada apenas com o intuito de mostrar o que poderia acontecer, caso se avaliasse somente uma fatia do talude. O comprimento de correlação adotado para uma fatia teria de ser, obviamente, mais baixo do que aquele que foi admitido quando realizada a análise para este talude de 300m de comprimento.

Neste caso, o talude está estável, tendo um FS elevado, mas é possível observar na Figura 5.16, que enquanto na segunda fatia se vê claramente que o FS mais baixo se encontra na base do talude, na primeira fatia com a geração dos campos estocásticos verifica-se que se forma uma área mais desfavorável relativa ao ângulo de atrito no meio da fatia. Analisando o FS na base e para uma altura de 3m, na primeira fatia, verifica-se que o seu valor é de 2.9 e 2.4, respetivamente. Mostra-se assim, que com a geração dos campos estocásticos, nem sempre se obtém o menor FS na base do talude.

Quando se está perante taludes que se encontrem em rotura iminente esta análise é relevante, pois tal como Griffiths et al. (2008) mostraram, com a introdução do comprimento de correlação nem sempre se encontra a superfície de rotura na base do talude infinito e por vezes este pode conter mais do que um mecanismo de rotura a diferentes alturas.

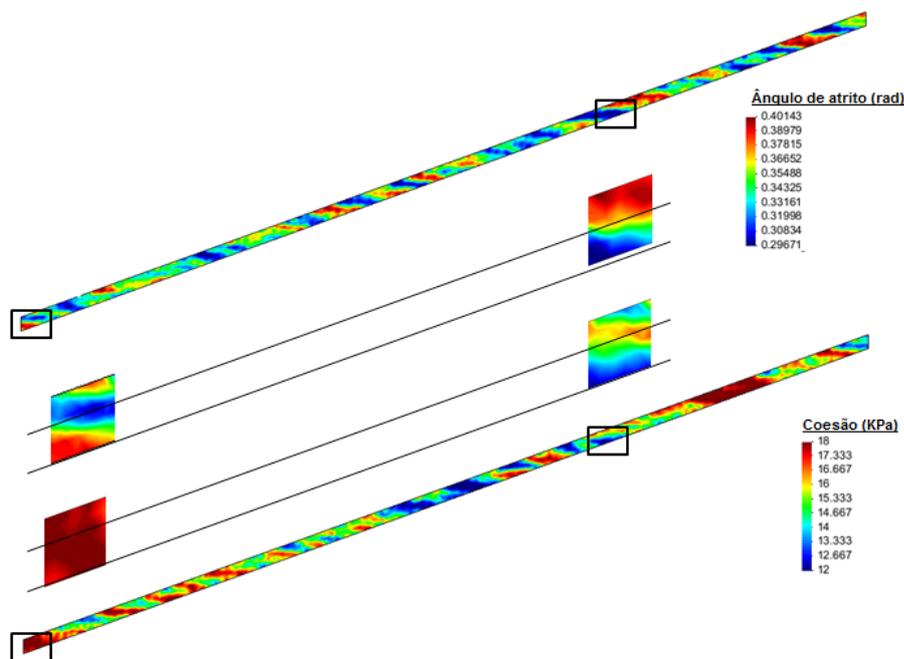


Figura 5.16 – Análise de duas fatias do talude

Dado a presença do nível freático ser um parâmetro de grande influência na estabilidade de taludes, realizou-se um estudo para verificar qual a alteração no FS. Considerou-se o NF na superfície do talude e admitiu-se um peso volúmico saturado do solo igual ao peso volúmico específico do solo de 18KN/m^3 e um peso volúmico da água de 10KN/m^3 .

Os cálculos foram efetuados através da equação tradicional determinística, onde se obteve um FS de 0.96 e recorrendo ao programa TOCHNOG obteve-se um FS de 1.0. Mais uma vez, o programa forneceu um valor do FS um pouco superior ao determinístico. Com este resultado é claramente demonstrada a grande influência que o NF tem na estabilidade do talude, deixando este, de se encontrar num estado de segurança elevada ($\text{FS} > 1.5$) para passar a estar num estado iminente de rotura (FS próximo de 1).

Na abordagem estocástica foram executados 100 cálculos com um comprimento de correlação de 40 na horizontal e 4 na vertical. Comparando estes resultados (Figura 5.17) com os obtidos para o talude anterior (Figura 5.13) em que considerou o mesmo comprimento de

correlação e o mesmo número de cálculos, constata-se que a presença do nível freático no talude leva à geração de campos estocásticos para a coesão e ângulo de atrito constituídos por zonas mais extensas com piores características geotécnicas (valor de coesão e ângulo de atrito mais baixos), o que agrava a estabilidade do talude.

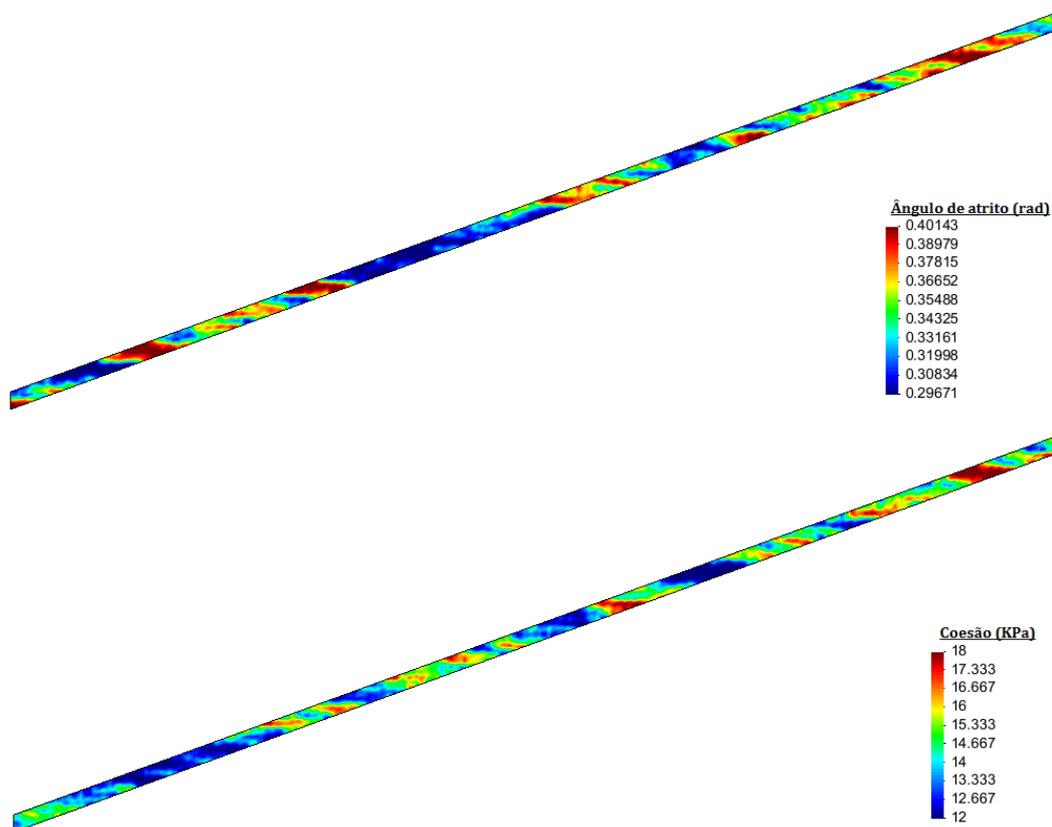


Figura 5.17 – Campos estocásticos do talude com nível freático

5.5.1. Estudo paramétrico: Influência do comprimento de correlação

O comprimento de correlação tem grande influência na geração dos campos estocásticos, por isso efetuou-se uma análise paramétrica, com diferentes valores para o comprimento de correlação horizontal e vertical (Tabela 5.8).

O comprimento de correlação vertical tem um valor significativamente inferior relativamente ao horizontal, de maneira a provocar uma maior variabilidade em profundidade, representando assim de forma mais realista a variabilidade do solo.

