

OS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE E DOS ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

JOÃO PAULO MOREIRA DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor José Couto Marques

Co-Orientador: Professor Doutor Manuel de Matos Fernandes

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha família

A felicidade não se recebe como algo que cai do céu.

*Descobre-se no sofrimento das decisões a tomar
e nas escolhas por vezes difíceis.*

*A felicidade não é só um presente vindo de fora:
faz parte dos presentes que cada um prepara para si.*

anónimo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra me ajudaram na realização deste trabalho, de modo especial à Sónia, à minha família e aos meus colegas de curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Couto Marques, sempre disponível, muito receptivo e interessado, que foi capaz de me inculcar um gosto cada vez maior pelas matérias estudadas, e cuja competência muito contribuiu para a valorização deste trabalho.

RESUMO

A temática da estabilidade de taludes reveste-se de uma importância cada vez mais significativa nos nossos tempos, dadas as necessidades de expansão urbana e de ocupação de locais cuja estabilidade levanta algumas reservas, como é o caso dos taludes, especialmente os naturais, aqueles que existem na Natureza sem a intervenção da mão humana. Com alguma frequência são noticiados casos de escorregamentos de terras, especialmente no tempo das chuvas, em que a subida do nível freático altera a distribuição de tensões no solo, incrementando as tensões neutras, diminuindo as tensões efectivas e introduzindo forças de percolação, o que se traduz numa menor resistência ao corte e, consequentemente, numa maior tendência para a instabilidade.

O autor propõe-se neste trabalho a desenvolver um programa de cálculo de estabilidade de taludes, utilizando os métodos de equilíbrio limite de Correia e de Morgenstern-Price, ambos rigorosos, passíveis de aplicação à análise de superfícies de rotura com qualquer configuração. Para isso utiliza-se a linguagem de programação Matlab que, para além de ser muito actual, dispõe de uma grande capacidade de cálculo matricial e de boas capacidades gráficas para visualização de resultados.

Nesse sentido, faz-se uma breve discussão acerca da estabilidade de taludes, da Teoria de Equilíbrio Limite e do Método das Fatias, procurando dar alguma relevância aos métodos implementados no programa TALUDES_Mv1. Por outro lado, são apresentadas algumas ideias acerca do Método dos Elementos Finitos, uma vez que é a metodologia utilizada para realização dos estudos paramétricos comparativos desenvolvidos.

O programa TALUDES_Mv1 é, então, exposto desde a sua concepção ao modo de utilização, evidenciando as suas características, potencialidades e limitações. Os resultados provenientes do cálculo com esta nova ferramenta são comparados com os obtidos pelos programas Plaxis e Phase2, e discutidos à luz das teorias que os permitem obter.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, equilíbrio limite, elementos finitos, método de Correia, método de Morgenstern-Price, Matlab.

ABSTRACT

The subject of slope stability is becoming increasingly significant nowadays, given the need for urban expansion and occupation of sites whose stability has certain reservations due to the presence of slopes, particularly the natural ones, those that exist in nature without the intervention of the human hand. With some frequency cases are reported of landslides, especially in the rainy season, in which the rise of groundwater level changes the stress distribution in the ground, increasing pore pressure, decreasing the effective stress and introducing seepage forces, leading to lower shear strength and, consequently, to a greater tendency for instability.

The author proposes in this work to develop a program for the analysis of slope stability using the Correia and the Morgenstern-Price methods of limit equilibrium, both rigorous methods, able to be applied to the analysis of failure surfaces with any configuration. For this purpose shall be used the programming language Matlab that, besides being very widespread, has excellent matrix algebra features and good graphics capabilities for displaying results.

To that end a brief presentation is made about the stability of slopes, followed by a reference to Limit Equilibrium Theory and the Method of Slices, with the aim of giving some relevance to the methods implemented in the program TALUDES_Mv1. On the other hand some ideas are presented about the Finite Element Method, once it is the methodology used to perform the comparative parametric studies developed.

The program TALUDES_Mv1 is then fully described, from its conception to its user interface, highlighting its features, potential and limitations. The results supplied by this new tool are compared with those obtained by the Plaxis and Phase2 finite element programs, and discussed in the light of their respective underlying theories.

KEYWORDS: slope stability, limit equilibrium, finite element, Correia Method, Morgenstern-Price method, Matlab.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES	3
2.1. GENERALIDADES	3
2.2. TEORIA DE EQUILÍBRIO LIMITE	8
3. MÉTODOS DAS FATIAS E MÉTODOS DE EQUILÍBRIO DE LIMITE	13
3.1. MÉTODO DAS FATIAS	13
3.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	17
3.2.1. Diferenças Relativas entre Métodos de Equilíbrio Limite na sua génese.....	17
3.2.1.1. Método de Fellenius.....	18
3.2.1.2. Método de Bishop	19
3.2.1.3. Método de Janbu (simplificado)	19
3.2.1.4. Método de Spencer.....	20
3.2.1.5. Método de Morgenstern-Price.....	20
3.2.1.6. Método de Correia	21
3.2.2. Avaliação dos Resultados Fornecidos pelos diferentes Métodos	21
3.2.2.1. Breve apresentação do método de Equilíbrio Limite Generalizado (GLE)	22
3.2.2.2. Apresentação dos resultados obtidos pelo GLE.....	23
4. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE	25
4.1. GENERALIDADES	25
4.2. MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE	26
4.2.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO	26
4.2.2. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_MV1	29
4.2.2.1. Determinação de FS e λ	30
4.2.2.2. Função de interacção $f(x)$	35

4.2.2.3. Linha de impulso.....	35
4.3. MÉTODO DE CORREIA.....	36
4.3.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO	36
4.3.2. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_Mv1	40
4.3.2.1. Determinação de FS e λ	40
4.3.2.2. Função de interacção $f(x)$	47
4.3.2.3. Linha de impulso	48
4.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	49
4.4.1. ASPECTOS GERAIS DA FORMULAÇÃO	49
4.4.1.1. Divisão do domínio contínuo	49
4.4.1.2. Aproximação no interior do elemento	50
4.4.1.3. Relações para cada elemento.....	50
4.4.1.4. Cálculo das deformações e tensões	51
4.4.2. APLICAÇÃO NA SIMULAÇÃO DE COLAPSO.....	52

5. DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO ESTUDO

5.1. GENERALIDADES.....	53
5.2. TALUDES_Mv1	53
5.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
5.2.2. ESTRUTURA DO PROGRAMA	54
5.2.3. INTRODUÇÃO DE DADOS	56
5.2.4. GEOMETRIA E ESTRATIFICAÇÃO DO TALUDE.....	60
5.2.5. CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO	61
5.2.6. DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO	61
5.2.7. DETERMINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES INVÁLIDAS	62
5.2.8. DIVISÃO DA MASSA INSTÁVEL EM FATIAS.....	64
5.2.9. CÁLCULO COM FENDA DE TRACÇÃO.....	64
5.2.10. DETERMINAÇÃO DO FACTOR DE SEGURANÇA	64
5.2.11. VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS.....	64
5.3. PLAXIS	66
5.3.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA	66
5.3.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE: “PHI-C REDUCTION”	66

5.4. PHASE2	67
5.4.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA	67
5.4.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE: “SHEAR STRENGTH REDUCTION”	67
 6. CASOS DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS	69
6.1. GENERALIDADES	69
6.2. CASO DE ESTUDO 1	69
6.2.1. Geometria e Características dos materiais	69
6.2.2. Estudos Paramétricos	70
6.2.3. Apresentação e Comparação dos Resultados	71
6.2.3.1. Problema 1	71
6.2.3.2. Problema 2	81
6.2.3.3. Problema 3	85
6.2.3.4. Problema 4	88
6.3. CASO DE ESTUDO 2	90
6.3.1. Geometria e Características dos materiais	90
6.3.2. Estudos Paramétricos	91
6.3.3. Apresentação e Comparação dos Resultados	91
6.3.3.1. Problema 5	91
6.3.3.2. Problema 6	100
6.3.3.3. Problema 7	103
6.3.3.4. Problema 8	106
6.4. SÍNTESE DOS RESULTADOS	110
 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
 BIBLIOGRAFIA	115
 ANEXO A – FICHEIRO DE RESULTADOS FORNECIDO PELO TALUDES_Mv1	119
ANEXO B – ROTINA “SUP_VAR_CIR” DO PROGRAMA TALUDES_Mv1	125
ANEXO C – ROTINA PARA O MÉTODO DE CORREIA (PROGRAMA TALUDES_Mv1)	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – À esquerda: deslizamento de uma encosta; à direita: estabilização da encosta (Gerscovich, 2009)	3
Fig. 2.2 – Escorregamento rotacional em talude homogéneo	4
Fig. 2.3 – Escorregamento rotacional em talude não homogéneo	4
Fig. 2.4 – Escorregamento por translação (superfície de deslizamento mista) em talude com camada fina menos resistente	5
Fig. 2.5 – Escorregamento por translação na presença de estrato mais competente a pequena profundidade.....	5
Fig. 2.6 – Escorregamento rotacional (Gomes, 2011)	5
Fig. 2.7 – Escorregamento por translação (Gerscovich, 2009)	6
Fig. 2.8 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada	7
Fig. 2.9 – Superfície de rotura abaixo e acima do pé do talude (à esquerda e à direita, respectivamente)	8
Fig. 2.10 – Talude com diferentes superfícies de deslizamento (Gerscovich, 2009)	8
Fig. 2.11 – Modelo de comportamento rígido plástico	10
 Fig. 3.1 – Divisão de um talude em fatias	13
Fig. 3.2 – Possível divisão de um talude real em fatias (Gomes, 2011).....	14
Fig. 3.3 – Forças de interacção entre fatias	14
Fig. 3.4 – Fatia genérica.....	14
Fig. 3.5 – Forças normais e de corte numa fatia genérica.....	17
Fig. 3.6 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Fellenius).....	18
Fig. 3.7 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Bishop)	19
Fig. 3.8 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Janbu simplificado)	19
Fig. 3.9 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Spencer).....	20
Fig. 3.10 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Morgenstern-Price)	20
Fig. 3.11 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Correia)	21
Fig. 3.12 – Factor de segurança vs. λ (Krahn, 2003).....	23
Fig. 3.13 – Factor de segurança vs. λ para uma superfície mista (Krahn, 2003)	24
 Fig. 4.1 – Massa associada ao deslizamento	26
Fig. 4.2 – Forças actuantes numa fatia genérica infinitesimal	26
Fig. 4.3 – Elemento da fatia na interface	28

Fig. 4.4 – Forças efectivas que actuam num elemento.....	28
Fig. 4.5 – Massa deslizando	30
Fig. 4.6 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Morgenstern-Price	30
Fig. 4.7 – Forças nas extremidades da primeira e última fatia.....	33
Fig. 4.8 – Exemplo de talude para análise pelo método de Correia	37
Fig. 4.9 – Fatia genérica para análise pelo método de Correia	37
Fig. 4.10 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Correia	40
Fig. 4.11 – Função “sino”	47
Fig. 4.12 – Fatia genérica para formulação da linha de impulso	48
Fig. 4.13 – Divisão de um domínio em elementos	50
Fig. 5.1 – Aspecto inicial do programa TALUDES_Mv1.....	54
Fig. 5.2 – Estrutura de cálculo do programa TALUDES_Mv1.....	54
Fig. 5.3 – Estrutura da rotina “SUP_VAR_CIR”	55
Fig. 5.4 – Quadro para introdução de dados gerais, dados de sismo e número de iterações	56
Fig. 5.5 – Quadro para introdução das características dos materiais	57
Fig. 5.6 – Quadro para introdução das coordenadas das superfícies dos estratos e do nível freático	57
Fig. 5.7 – Quadro para introdução das coordenadas da malha de centros e comprimento e largura da quadrícula.....	58
Fig. 5.8 – Quadro para definição das coordenadas das rectas tangentes e respectivo incremento	58
Fig. 5.9 – Quadro para introdução da superfície poligonal específica	58
Fig. 5.10 – Quadro para introdução da superfície circular específica	59
Fig. 5.11 – Definição do método de cálculo	59
Fig. 5.12 – Informação sumária do TALUDES_Mv1	59
Fig. 5.13 – Exemplo de informação de erro lançada pelo programa	60
Fig. 5.14 – Malha de centros e superfícies de deslizamento	61
Fig. 5.15 – Imagem fornecida pelo programa TALUDES_Mv1 (caso1).....	62
Fig. 5.16 – Imagem fornecida pelo programa TALUDES_Mv1(caso 2).....	62
Fig. 5.17 – Informação lançada pelo TALUDES_Mv1 quando a superfície circular específica introduzida não é válida	63
Fig. 5.18 – Informação lançada pelo programa no final do cálculo	65
Fig. 5.19 – Definição de S_{max} e S	68