Este parâmetro oscila entre um reduzido valor para simular um solo com grande variabilidade em pequenas áreas, até um valor elevado para simular um solo em que a variabilidade se encontra em grandes áreas.

Tabela 5.8 – Valor dos comprimentos de correlação usados.

Comprimento de correlação horizontal (h) (m)	Comprimento de correlação vertical (v) (m)
5	1
50	10
100	50

Para avaliar a influência deste parâmetro foram realizados 100 cálculos (pelos mesmos motivos apresentados anteriormente), em cada uma das análises e estudada a sua média. De forma a simplificar os cálculos, utilizaram-se os mesmos comprimentos de correlação para as duas variáveis (coesão e ângulo de atrito).

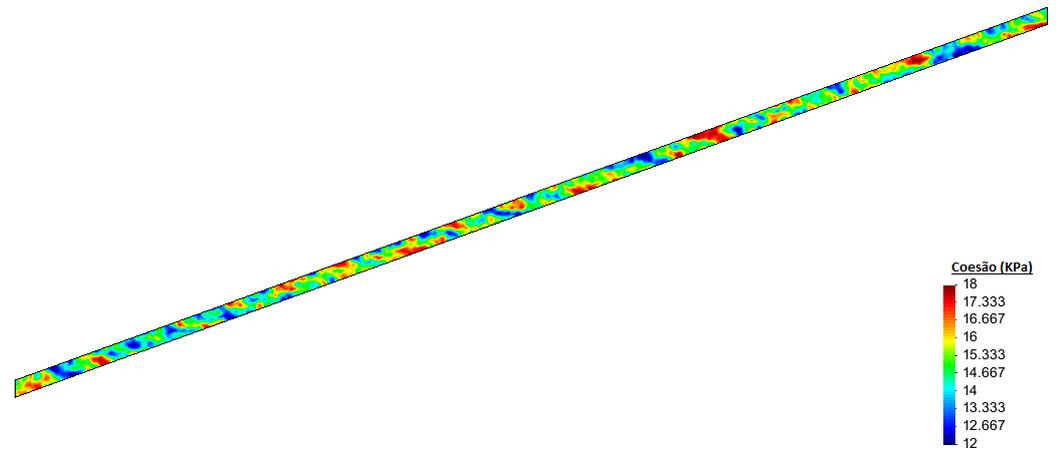
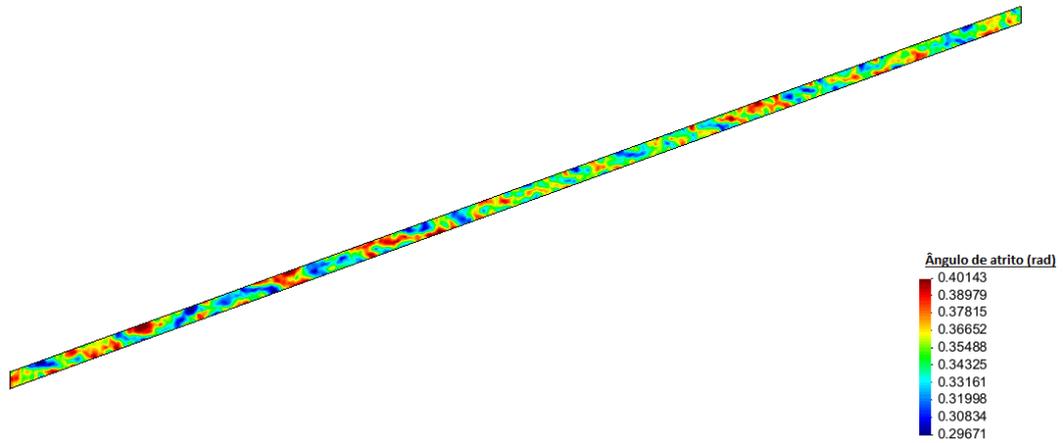
Na Tabela 5.9 encontram-se os FS obtidos recorrendo ao método determinístico e ao método estocástico considerando os diferentes comprimentos de correlação. Na Figura 5.18 são apresentados os campos estocásticos das VA relativos a cada comprimento de correlação.

Os FS variam consoante os comprimentos de correlação, apesar das diferenças nos valores não serem acentuadas. Como se pode verificar na Tabela 5.9, à medida que o comprimento de correlação aumenta o FS tende a diminuir, constatando-se que quanto menor o comprimento de correlação mais o valor do FS se aproxima do obtido com a análise determinística. Isto acontece porque quanto maior o comprimento de correlação, maiores as áreas geradas com melhores ou piores características geomecânicas, tendo assim uma maior influência no comportamento do maciço.

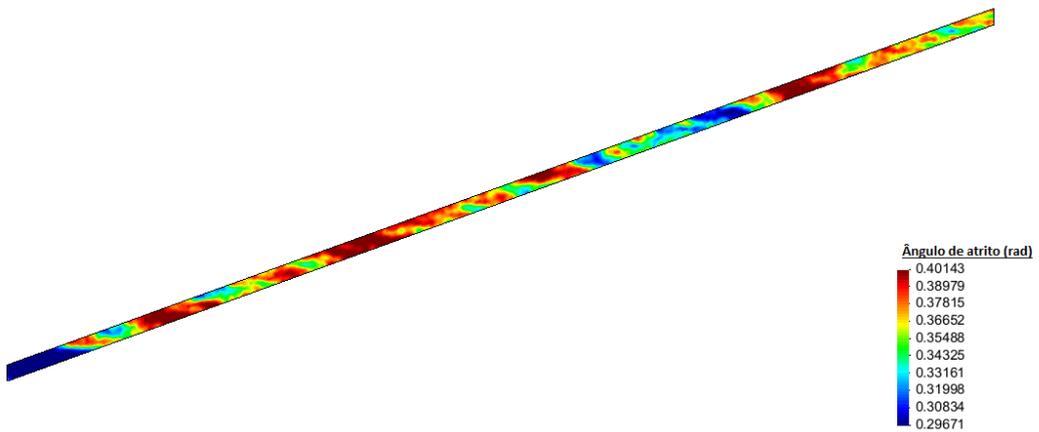
Comparando as imagens da Figura 5.18 é possível constatar que um reduzido valor de comprimento de correlação, leva a que os parâmetros variem ao longo de pequenas áreas e com um elevado valor do comprimento de correlação essas variações diminuem, gerando-se grandes áreas para um mesmo valor do parâmetro.

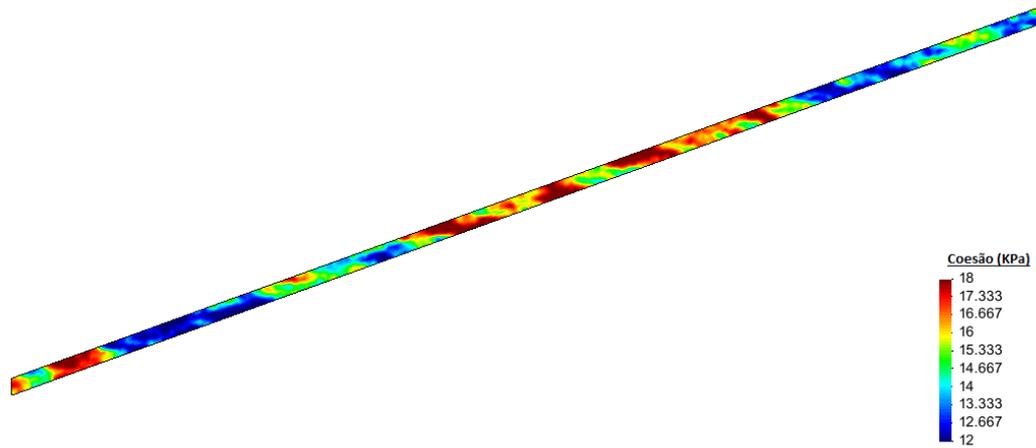
Tabela 5.9 – FS obtido no método determinístico e no método estocástico para diferentes comprimentos de correlação

Método Determinístico	Método Estocástico		
	Comprimentos de correlação		
	5-1	50-10	100-50
1.588	1.587	1.582	1.581

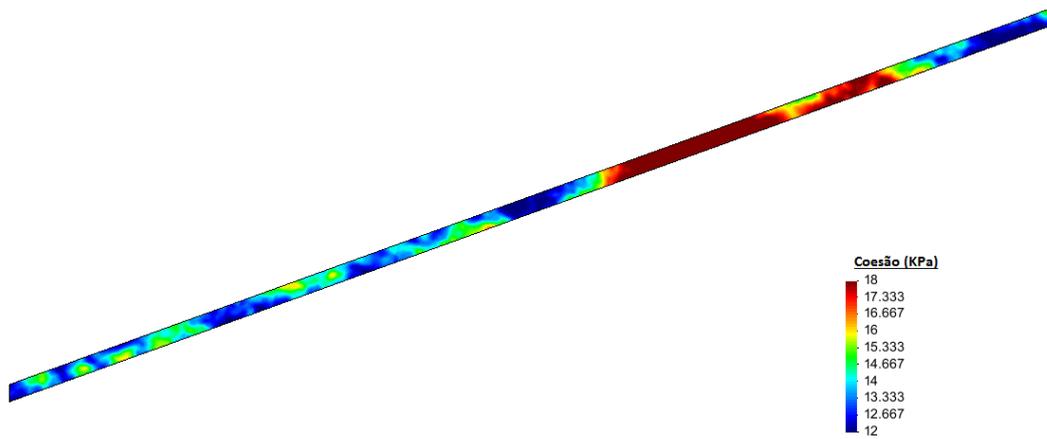
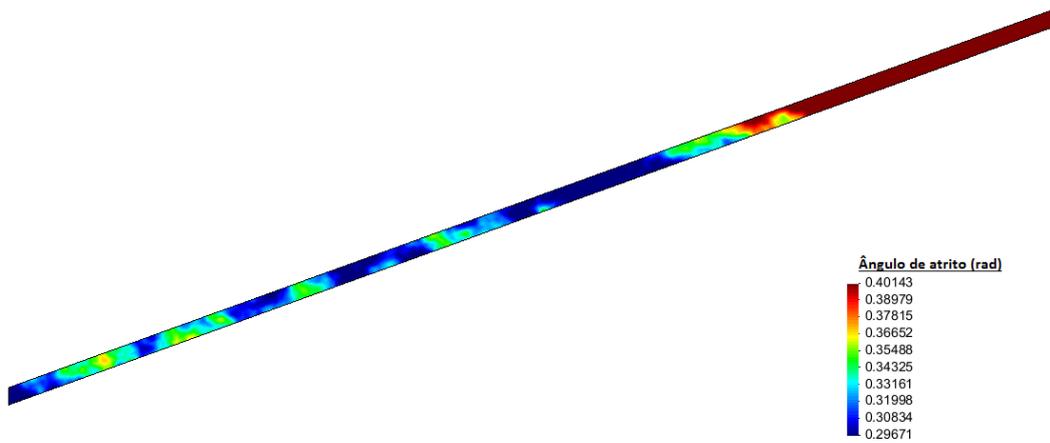


a) Comprimento de correlação $h=5m$ e $v=1m$





b) Comprimento de correlação $h=50\text{m}$ e $v=10\text{m}$



c) Comprimento de correlação $h=100\text{m}$ e $v=50\text{m}$

Figura 5.18 – Campos estocásticos gerados para os diferentes comprimentos de correlação

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DE FIABILIDADE APLICADA A UM TALUDE FINITO

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo foi feito um estudo de avaliação da estabilidade de um talude sobre um caso, bem documentado, que se refere à rotura do talude em Lodalen, Noruega. Este caso já foi estudado anteriormente por outros autores como Suchomel & Mašín (2009), Gitirana et al. (2008), El-Ramly (2006) e Sevaldson (1956).

Na análise efetuada, recorreu-se mais uma vez, ao programa de elementos finitos TOCHNOG, com o intuito de estudar a influência que a variabilidade dos parâmetros tem no comportamento do maciço, de forma a permitir um melhor controlo das incertezas associadas. Os resultados obtidos nesta análise são comparados com os da abordagem determinística tradicional, na qual se verifica, através dos estudos mencionados anteriormente, que o FS se encontra muito próximo de 1.

O programa TOCHNOG permite introduzir a quantificação da variabilidade na análise, através da modelação da distribuição dos parâmetros do solo como um campo aleatório (como apresentado no capítulo anterior), permitindo ter em conta o comprimento de correlação.

6.2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A rotura do talude ocorreu perto da estação ferroviária em Oslo (Noruega), em 1954. O talude é formado essencialmente por argila marinha que é considerada como um material homogêneo.

No instante da rotura o talude tinha uma altura de 17m, com uma inclinação de 26° relativamente à horizontal, (1V:2H). A Figura 6.1 mostra a geometria do talude que será estudada.

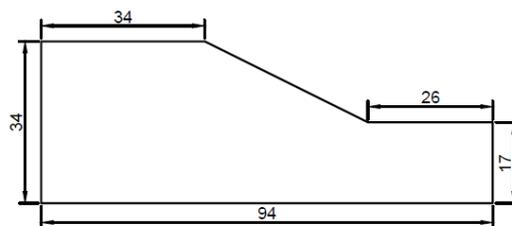


Figura 6.1 – Geometria do talude em estudo (Suchomel & Mašín, 2009)

A fim de determinar as causas da rotura, o talude foi investigado pelo Instituto Geotécnico da Noruega (NGI) que efetuou diversas sondagens, instalou uma série de piezómetros e realizou ensaios de laboratório e investigações de campo. Com isto, foi possível encontrar o local provável da superfície de rotura do talude, e observar que esta tinha uma forma circular.

Avaliando outros estudos sobre este talude, é possível constatar que o talude se encontra em condições de rotura iminente, pois o valor do FS é na ordem de 1.0 (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – FS determinados por diferentes autores para a rotura do talude em Lodalen, Noruega

Métodos	FS	
Fellenius	1.010	-
Bishop's simplificado	1.050	-
Spencer	-	0.97
Referências	Sevaldson (1956)	El-Ramly (2006)

A Figura 6.2 representa as alturas piezométricas medidas por cada um dos piezómetros em profundidade (abaixo do nível freático). No local foram instalados 4 piezómetros (A, B, C e D) para efetuar a medição das pressões intersticiais no talude. Os dados do piezómetro D foram excluídos da análise, pois os valores reportados por este foram elevados relativamente aos outros três piezómetros. Os valores podem ter sido afetados pelo fato de o piezómetro D se encontrar na zona de deslizamento.

As medições demonstraram um claro aumento das pressões intersticiais com a profundidade em relação à distribuição de pressão hidrostática.

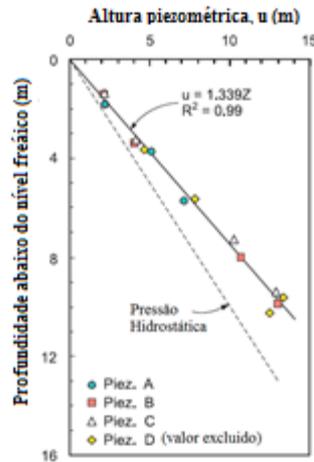


Figura 6.2 – Distribuição das cargas de pressão no talude (adaptado de El-Ramly, 2006)

Tal como no caso anterior, relativo à análise de estabilidade do talude infinito, os parâmetros considerados como variáveis aleatórias, em que se estudou a variabilidade, foram a coesão e ângulo de atrito efetivos do solo. Estes têm grande impacto no comportamento do talude e por isso uma considerável incerteza associada. A análise foi realizada em condições drenadas.