Fig. 6.1 – Caso de estudo 1	70
Fig. 6.2 – Geometria (problema 1 – Plaxis)	71
Fig. 6.3 – Superfície de deslizamento (problema1 – Plaxis).....	71
Fig. 6.4 – Deformação da malha (problema 1 – Plaxis).....	71
Fig. 6.5 – Vectores deslocamento (problema 1 – Plaxis)	72
Fig. 6.6 – Geometria (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	72
Fig. 6.7 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 1 (problema1 – TALUDES_Mv1).....	73
Fig. 6.8 – Características dos estratos para a iteração 1 (problema1 –TALUDES_Mv1)	73
Fig. 6.9 – Superfície de deslizamento para a iteração 1 (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	73
Fig. 6.10 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 2 (problema 1 –TALUDES_Mv1).....	74
Fig. 6.11 – Superfície de deslizamento para a iteração 2 (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	74
Fig. 6.12 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 1 – TALUDES_Mv1)....	75
Fig. 6.13 – Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	75
Fig. 6.14 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 4 (problema 1 – TALUDES_Mv1)....	76
Fig. 6.15 – Superfície de deslizamento crítica para a iteração 4 (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	77
Fig. 6.16 – Escrita do programa TALUDES_Mv1 no final do cálculo (problema 1).....	77
Fig. 6.17 – Sobreposição das linhas de impulso de Correia e Morgenstern-Price (problema 1 – TALUDES_Mv1).....	78
Fig. 6.18 – Força X, força E, força N' (azul) e força S (verde), respectivamente (problema 1 – TALUDES_MV1)	78
Fig. 6.19 – Divisão da massa deslizante em secções (problema 1 – Plaxis)	79
Fig. 6.20 – Distribuição da força normal E	79
Fig. 6.21 – Distribuição da força tangencial X.....	80
Fig. 6.22 – Coordenadas da poligonal (problema 2 – TALUDES_Mv1)	81
Fig. 6.23 – Superfície desenhada pelo TALUDES_Mv1 (problema 2)	81
Fig. 6.24 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2).....	82
Fig. 6.25 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 2 – TALUDES_Mv1).....	82
Fig. 6.26 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2).....	83
Fig. 6.27 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 2 – TALUDES_Mv1).....	83
Fig. 6.28 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2).....	84
Fig. 6.29 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2).....	84

Fig. 6.30 – Maciço em estudo (problema 3 – Plaxis)	85
Fig. 6.31 – Superfície de deslizamento (problema 3 – Plaxis).....	85
Fig. 6.32 – Deformação da malha (problema 3 – Plaxis)	85
Fig. 6.33 – Vectores deslocamento (problema 3 – Plaxis).....	86
Fig. 6.34 – Superfície de deslizamento (problema 3 – TALUDES_Mv1)	86
Fig. 6.35 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 3 – TALUDES_Mv1) – tracções no topo do talude	86
Fig. 6.36 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após introdução de fenda de tracção (problema 3).....	87
Fig. 6.37 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 3 – TALUDES_Mv1)	87
Fig. 6.38 – Superfície de deslizamento (problema 4 – Plaxis).....	88
Fig. 6.39 – Deformação da malha (problema 4 – Plaxis).....	88
Fig. 6.40 – Vectores deslocamento (problema 4 – Plaxis).....	88
Fig. 6.41 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 4)	89
Fig. 6.42 – Superfície de deslizamento (problema 4 – TALUDES_Mv1)	89
Fig. 6.43 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 4 – TALUDES_Mv1)	89
Fig. 6.44 – Caso de estudo 2	90
Fig. 6.45 – Geometria (problema 5 – Phase2)	91
Fig. 6.46 – Superfície de deslizamento (problema 5 – Phase2)	91
Fig. 6.47 – Deformação da malha (problema 5 – Phase2)	92
Fig. 6.48 – Vectores deslocamento e deformação da superfície (problema 5 – Phase2)	92
Fig. 6.49 – Geometria do talude (problema 5 – TALUDES_Mv1)	92
Fig. 6.50 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 1 (problema 5 – TALUDES_Mv1)...	93
Fig. 6.51 – Superfície de deslizamento para a iteração 1 (problema 5 – TALUDES_Mv1).....	93
Fig. 6.52 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 2 (problema 5 – TALUDES_Mv1)...	94
Fig. 6.53 – Superfície de deslizamento para a iteração 2 (problema 5 – TALUDES_Mv1).....	95
Fig. 6.54 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1)...	95
Fig. 6.55 – Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1 – método de Correia).....	96
Fig. 6.56 – Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1 – método de Morgenstern-Price).....	96

Fig. 6.57 – Linha de impulso pelo método de Correia (problema 5 – TALUDES_Mv1)	97
Fig. 6.58 – Linha de impulso pelo método de Morgenstern-Price (problema 5 – TALUDES_Mv1)	97
Fig. 6.59 – Superfície de deslizamento (problema 5 – Plaxis)	98
Fig. 6.60 – Divisão da massa deslizante em secções (problema 5 – Phase2)	98
Fig. 6.61 – Distribuição da força normal E (problema 5)	99
Fig. 6.62 – Distribuição da força tangencial X (problema 5)	99
Fig. 6.63 – Superfície de deslizamento (problema 6 – Phase2)	100
Fig. 6.64 – Deformação da malha (problema 6 – Phase2)	101
Fig. 6.65 – Vectors deslocamento e deformação da superfície (problema 6 – Phase2)	101
Fig. 6.66 – Superfície de deslizamento (problema 6 – Phase2) para FS=0,97	101
Fig. 6.67 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 6 – TALUDES_Mv1)	102
Fig. 6.68 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 6 – TALUDES_Mv1) – tracções no topo do talude	102
Fig. 6.69 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 6 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção	103
Fig. 6.70 – Geometria (problema 7 – Phase2)	104
Fig. 6.71 – Superfície de deslizamento (problema 7 – Phase2)	104
Fig. 6.72 – Deformação da malha (problema 7 – Phase2)	104
Fig. 6.73 – Vectors deslocamento e deformação da superfície (problema 7 – Phase2)	105
Fig. 6.74 – Superfície de deslizamento (problema 7 – TALUDES_Mv1)	105
Fig. 6.75 – Linha de impulso de Correia (problema 7 – TALUDES_Mv1)	105
Fig. 6.76 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 7 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção	106
Fig. 6.77 – Geometria (problema 8 – Phase2)	107
Fig. 6.78 – Superfície de deslizamento (problema 8 – Phase2)	107
Fig. 6.79 – Deformação da malha (problema 8 – Phase2)	107
Fig. 6.80 – Vectors deslocamento e deformação da superfície (problema 8 – Phase2)	108
Fig. 6.81 – Características dos solos considerados na análise do problema 8	108
Fig. 6.82 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1)	108
Fig. 6.83 – Malha de centros e rectas tangentes (problema 8 – TALUDES_Mv1)	109