Os valores dos parâmetros a avaliar foram obtidos por meio de ensaios consolidados não drenados com medições de pressões intersticiais em diferentes amostras. Realizaram-se 10 ensaios para avaliação dos parâmetros, não existindo diferença significativa entre eles (Suchomel & Mašín, 2009).

As duas VA de entrada, coesão e ângulo de atrito efetivos do solo, foram descritas por distribuições estatísticas de Gauss (distribuições Normais), como mostrado na Figura 6.3.

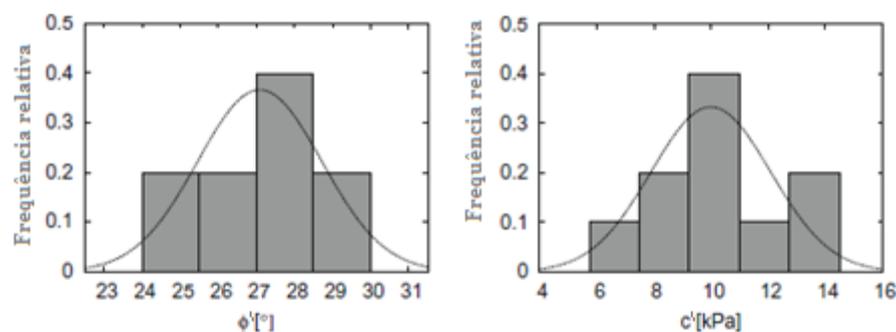


Figura 6.3 – Distribuição estatística de c' e ϕ' (adaptado de Suchomel & Mašín, 2009)

Assumiu-se, para as variáveis aleatórias, uma distribuição probabilística Normal. Os valores das suas incertezas (média e desvio padrão) estão resumidos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros avaliados e respetiva média, desvio padrão e coeficiente de variação (adaptado de Suchomel & Mašín, 2009)

	c' (Kpa)	ϕ' (°)
μ	10	27.10
σ	2.1	1.63
$Cov=\sigma/\mu$	0.21	0.06
Tipo de distribuição	Normal	

Os parâmetros do solo que se consideraram, simplifcadamente, constantes na análise da estabilidade do talude são o módulo de deformabilidade (E), o coeficiente de Poisson (ν), o ângulo de dilatância (ψ) e o peso volúmico do solo (γ). Os valores admitidos para estes parâmetros encontram-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Parâmetros do solo de valor constante

Parâmetro	Valor
E (MPa)	10
ν	0.4
ψ (°)	0
γ (KN/m ³)	18.6

Tal como no estudo do talude infinito, para analisar a influência da variabilidade das propriedades do solo, foi necessário definir um comprimento de correlação. Recorrendo-se à literatura verifica-se que os estudos sobre este parâmetro são escassos. Assim, no mesmo sentido que o estudo anterior, realizou-se uma análise paramétrica sobre o impacto deste parâmetro na segurança do maciço.

Os valores horizontais considerados no estudo paramétrico, para o comprimento de correlação, foram mais uma vez os de 5, 50 e 100m. Quanto ao comprimento de correlação vertical admitiu-se que este teria um valor inferior ao horizontal (alguns dos valores propostos no estudo de Suchomel & Mašín, 2009) com o intuito de simular a variabilidade do solo.

O estudo paramétrico será realizado posteriormente, optando-se por um comprimento de correlação horizontal de 40m e um comprimento de correlação vertical de 4m (dez vezes inferior ao horizontal) para a análise inicial do talude, tal como no caso de estudo anterior. Utilizou-se um comprimento de correlação igual para o ângulo de atrito e para a coesão, de forma a simplificar os cálculos.

Criou-se uma malha de elementos finitos com 2926 nós e 5607 elementos triangulares de 3 nós, tendo como dimensão máxima 1m, de modo a não interferir com os resultados,

atendendo ao valor mínimo do comprimento de correlação admitido. Na Figura 6.4 encontra-se representada a malha de elementos finitos gerada e a localização do nível freático no talude.

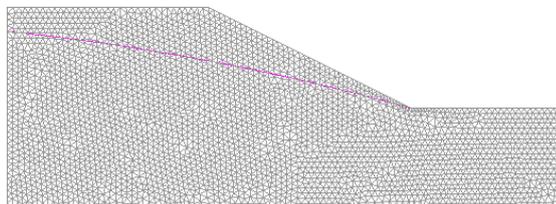


Figura 6.4 – Malha de elementos finitos utilizada

Os deslocamentos horizontais são impedidos na margem esquerda e direita do talude e no bordo inferior são suprimidos os deslocamentos horizontais e verticais Figura 6.5.

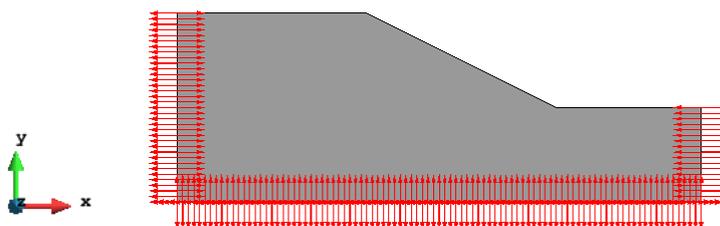


Figura 6.5 – Condições de fronteira admitidas para o talude

6.3.RESULTADOS

Inicialmente realizou-se uma análise determinística de estabilidade do talude com o programa TOCHNOG, na qual foi possível concluir que o talude se encontra em rotura iminente, pois obteve-se um FS inferior a 1. O TOCHNOG considera que o talude entra em rotura quando o valor do FS é inferior a 1 e indica apenas que o talude não se encontra estável, não fornecendo um valor exato do FS.

Na Figura 6.6 está representado a forma circular da superfície de rotura do talude e é apresentada a deformação da malha e os vetores velocidade associados ao movimento da massa instável, obtidos através de uma análise determinística.

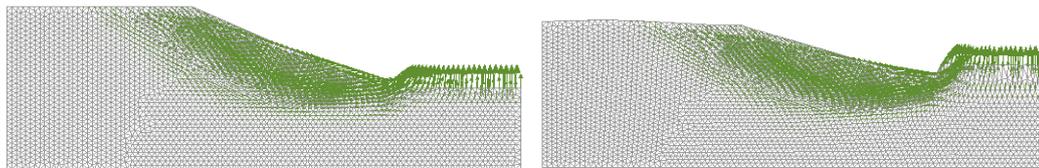


Figura 6.6 – Vetores velocidade associados ao movimento da massa instável

Como foi referido anteriormente, ao contrário da abordagem determinística em que apenas é necessário efetuar um cálculo, a introdução da variabilidade na análise numérica acarreta um elevado número de simulações para obter a convergência de valores. Assim, realizou-se uma série de 100 análises com campos aleatórios distintos, considerando que seria um número razoável para estabilizar os resultados.

Na Figura 6.7 apresentam-se 2 campos aleatórios, um criado pela coesão e outro pelo ângulo de atrito gerados pela média das 100 análises realizadas, para um comprimento de correlação de 40m na horizontal e 4m na vertical. A geração destes campos permite simular um meio geotécnico mais consistente com as heterogeneidades do maciço do que o determinístico. Nestas figuras é possível observar a variação das VA dentro de intervalos definidos pelas suas médias e desvio padrão.