Fig. 6.84 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1)	109
Fig. 6.85 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção	109
Fig. 6.86 – Diferenças entre factores de segurança calculados pelo Plaxis e pelo TALUDES_Mv1 .	110
Fig. 6.87 – Diferenças entre factores de segurança calculados pelo Phase2 e pelo TALUDES_Mv1	111

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação do talude em função de FS	7
Quadro 3.1 – Listagem de equações	16
Quadro 3.2 – Listagem de incógnitas	16
Quadro 3.3 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite não rigorosos	18
Quadro 3.4 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite rigorosos	18
Quadro 4.1 – Equações que definem a função seno	48
Quadro 6.1 – Características dos materiais relativos ao caso de estudo 1	70
Quadro 6.2 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 1) e Plaxis – problema 1	74
Quadro 6.3 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 2) e Plaxis – problema 1	75
Quadro 6.4 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 3) e Plaxis – problema 1	76
Quadro 6.5 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 4) e Plaxis – problema 1	76
Quadro 6.6 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Plaxis – problema 3	87
Quadro 6.7 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Plaxis – problema 4	90
Quadro 6.8 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 1) e Phase2 – problema 5	94
Quadro 6.9 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 2) e Phase2 – problema 5	94
Quadro 6.10 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 3) e Phase2 – problema 5	97
Quadro 6.11 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 6	103
Quadro 6.12 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 7	106
Quadro 6.13 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 8	110

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b – largura da fatia [m];

c' – coesão [kPa];

E – força de interacção normal aplicada na interface entre fatias (kN/m); módulo de Young [MPa];

F – forças actuantes (kN/m);

F_f – factor de segurança associado à equação de equilíbrio de forças;

F_m – factor de segurança associado à equação de equilíbrio de momentos;

FS ou F_s – factor de segurança;

$f(x)$ – função representativa das forças de interacção;

f_0 – factor correctivo [m];

h – altura da fatia [m];

h_i – altura de um estrato numa superfície de rotura [m];

k_h – coeficiente sísmico horizontal;

k_v – coeficiente sísmico vertical;

l – comprimento da base das fatias [m];

M – momentos actuantes (kN.m);

N – tensão normal mobilizada na base das fatias [kN/m];

N' – tensão efectiva normal mobilizada na base das fatias [kN/m];

P_b (ou U) – resultante das pressões neutras na base das fatias [kN/m];

P_w – resultante das pressões neutras na face das fatias [kN/m];

Q – resultante das forças de interacção actuantes na fatia [kN/m]; sobrecarga (kN);

r – raio de circunferência [m];

S (ou T) – tensões de corte mobilizadas na base das fatias [kN/m];

u – pressão intersticial [kN/m];

W – peso próprio da fatia [kN];

X – força tangencial aplicada na interface entre fatias [kN/m];

x_c, y_c – coordenadas do ponto arbitrário C no método de Correia [m];

x_m, y_m – coordenadas do ponto médio da base das fatias [m];

$X_{máx}$ – força tangencial máxima na interface entre fatias [kN/m];

$y(x)$ – função característica da superfície;

$y'(x)$ – função característica da linha de pressão ou linha de impulsos;

Z_i – resultante das forças de interacção actuantes no lado da fatia (kN/m);

α – inclinação da base de uma fatia [°];

β – inclinação do talude [°];

γ – peso volúmico do solo [kN/m³];

Δf – variação da força de interacção;

ΔE – variação da força normal na interface entre fatias;

ΔX – variação da força tangencial ou de corte na interface entre fatias;

θ – inclinação da resultante das forças de interacção [°];

λ – factor adimensional de escala;

ξ – coordenada horizontal adimensional das funções de interacção de forças;

σ_n – tensão normal aplicada na base da fatia [kPa];

τ_f – resistência mobilizável [kN/m];

τ_{mob} – resistência mobilizada [kN/m];

τ_r – resistência ao corte do solo [kN/m];

ϕ – ângulo de atrito do solo [°];

ω_i – inclinação da sobrecarga com a vertical [°];

MEF – Método dos Elementos Finitos;

1

INTRODUÇÃO

A problemática da análise da estabilidade de taludes é uma questão transversal na área da geotecnia, em grande parte pelo risco que este tipo de obras geralmente comporta no caso de rotura, quer em termos de bens materiais quer em termos de vidas humanas.

A necessidade de ocupar novos espaços e de criar novas infra-estruturas, decorrente do aumento populacional e da cada vez mais exigente sociedade moderna, desencadeou, desde os inícios do século 20, uma série de estudos, que tinham como intuito o desenvolvimento de métodos que permitissem avaliar a resistência dos taludes, nomeadamente no que concerne à sua estabilidade. São vários os exemplos de situações onde se impõe este tipo de análise: barragens de terra, vias de comunicação, aterros, estabilização de escarpas, taludes naturais, etc.

A generalidade dos métodos desenvolvidos tem por base a Teoria do Equilíbrio Limite, e ainda hoje são bastante utilizados. Determinam a estabilidade de um talude unicamente por considerações de equilíbrio, adoptando hipóteses para resolver a indeterminação estática associada a cada análise. Com o desenvolvimento dos computadores, a implementação desses métodos tornou-se mais fácil, principalmente daqueles que, por recorrerem a formulações matemáticas mais elaboradas, exigiam um esforço de cálculo muito maior, tornando-se, por isso, menos atractivos (embora fossem mais rigorosos). Com o enorme aumento do poder de cálculo e a rápida difusão do computador pessoal, logo surgiram no mercado programas comerciais com a aplicação destes métodos, baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, com grande capacidade para resolverem problemas cada vez mais complexos, quer no que respeita à geometria e estratigrafia dos taludes, quer à inclusão das pressões neutras e de modelos de variação das forças de corte.