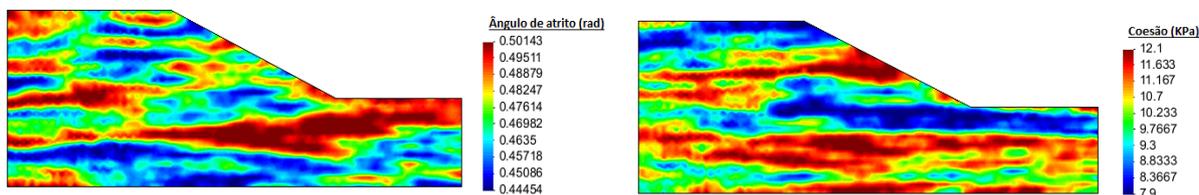


Figura 6.7 – Exemplos de campos estocásticos

No cálculo do FS, aplicou-se o método de Fellenius - equação (6.1). Trata-se de um método relativamente simples e de fácil aplicação que admite uma superfície de rotura circular e calcula o FS do talude, assumindo que a resultante das forças de interação entre fatias é nula. Esta análise é executada através do método das fatias, onde a região de solo delimitada pela potencial superfície de rotura é dividida em fatias verticais, analisando-se as condições de equilíbrio em cada fatia isoladamente (Figura 6.8).

$$F_S = \frac{\sum[c \cdot l + (w \cdot \cos(\alpha) - u \cdot l) \cdot \tan(\phi')]}{\sum[w \cdot \sin(\alpha)]} \quad (6.1)$$

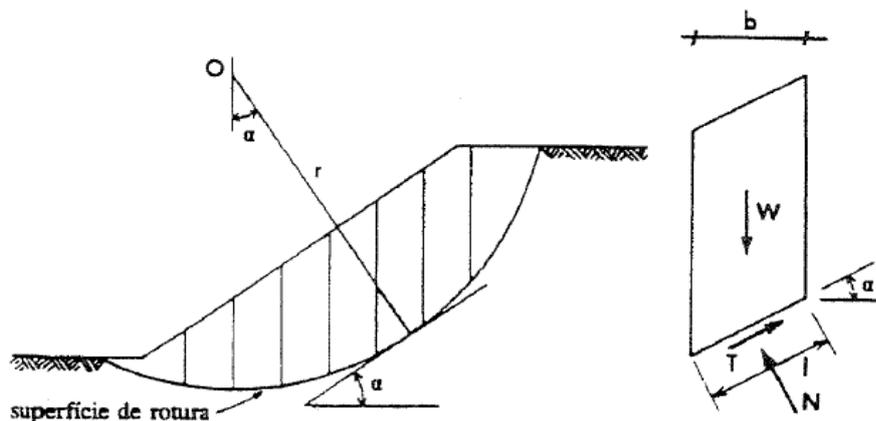


Figura 6.8 – Método de Fellenius – forças aplicadas a uma fatia de solo (adaptado de Gomes Correia et al., 1996)

Recorrendo ao método de Fellenius começou por calcular-se o FS para a análise determinística, por forma a confirmar o resultado obtido com o TOCHNOG. Seguidamente foi calculado o FS relativo à análise estocástica. A forma da superfície de rotura utilizada neste cálculo foi retirada do programa TOCHNOG. Na Figura 6.9 encontram-se representadas as superfícies de rotura obtidas na análise determinística e na média das 100 análises estocásticas que se utilizou no cálculo do FS.

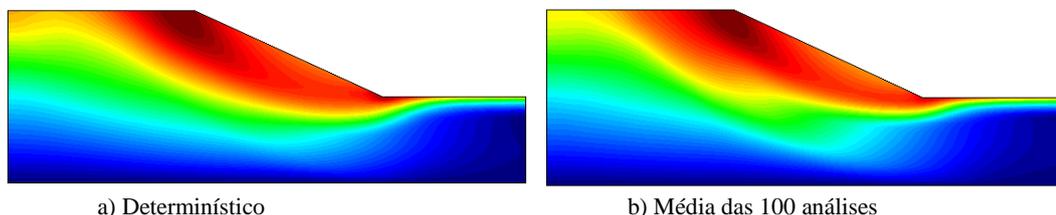


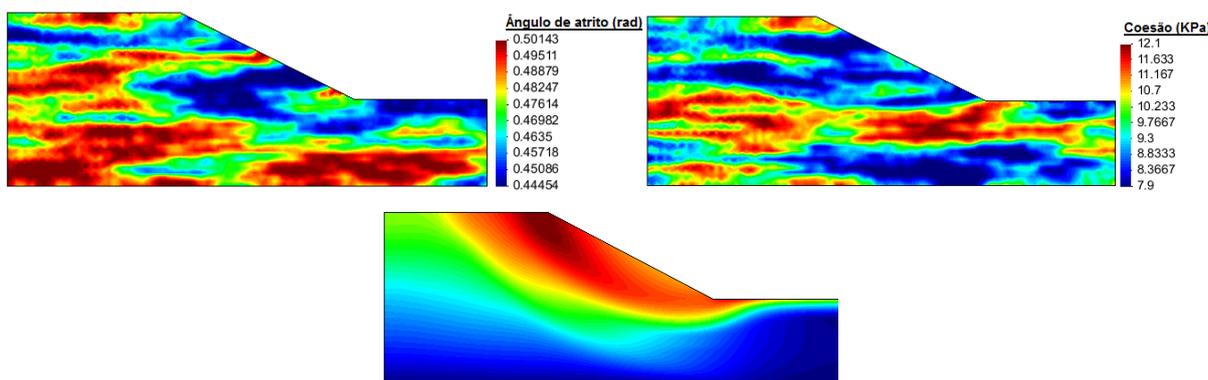
Figura 6.9 – Superfície de rotura do talude

O valor do FS calculado com o método de Fellenius, para a análise determinística, foi de 0.995. Este valor indica que o talude se encontra instável, confirmando o resultado obtido com o TOCHNOG. Comparativamente ao estudo realizado por Sevaldson (1956), no qual se obteve um FS de 1.010 utilizando o método de Fellenius, verifica-se que este é ligeiramente superior ao FS conseguido nesta análise, no entanto ambas os valores são aproximadamente 1.

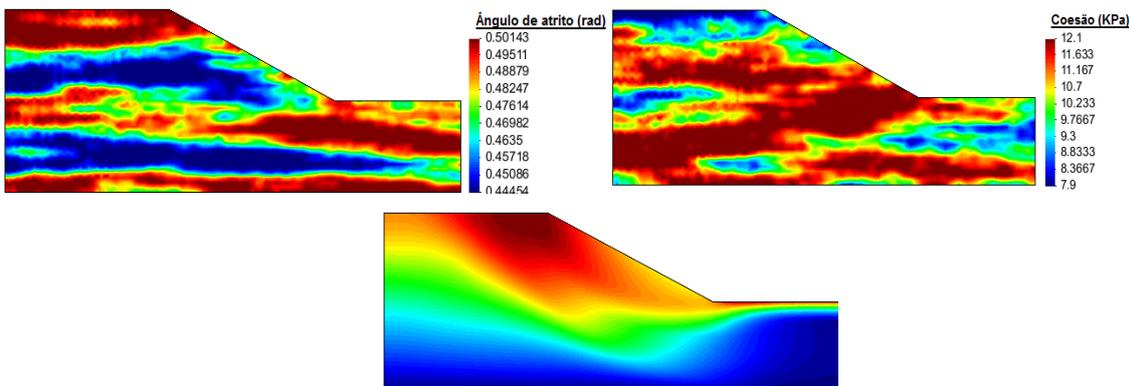
O FS obtido para a média das 100 análises com um comprimento de correlação de 40 na horizontal e 4 na vertical, foi de 1.111. Este valor é superior ao obtido segundo a abordagem determinística, podendo considerar-se que neste caso, ao contrário do que acontece no talude infinito, a abordagem determinística é mais conservativa.

Contudo, se for considerado apenas um cálculo específico dentro dos 100 cálculos, pode originar distribuições dos parâmetros mais ou menos desfavoráveis que induzem, respetivamente menores ou maiores FS. Na Figura 6.10, são apresentados os campos estocásticos e as superfícies de rotura gerados para cada uma das VA, em dois cálculos distintos. No cálculo 2, observa-se que os campos estocásticos gerados são compostos por mais áreas desfavoráveis dentro da zona da superfície de rotura do que os da média dos 100 cálculos (Figura 6.7), originando um FS de 0.990, inferior ao da média e ao determinístico. No cálculo 79, acontece o contrário, são geradas áreas favoráveis extensas, obtendo-se assim um FS de 1.143, superior aos anteriores.