Mais recentemente, o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos tornou possível uma nova abordagem dos problemas de estabilidade. Para além de uma modelação mais realista dos aspectos relacionados com a obra em si, esta nova metodologia realiza o cálculo com base nas relações tensão-deformação dos materiais, possibilitando, para além disso, a especificação da lei de comportamento dos mesmos (linear elástica, não linear, elastoplástica, entre outras). Apesar de os resultados serem mais rigorosos, este tipo de análise exige um maior esforço computacional e a introdução de uma maior quantidade de dados, obrigando o utilizador à recolha de mais informação, muitas vezes inexistente ou difícil de obter.

Perante estas duas possibilidades de análise, métodos baseados na Teoria de Equilíbrio Limite e Método dos Elementos Finitos, é essencial para um profissional de engenharia (Duncan,1996) a resposta a determinadas questões tais como “quais os métodos mais precisos e quais os menos precisos?”, “para que condições são eles precisos?”, “quais as diferenças, em termos de resultados, entre a aplicação do Método dos Elementos Finitos e a aplicação de métodos baseados na Teoria de

Equilíbrio Limite?”, com vista a uma decisão ponderada entre esforço de cálculo e fiabilidade de resultados.

Este trabalho propõe-se efectuar a comparação de resultados obtidos através de métodos baseados na Teoria de Equilíbrio Limite e Método dos Elementos Finitos. Para isso, o autor realizou o desenvolvimento de um programa em Matlab de cálculo da estabilidade de taludes, designado por TALUDES_Mv1, onde implementou os métodos de Morgenstern-Price (1965) e de Correia (1988), considerados na bibliografia como métodos rigorosos, uma vez que garantem todas as condições de equilíbrio. Este programa poderá, de alguma forma, ser utilizado em trabalhos posteriores para análises deste tipo, nomeadamente pelos estudantes de Engenharia Civil, tendo em conta que a ferramenta de cálculo Matlab está disponível nos computadores da FEUP.

Para uma melhor compreensão destas matérias por parte do leitor, começa-se por uma visão geral das análises de estabilidade, incidindo particularmente na Teoria de Equilíbrio Limite, tipos de análise e métodos de cálculo com ela relacionados, bem como vantagens e limitações mais relevantes. Segue-se uma apresentação do método das fatias e dos correspondentes métodos de equilíbrio limite, principais diferenças e limitações.

Posteriormente, far-se-á uma explanação detalhada dos algoritmos implementados no programa TALUDES_Mv1, correspondentes aos dois métodos rigorosos referidos, e a uma descrição do Método dos Elementos Finitos, procurando também, no que a este método diz respeito, fazer uma síntese das suas vantagens e dificuldades para o tipo de cálculo supracitado.

Segue-se uma descrição do programa desenvolvido, procurando expor as suas potencialidades, limitações e modo de introdução dos dados. Após a descrição das características geométricas e materiais dos problemas a analisar, apresentar-se-ão os resultados provenientes do cálculo. Estes serão alvo de discussão, comparando os obtidos pelo TALUDES_Mv1 com os fornecidos pelo software comercial Plaxis e Phase2 (programas onde está implementado o Método dos Elementos Finitos). O trabalho termina com a apresentação das conclusões resultantes da discussão dos resultados, utilizando as três ferramentas referidas.

Whitman e Bailey (1967) escreveram no prefácio para a primeira “Conferência sobre Estabilidade e Desempenho de Taludes e Aterros”: “Let us begin by imagining how we might wish to perform slope stability analyses using a computer.” Referiam-se à eficiência das máquinas, à possibilidade de visualização dos resultados de cálculo, à rapidez do processamento, à busca automática da superfície de deslizamento crítica mudando apenas as condições iniciais de busca, à facilidade de realização de estudos paramétricos através da mudança ou inclusão de novos parâmetros. Estamos nessa era tão desejada por estes dois autores. Muitos estudos foram feitos mas há ainda muito por investigar. O autor espera com este trabalho contribuir, de alguma forma, para o aumento de conhecimento nesta área tão relevante da Geotecnia que é a estabilidade de taludes.

2

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

2.1. GENERALIDADES

A realização de análises de estabilidade de taludes pode ter vários objectivos, conforme a origem natural ou artificial do problema em estudo (Campos e Matos, 1980). Os taludes naturais e escavações existem na natureza com grau de estabilidade superior a 1, pretendendo-se, por isso, avaliar a necessidade ou não de medidas de estabilização para impedir que esse grau baixe e se dê o colapso. A figura 2.1 mostra o exemplo de um talude natural que se transformou em mecanismo e o tratamento a que foi sujeito, posteriormente à derrocada, para impedir novos acidentes similares.



Fig. 2.1 – À esquerda: deslizamento de uma encosta; à direita: estabilização da encosta (Gerscovich, 2009)

No caso de barragens ou de aterros (origem artificial), o objectivo desse tipo de análises será o de encontrar a inclinação adequada para os taludes de modo que o factor de segurança seja superior a 1, entrando em linha de conta com dois aspectos fundamentais: a segurança e os custos. Desta forma se encontrará a solução óptima.

Os tipos de rotura e os diversos cenários de obra tornam estas análises mais ou menos complexas, pelo que, para a maior parte dos casos, principalmente se se tratar de taludes naturais, é difícil encontrar um procedimento que permita a avaliação da segurança de uma forma geral (Matos Fernandes, 2006).

Um talude transforma-se em mecanismo quando, sob determinadas condições, uma massa de solo/rocha se desliga da restante e, ao perder a sua capacidade de equilíbrio, entra em movimento. Os tipos de movimento podem ser muito variados, dependendo das características do talude. Varnes (1978) classifica-os em:

- quedas (associados a rochas);
- tombamentos (associados a blocos);
- escorregamentos (associados a massas de rocha e/ou solo);
- expansões (associadas a rochas);
- fluxos (associados a rocha e/ou solo);
- complexos (como avalanches ou combinações de vários tipos de movimento).

No presente trabalho, os tipos de instabilidade analisados serão os que resultam num movimento de deslizamento da massa.

Os deslizamentos de um talude podem ser divididos em dois tipos: os escorregamentos por translação e os escorregamentos por rotação. Os primeiros ocorrem fundamentalmente quando um estrato mais resistente, subjacente à massa instável, se encontra a pouca profundidade e relativamente paralelo à superfície do talude. Os segundos são mais vulgares em solos homogêneos ou com características não muito distintas, em que a superfície de rotura se define com forma curva ou praticamente circular em muitos casos. Quando no interior de um estrato existe uma camada relativamente fina, constituída por um material mais fraco, a superfície de deslizamento pode assumir uma configuração mista, isto é, circular nas extremidades e poligonal no contacto com essa camada.