Como se pode constatar, a utilização de uma abordagem estocástica na análise de estabilidade de taludes é muito importante, permitindo analisar uma gama extensa de situações possíveis, dadas pela variabilidade dos parâmetros.



a) Cálculo 2



b) Cálculo 79

Figura 6.10 – Campos estocásticos e superfície de rotura do cálculo 2 e 79

6.4. ESTUDO PARAMÉTRICO: INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE CORRELAÇÃO

Realizou-se também para este caso, um estudo paramétrico com o intuito de avaliar a influência do comprimento de correlação na geração dos campos estocásticos. Foram efetuados uma série de 100 cálculos, com diferentes valores para o comprimento de correlação horizontal e vertical (Tabela 6.4). Para cada comprimento de correlação foi analisada a média dos 100 cálculos. De forma a simplificar os cálculos, admitiram-se os mesmos valores para a coesão e o ângulo de atrito.

Avalia-se o comprimento de correlação desde um valor reduzido que simula um solo com extrema variabilidade ao longo de pequenas distâncias, até um valor elevado em que a variabilidade se encontra em maiores distâncias. Este parâmetro apresenta um valor superior na horizontal relativamente à vertical, indiciando a existência de uma maior variabilidade em profundidade para simular a estratificação de solo.

Tabela 6.4 – Comprimentos de correlação adotados

Comprimento de correlação horizontal (m)	Comprimento de correlação horizontal (m)
5	1
50	10
100	50

Através da análise da Figura 6.11 dos campos estocásticos das VA, à medida que se aumenta o comprimento de correlação são geradas maiores áreas do maciço que podem ser mais resistentes ou menos resistentes. Constata-se que nem todos os comprimentos de correlação conseguem simular o crescimento dos parâmetros em profundidade para representar de forma adequada as camadas de solo.

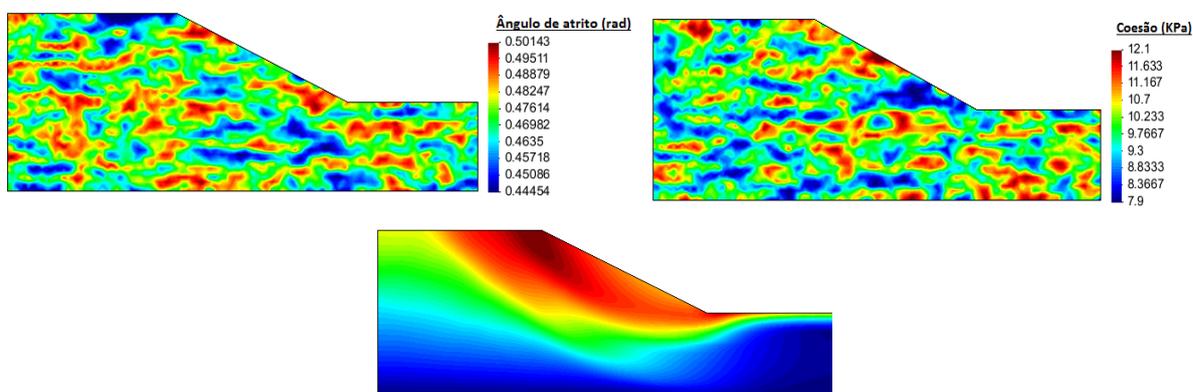
Observando a Tabela 6.5 verifica-se que o valor do FS varia para cada um dos comprimentos de correlação. Comparando os diferentes FS obtidos, verifica-se que quanto menor o comprimento de correlação, menor o valor do FS, aproximando-se do alcançado pelo método determinístico.

Neste caso, em que o talude se encontra em rotura iminente verificou-se o contrário relativamente ao talude analisado anteriormente que se encontra seguro. No talude infinito o aumento do comprimento de correlação originou um pequeno decréscimo no FS. No talude finito, a diferença do FS obtido pelo método determinístico e pelo método estocástico é mais acentuada, sendo que o aumento do comprimento de correlação gerou áreas mais extensas com melhores características geotécnicas, dando origem a um aumento do FS.

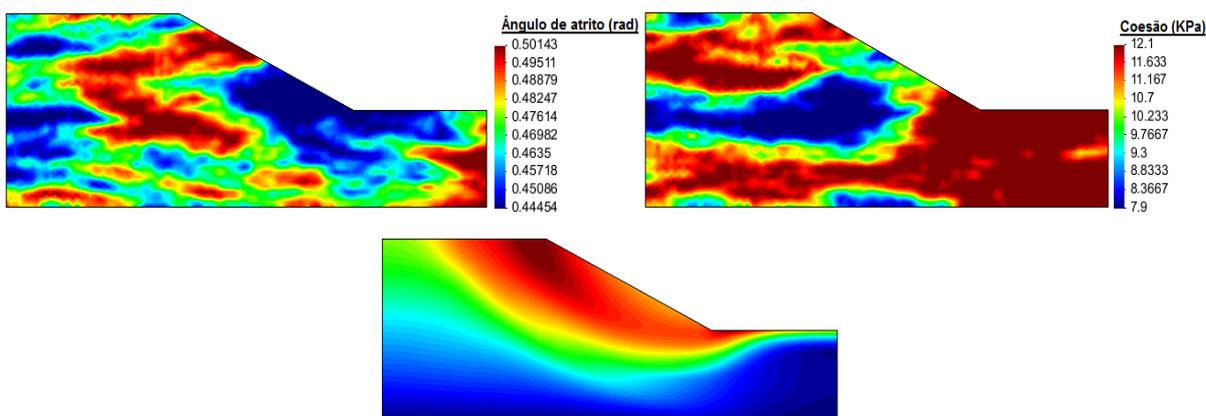
Estudos como Suchomel & Mašín (2009) e Griffiths & Fenton (2004), relacionaram a *pf* e os FS com os diferentes comprimentos de correlação e verificaram que dependendo da estabilidade do talude, a *pf* e os FS tanto podem aumentar como diminuir com o aumento do comprimento de correlação.

Tabela 6.5 - FS obtido no método determinístico e no método estocástico para diferentes comprimentos de correlação

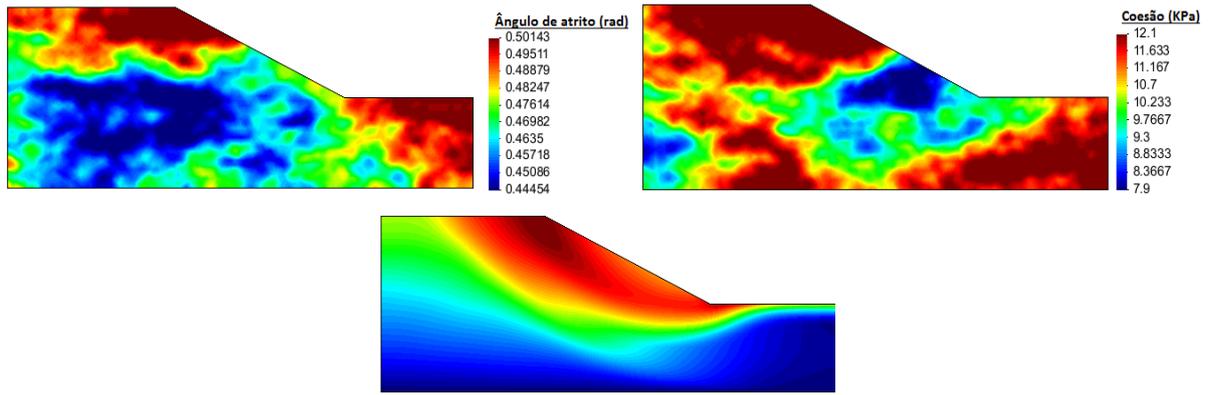
Método Determinístico	Método Estocástico		
	Comprimentos de correlação		
	5-1	50-10	100-50
0.995	1.101	1.134	1.141



a) Comprimento de correlação h=5m e v=1m



b) Comprimento de correlação h=50m e v=10m



c) Comprimento de correlação $h=100\text{m}$ e $v=50\text{m}$

Figura 6.11 - Campos estocásticos gerados para os diferentes comprimentos de correlação

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação foca-se na análise de fiabilidade de taludes em solos, usando métodos determinísticos, probabilísticos e estocásticos, tendo como objetivo principal expor a importância da contribuição da abordagem probabilística e estocástica neste tipo de obras geotécnicas.