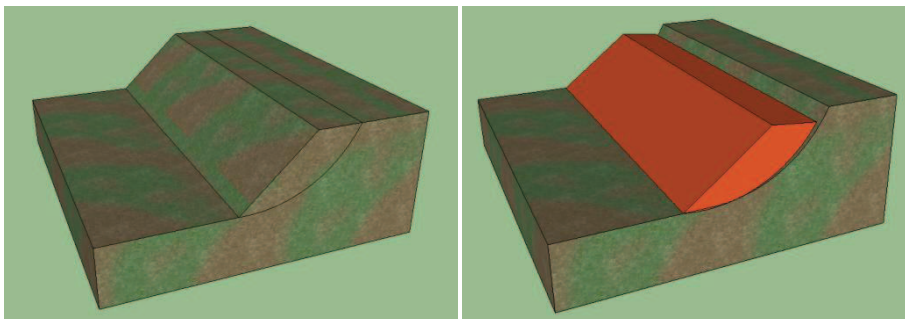


Fig. 2.2 – Escorregamento rotacional em talude homogêneo

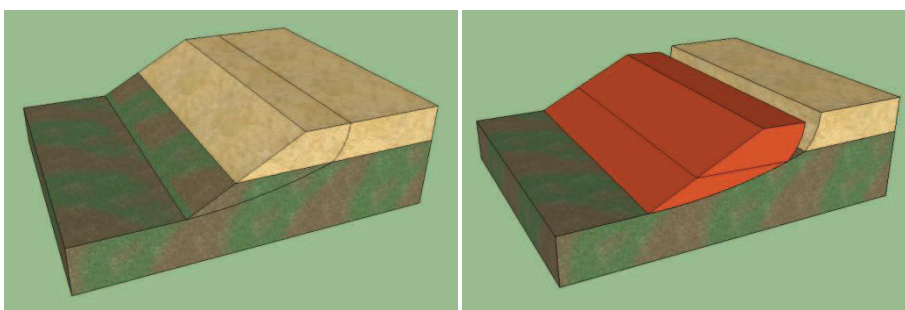


Fig. 2.3 – Escorregamento rotacional em talude não homogêneo

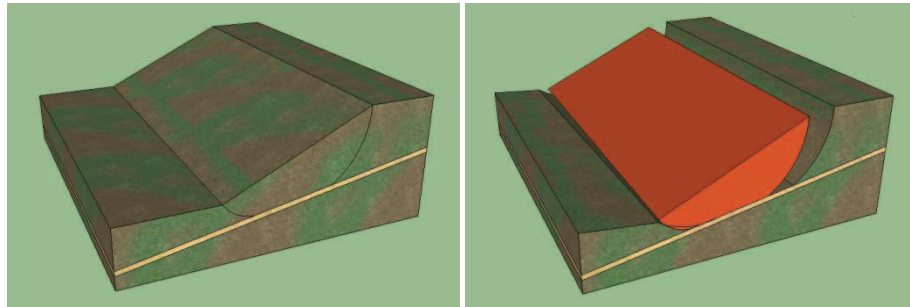


Fig. 2.4 – Escorregamento por translação (superfície de deslizamento mista) em talude com camada fina menos resistente

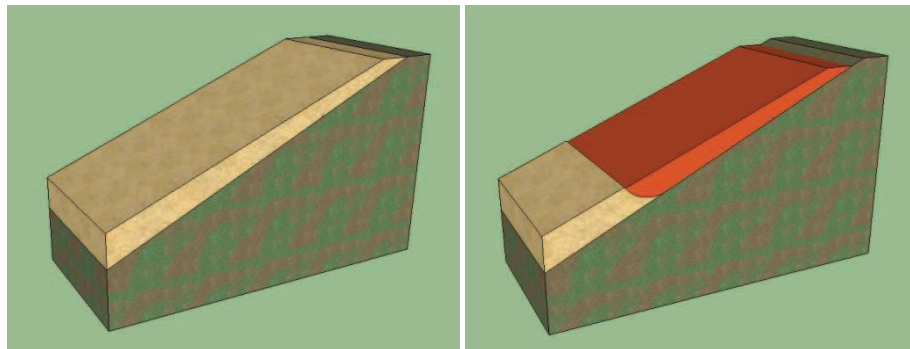


Fig. 2.5 – Escorregamento por translação na presença de estrato mais competente a pequena profundidade

Com as figuras 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5, criadas pelo autor no programa SketchUp, pretende-se elucidar o leitor acerca dos tipos de deslizamento acima identificados. Existem publicadas na bibliografia diversas imagens de casos reais em que este tipo de instabilidade ocorreu. É o caso das figuras 2.6 e 2.7 onde os movimentos por escorregamento rotacional e de translação, respectivamente, são bem evidentes.



Fig. 2.6 – Escorregamento rotacional (Gomes, 2011)



Fig. 2.7 – Escorregamento por translação (Gerscovich, 2009)

Os factores que contribuem para a ocorrência deste tipo de acidentes podem ser muito variados. Os mais frequentes, e apontados por vários autores na bibliografia existente, são os seguintes:

- deterioração das características mecânicas do solo pela acção dos vários agentes atmosféricos;
- variação do nível freático ao longo do ano;
- ocupação urbana;
- alterações na geometria do talude;
- ocorrência de sismos.

A presença destes factores resulta no aumento das solicitações actuantes e diminuição da resistência do solo, podendo conduzir à instabilidade e consequente ocorrência de deslizamentos.

Uma análise de estabilidade deve prever, perante um talude em estudo, o aumento de solicitação que o mesmo será capaz de suportar até se transformar num mecanismo. Tal acontecerá quando as tensões de corte máximas mobilizáveis pelo solo ao longo de uma determinada superfície (ditada precisamente pela maior ou menor resistência mobilizável entre partículas) forem ultrapassadas.

O aumento de solicitação atrás referido traduz-se, assim, na diferença entre a resistência mobilizável pelo solo, isto é, a resistência ao corte máxima que aquele solo específico consegue oferecer quando actuado, e a resistência mobilizada, aquela que seria necessária “gastar” para equilibrar o conjunto de carga actuante. Nash (1987) reforça precisamente esta ideia ao dizer: “At the moment of failure, the shear strength is fully mobilized along the failure surface when the critical state conditions are reached”.

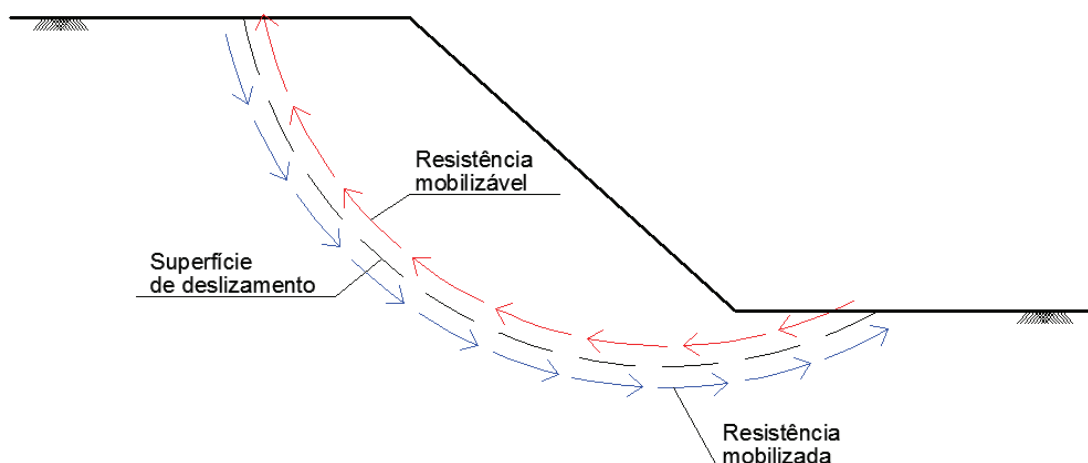


Fig. 2.8 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada

Desta forma se define o factor de segurança do talude (equação 2.1), parâmetro que permite perceber se o mesmo se encontra mais ou menos instável:

$$FS = \frac{\int \tau_f}{\int \tau_{mob}} \quad (2.1)$$

onde τ_f representa a resistência mobilizável e τ_{mob} a resistência mobilizada. A figura 2.8 ajuda a entender estes dois conceitos: as forças que impelem ao escorregamento, representadas pelas setas a azul, e as forças que se opõem ao movimento, representadas pelas setas a vermelho. Adiante se verá que o factor de segurança também pode ser calculado via equilíbrio de forças ou de momentos. Em todo o caso, a sua definição mantém-se: valor pelo qual se deve dividir a resistência do maciço para obter a resistência mobilizada (Matos Fernandes, 2006).

Quadro 2.1 – Classificação do talude em função de FS

Factor de Segurança (FS)	Estabilidade Relativa
FS<1	Instável (rotura certa)
FS=1	Equilíbrio instável
1<FS<1,5	Estabilidade precária
FS≥1,5	Estável

No quadro 2.1 apresenta-se a classificação do talude de acordo com o valor obtido para o factor de segurança. A sua determinação pode ser realizada através dos métodos de equilíbrio limite ou da aplicação do Método dos Elementos Finitos. As duas metodologias referidas serão abordadas mais detalhadamente em capítulo próprio.

2.2. TEORIA DE EQUILÍBRIO LIMITE

A Teoria de Equilíbrio Limite é a filosofia de cálculo base dos métodos de equilíbrio limite conhecidos na bibliografia. É utilizada para determinar o equilíbrio de uma massa de solo, cuja rotura ocorre ao longo de uma superfície plana, circular, poligonal ou mista, que pode passar acima ou abaixo do pé do talude, conforme mostra a figura 2.9.

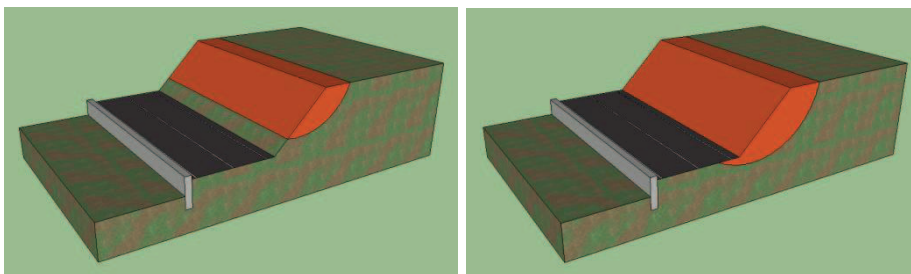


Fig. 2.9 – Superfície de rotura abaixo e acima do pé do talude (à esquerda e à direita, respectivamente)

Essa massa de solo acima da superfície de deslizamento é considerada como um corpo livre, admitindo-se que todas as partículas ao longo da linha de rotura atingiram a condição de $FS=1$. Desta forma, embora não seja totalmente verdadeiro, assume-se que o factor de segurança é o mesmo em todos os pontos.

A configuração da linha de rotura pode variar ao longo da extensão do talude, conduzindo a factores de segurança relativamente distintos de secção para secção (figura 2.10).

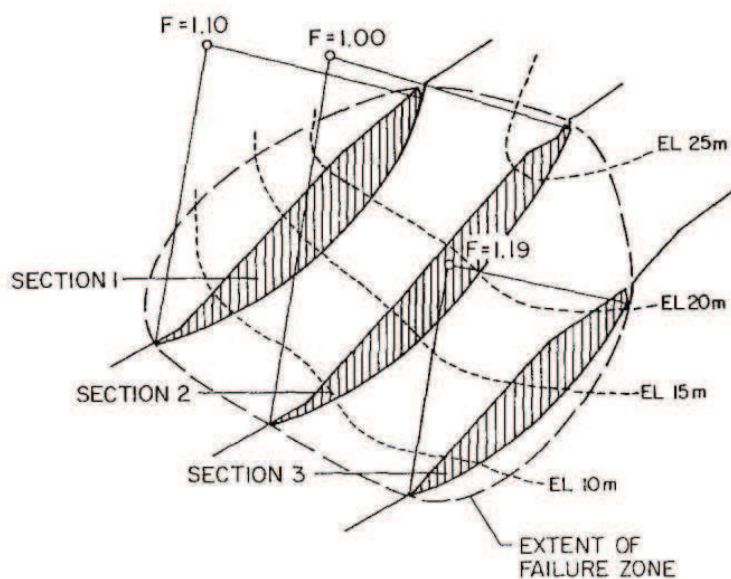


Fig. 2.10 – Talude com diferentes superfícies de deslizamento (Gerscovich, 2009)

Uma vez que a análise se faz a duas dimensões, considera-se para o estudo a secção mais crítica do talude, que pode ser, por exemplo, a de maior altura. Desta forma, não são tidos em conta os efeitos de confinamento lateral (Gomes, 2011).