Foram estudados dois taludes, nomeadamente um talude infinito e um finito, com o intuito de perceber como a consideração da incerteza e variabilidade dos parâmetros de resistência do solo afetam o comportamento dos maciços.

Inicialmente é analisado um caso teórico de um talude infinito através do método do talude infinito, do método de simulações de Monte Carlo e da modelação dos campos estocásticos através do programa TOCHNOG. No segundo caso é estudada a segurança de um talude finito sobre um caso, bem documentado, que se refere à rotura do talude em Lodalen, Noruega. Neste segundo estudo, para a avaliação da estabilidade do talude, recorre-se ao método determinístico e à modelação dos campos estocásticos através do programa TOCHNOG, tal como realizado no caso anterior.

As principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho, foram:

- A abordagem determinística é uma prática comum na análise de estabilidade de taludes. Esta considera as incertezas através da utilização de parâmetros conservadores tentando obter uma representação razoável da realidade. Esses parâmetros são estimados usualmente por julgamento recorrendo a experiência e literatura sobre este assunto de forma a ser possível prever um FS que transmita a estabilidade do talude o mais rigorosamente possível.
- Os conceitos envolvidos numa análise determinística e numa análise probabilística são bastante distintos. Uma das maiores divergências consiste no fato de numa análise probabilística se considerar as incertezas no contributo na estabilidade do talude de forma explícita, lidando com a interação dos seus efeitos e não considerar exclusivamente um FS.

- Um dos benefícios de realizar uma abordagem estocástica é o de possibilitar a verificação da forma como a incerteza e a variabilidade dos valores dos parâmetros geotécnicos afetam o comportamento dos taludes. Simulando o solo de forma mais realista e completa, sendo possível considerar diversas possibilidades através do comprimento de correlação.
- Na análise determinística realizada para o caso de estudo de um talude infinito com alturas de 5m e 10m conclui-se que nenhum deles sofre rotura, pois ambos têm um fator de segurança superior a 1.0. Concretamente, o talude de 5m tem um fator de segurança de 1.52 e o de 10m tem FS igual a 1.26.
- No método probabilístico de Monte Carlo também se verificou que ambos os taludes infinitos se encontram estáveis. Obteve-se uma probabilidade de rotura de 0.0058 no caso do talude de 5m e de 0.071 no talude de 10m.
- Analisando os histogramas obtidos através das simulações de Monte Carlo, constatou-se que o valor mais frequente para o fator de segurança é de 1.25 para o talude infinito de 10m e para o de 5m é de 1.51. Estes valores são muito próximos dos conseguidos através do método determinístico.
- Para avaliar a influência que cada uma das variáveis aleatórias, como a coesão, ângulo de atrito e peso volúmico, têm na estabilidade dos taludes infinitos, realizou-se uma análise de sensibilidade, utilizando o método determinístico, o FOSM e o método de Monte Carlo. Como era de esperar, constatou-se que a redução do ângulo de atrito e da coesão provocam um aumento de instabilidade, enquanto o peso volúmico, com a redução do seu valor, leva a uma maior estabilidade do talude.
- Verificou-se nos três métodos que, no talude de 10m, o ângulo de atrito é o parâmetro com mais influência na segurança do talude, cerca de 82%, com uma probabilidade de rotura associada de 0.1885. A coesão tem um impacto limitado, cerca de 17% e uma probabilidade de rotura de 0.1184. Quanto ao peso volúmico, este tem uma probabilidade de rotura de 0.0536, sendo o parâmetro que induz menos efeito na análise, contribuindo menos de 1% na estabilidade do talude.

No que diz respeito ao talude de 5m, observa-se mais uma vez que o peso volúmico tem um impacto muito reduzido na análise, aproximadamente 1.6% com uma probabilidade de rotura associada de 0.0033. Quanto à coesão e ao ângulo de atrito, a sua influência na análise de estabilidade do talude é de cerca de 49% cada um, no entanto têm uma probabilidade de rotura 0.0199 e 0.0233, respetivamente.

- Na análise em que se considerou a introdução do nível freático no talude, observou-se que este passou de um estado seguro para um estado de rotura iminente, constatando-se a grande influência deste parâmetro no comportamento do talude.
- Com o programa TOCHNOG efetuou-se, inicialmente, uma análise de estabilidade do talude infinito com 5m de altura, de forma a encontrar o seu fator de segurança, obtendo-se um fator de segurança de 1.588, sendo este superior ao obtido pelo método determinístico.
- No caso do talude finito, com a análise determinística realizada com o TOCHNOG, obteve-se um fator de segurança inferior a 1. Assim, conclui-se que o talude se encontra em rotura iminente, o que está de acordo com o calculado com o método de Fellenius, no qual obteve um fator de segurança de 0.995.
- O fator de segurança determinado com os métodos estocásticos é diferente do alcançado com os determinísticos nos dois taludes.
- Na análise estocástica, em ambos os taludes se constatou que com o aumento do comprimento de correlação são geradas zonas mais extensas com melhores e piores características geomecânica. Verificou-se que quanto menor o comprimento de correlação admitido nos campos estocásticos, mais o valor do fator de segurança se aproxima do determinístico.
- Nos casos estudados, observou-se que o aumento dos comprimentos de correlação provoca um efeito contrário no fator de segurança dos taludes. No talude infinito à medida que o comprimento de correlação cresce, aumentam as áreas com características desfavoráveis, ou seja existe uma redução dos valores dos parâmetros, originando assim um ligeiro decréscimo no valor do fator de segurança. No talude finito o aumento do comprimento de correlação gera áreas mais extensas com melhores características geotécnicas, dando origem a um aumento do fator de segurança. Este parâmetro carece de uma análise mais aprofundada e deve ser objeto de estudos futuros.
- No talude infinito o fator de segurança determinado para o menor comprimento de correlação foi de 1.587 e o fator de segurança para o maior comprimento de correlação foi de 1.581, como se pode notar a divergência nos valores é pouco significativa. Quanto ao talude finito, o fator de segurança alcançado para o menor comprimento de correlação foi de 1.101 e para o maior comprimento de correlação foi de 1.141.

Como trabalho futuro recomenda-se:

- Estudar de forma mais aprofundada a influência do NF na estabilidade de taludes com os métodos estocásticos, dado que este é um dos fatores que mais afeta a segurança do talude.
- Avaliar rigorosamente outros parâmetros, particularmente o módulo de deformabilidade.
- Simular com o TOCHNOG as condições de fronteira, de modo a se aproximarem mais da realidade e não interferirem nos resultados.
- Investigar a possibilidade do TOCHNOG fornecer a probabilidade de rotura numa análise de campos estocásticos.
- Aplicar os métodos estocásticos a outros casos reais, particularmente a casos de estudos que permitam calibrar melhor os resultados obtidos com este método.
- Dado que o comprimento de correlação tem grande influência no comportamento dos maciços, propõem-se realizar estudos que permitam desenvolver uma metodologia que possibilite obter os valores deste parâmetro, com um nível de fiabilidade aceitável, para diferentes casos de estudos envolvendo diferentes tipos de solo.

BIBLIOGRAFIA

- Abbaszadeh, M., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Heydari, M. (2011). Uncertainty and Reliability Analysis Applied to Slope Stability: A Case Study From Sungun Copper Mine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), 581–596.
- Afonso, L. (2012). Modelação estocástica aplicada a obras subterrâneas. *Tese de Mestrado, UMINHO*.
- Babu, G. S., & Mukesh, M. (2004). Effect of soil variability on reliability of soil slopes. *Geotechnique*, 54(5), 335–337.
- Baecher, G., & Christian, J. (2005). Reliability and statistics in geotechnical engineering. *Chichester, UK: John Wiley & Sons*, 1–593.
- Beck, J., & Katafygiotis, L. (1998). Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework. *Journal of Engineering Mechanics*, 455–461.
- Bolton, H., Heymann, G., & Groenwold, A. (2003). Global search for critical failure surface in slope stability analysis. *Engineering Optimization*, 35(1), 51–65.
- Cala, M., & Flisiak, J. (2001). Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *Proceedings of the 2nd International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Ecully-Lyon, France*, 1–4.
- Caldwell, J. (2013). *The Bingham Canyon Mine slope failure*. Retrieved August 24, 2014, from <http://www.mining.com/wp-content/uploads/2013/04/Bingham-Canyon-Mine-slope-slide.jpg>
- CEN. (2002a). European Committee for Standardization. In *Eurocode 0: Basis of Structural Design. EN 1990*.
- CEN. (2002b). European Committee for Standardization. In *Eurocode 1: Actions on Structures. EN 1991*.
- CEN. (2004). European Committee for Standardization. In *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. EN 1998*.
- CEN. (2007). European Committee for Standardization. In *Eurocode 7: Geotechnical Design. EN 1997*.
- Chen, W. (1975). Limit Analysis and Soil Plasticity. *Elsevier Scientific Publishing Company*.
- Cho, S. E. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Engineering Geology*, 92(3-4), 97–109.
- Christian, J. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 985–1004.
- Christian, J., Ladd, C., & Baecher, G. (1994). Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), 2180–2207.
- Clough, R. W., & Woodward, R. J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*

- Cornell, C. A. (1969). Structural safety specifications based on second-moment reliability analysis. *Symp. on Concepts of Safety and Methods of Design, Final Report, Int. Association of Bridge and Structure Engrg., London, U.K.*, 235–245.
- Der Kiureghian, A. (1989). Measures of structural safety under imperfect states of knowledge. *Journal of Structural Engineering*, 115(5), 1119–1140.
- Drucker, D., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 10, 157–165.
- Duncan, J. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 307–316.
- El-Ramly, H. (2006). Lodalen slide: a probabilistic assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 968, 956–968.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 683, 665–683.
- Fenton, G., & Griffiths, D. (2005). A slope stability reliability model. *Proceedings of the KY Lo Symposium, on London*, (1), 1–11.
- Fredlund, D., & Krahn, J. (1977). Comparison of Slope Stability Methods of Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14, 429–439.
- Fredlund, D., Krahn, J., & Pufahl, D. (1981). The relationship between limit equilibrium slope stability methods. *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation*, 3, 409–416.
- GEO. (1984). Geotechnical manual for slopes. *Geotechnical Engineering Office, Hong Kong*.
- Gerscovich, D. M. (2009). Estabilidade de Taludes. *UERJ*, 1–160.
- Gomes Correia, A., Neves, J. M. das, Santos, J. A. dos, Guerra, N. M., & Melo, P. G. de. (1996). Mecânica dos Solos e Fundações II. *Instituto Superior Técnico*.
- Griffiths, D., & Fenton, G. A. (2004). Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(5), 507–518.
- Griffiths, D., Huang, J., & Fenton, G. (2010). Comparison of slope reliability methods of analysis. *GeoFlorida: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 1952–1961.
- Griffiths, D., Huang, J., & Fenton, G. A. (2008). Probabilistic Stability Analysis of Shallow Landslides using Random Fields. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 1–6.
- Griffiths, D., Huang, J., & Fenton, G. A. (2011). Probabilistic infinite slope analysis. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 577–584.
- Griffiths, D., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 387–403.
- Hasofer, A. M., & Lind, N. C. (1974). Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100(1), 111–121.

- Honjo, Y., Hara, T., & Le, T. K. (2010). Level III reliability based design of examples set by ETC10. *Proceeding of the 2nd International Workshop on the Evaluation of Eurocode*, 1–11.
- Huang, J., Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2011). System Reliability of slopes by RFEM. *Japanese Geotechnical Society*, 50(3), 343–353.
- Johari, A., & Javadi, A. a. (2012). Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method. *Scientia Iranica*, 19(3), 423–429.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterising soil properties. *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, Geotechnical Special Publication*, 201, 49–75.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1998). Risk and reliability in geotechnical engineering. *Proceedings: Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri*, 1172–1192.
- Lambe, T., & Whitman, R. (1979). Soil mechanics. *Jonh Wiley*, 353–373.
- Law, K., & Lumb, P. (1978). A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 113–122.
- Li, D., Tang, X., Zhou, C., & Phoon, K.-K. (2012). Uncertainty analysis of correlated non-normal geotechnical parameters using Gaussian copula. *Science China Technological Sciences*, 55(11), 3081–3089.
- Liang, R. Y., Nusier, O. K., & Malkawi, A. H. (1999). A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams. *Engineering Geology*, 54(3-4), 271–285.
- Low, B. K., Lacasse, S., & Nadim, F. (2007). Slope reliability analysis accounting for spatial variation. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1(4), 177–189.
- Martins, F. (2006). Dimensionamento de fundações superficiais recorrendo ao Eurocódigo 7. *UMINHO*, 997–1002.
- Miranda, T. (2012). Taludes Rochosos - Material de apoio à Geotecnia II. *UMINHO*.
- Miranda, T., Ribeiro e Sousa, L., & Gomes Correia, A. (2008). Metodologia bayesiana para a actualização do módulo de deformabilidade numa estrutura subterrânea. *Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 1–8.
- Naylor, D. (1982). Finite elements and slope stability. *Numerical Methods in Geomechanics*, 229–244.
- Papaoannou, I., & Straub, D. (2012). Reliability updating in geotechnical engineering including spatial variability of soil. *Computers and Geotechnics*, 42, 44–51.
- Pham, H., & Fredlund, D. (2003). The application of dynamic programming to slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 847, 830–847.
- Pham, H., Fredlund, D., & Jr, G. G. (2001). Slope stability analysis using dynamic programming combined with finite element stress analysis. *International Conference on the Management of the Land and Water Resources*, 1–9.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 612–624.

- Pires, D. F. (2009). Taludes rochosos reforçados - Comparação de modelos numéricos com soluções analíticas explícitas. *Dissertação de Mestrado Em Engenharia Civil, FEUP*.
- Roddeman, D. (2014). TOCHNOG PROFESSIONAL User's manual Version 17, 1–292.
- Schweiger, H. F., & Peschl, G. M. (2005). Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics*, 32(6), 422–435.
- Šejnoha, M., Šejnoha, J., Kalousková, M., & Zeman, J. (2007). Stochastic analysis of failure of earth structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 22(2), 206–218.
- Sevaldson, R. A. (1956). The Slide in Lodalen, October 6th, 1954. *Géotechnique*, 6(4), 167–182.
- Silva, J. P. M. da. (2011). Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes. *Dissertação de Mestrado Em Engenharia Civil, FEUP*.
- Suchomel, R., & Mašín, D. (2009). Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c–u soil. *Computers and Geotechnics*, 37(1-2), 132–140.
- Teixeira, A. (2012). Reliability and Cost Models of Axial Pile Foundations. *Tese de Douturamento, UMINHO*.
- Teixeira, A., Gomes Correia, A., Henriques, A., & Honjo, Y. (2012). Dimensionamento e avaliação da segurança de uma estaca com carga vertical baseado em análises de fiabilidade. *UMINHO*.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Transportation Research Board Special Report*, 11–33.
- Wang, Y., Cao, Z., & Au, S.-K. (2010). Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), 1015–1022.
- Wu, T. H. (2009). Reliability of geotechnical predictions. *Geotechnical Risk and Safety*, 3–10.
- Yu, H. S., Salgado, R., Sloan, S. W., & Kim, J. M. (1998). Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 1–11.
- Zheng, H., Liu, D. F., & Li, C. G. (2005). Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 64(14), 1871–1888.
- Zienkiewicz, O. C., & Cheung, Y. K. (1967). The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, 1.