A determinação do factor de segurança pode ser feita de três formas:

- equilíbrio de forças:

$$FS = \frac{\sum F_{estabilizadoras}}{\sum F_{instabilizadoras}} \quad (2.2)$$

- equilíbrio de momentos:

$$FS = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{instabilizadores}} \quad (2.3)$$

- equilíbrio limite ao corte:

$$FS = \frac{\int \tau_{mobilizável}}{\int \tau_{mobilizada}} \quad (2.4)$$

As duas primeiras equações podem conduzir a alguma confusão (indevida) na definição das componentes das forças e momentos que contribuem para a resistência ao deslizamento ou que se opõem ao movimento (Aryal, 2006). As componentes das forças bem como dos momentos resistentes são consideradas positivas se constituem um impedimento ao movimento da massa de solo. No entanto, essas mesmas componentes são por vezes incluídas com sinal negativo no denominador, por se considerar que impõem uma redução do valor da acção instabilizadora sobre o talude. Estas duas possibilidades de análise podem conduzir a factores de segurança diferentes, problema que não acontece se for utilizada a equação 2.4, em que o numerador é definido pelo critério de rotura a utilizar. Apesar disso, grande parte dos métodos de equilíbrio limite definem FS a partir da equação de equilíbrio de momentos, como se verá mais adiante.

A avaliação da resistência mobilizável ($\tau_{mobilizável}$ ou τ_f) é feita pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.5)$$

onde c' é a coesão, σ' é a tensão efectiva e ϕ' é o ângulo de atrito. A resistência mobilizada ($\tau_{mobilizada}$ ou τ_{mob}) é dada por:

$$\tau_{mob} = \frac{(c' + \sigma' \tan \phi')}{FS} \quad (2.6)$$

As expressões 2.5 e 2.6 são válidas para uma análise em tensões efectivas. O mesmo tipo de análise pode ser realizado em tensões totais se entrarmos na equação da resistência mobilizável com a resistência não drenada. A escolha por uma análise em tensões efectivas ou em tensões totais dependerá sempre daquela que for considerada a mais gravosa em termos de instabilidade.

A Teoria de Equilíbrio Limite é aplicada a vários tipos de análise de estabilidade que são comumente realizados pela aplicação de um dos três seguintes métodos (Gomes, 2011):

- método geral – as condições de equilíbrio são aplicadas a toda a massa de solo potencialmente instável, cujo comportamento se admite ser o de um corpo rígido;
- método das fatias – a massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, geralmente verticais, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada uma das fatias isoladamente;
- método das cunhas – a massa de solo potencialmente instável, dada a sua configuração e características resistentes, é dividida em cunhas, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada zona isoladamente.

Uma descrição detalhada destes métodos pode ser obtida na bibliografia. Para o presente trabalho interessa apenas uma breve explanação acerca do método das fatias, em capítulo próprio, uma vez que os métodos de equilíbrio limite que nos permitem obter os factores de segurança não são mais do que o método das fatias com a hiperstaticidade resolvida.

O autor julga, no entanto, pertinente apresentar algumas características/limitações que são transversais aos 3 métodos referidos (Duncan, 1996). A primeira tem a ver com o modelo de comportamento adoptado: o rígido plástico (figura 2.11). Admite-se que o solo rompe bruscamente sem que antes da rotura haja sinais de deformação. Desta forma, não existe qualquer informação em relação à magnitude das tensões no interior do talude nem da sua variação ao longo da superfície de deslizamento.

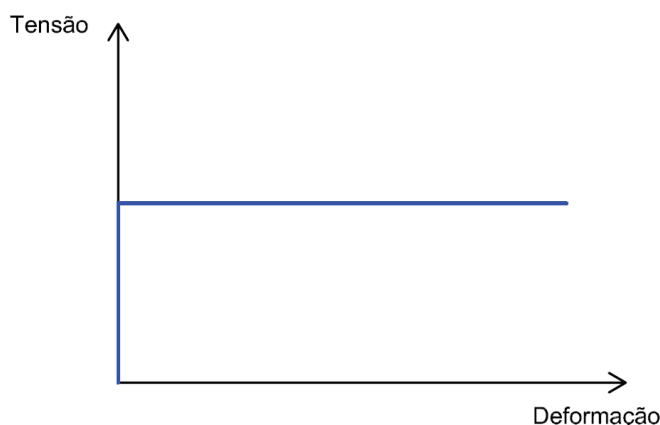


Fig. 2.11 – Modelo de comportamento rígido plástico

Outra questão pertinente prende-se com a possibilidade de ocorrência de rotura progressiva. Não é muito razoável admitir que aquela ocorra em todos os pontos da superfície de deslizamento ao mesmo tempo. De facto, inicia-se em alguns pontos (aqueles em que $\tau_{mob} > \tau_f$) e, à medida que as deformações aumentam, outros irão plastificar, atingindo também esses a rotura. Por isso, esta será progressiva e não abrupta, o que pode fazer com que, mobilizada toda a resistência numa pequena zona da superfície de deslizamento, a mobilizável noutras zonas da mesma superfície seja menor que a resistência máxima calculada. Assim, não há garantia que a máxima força possa ser mobilizada simultaneamente em todos os pontos da superfície de deslizamento.

A observação feita no parágrafo anterior leva a concluir, por outro lado, que o factor de segurança varia ao longo dessa superfície, quando, na realidade, os métodos assumem que o mesmo é constante.

A questão levantada acerca da rotura progressiva põe em causa um outro aspecto comum a todos métodos: a validade das equações da estática até ao momento em que aquela ocorre. Ora, sendo a rotura progressiva, o cálculo pelas expressões referidas não parece razoável, porque, de facto, o processo é dinâmico e não estático.

Outro aspecto limitador está relacionado com as simplificações adoptadas para resolver o problema da hiperstaticidade. No caso concreto das variantes do método das fatias, verifica-se que aquelas que apenas satisfazem o equilíbrio de forças (e não de momentos) fornecem factores de segurança menos satisfatórios, em termos de fiabilidade, do que aqueles que satisfazem as três equações de equilíbrio.

3

**MÉTODO DAS FATIAS E MÉTODOS
DE EQUILÍBRIO LIMITE****3.1. MÉTODO DAS FATIAS**

Conforme já referido no decorrer deste trabalho, grande parte das análises de estabilidade de taludes faz-se através do método das fatias. A sua aplicação consiste em arbitrar uma superfície de deslizamento, que pode assumir configuração circular ou não, e proceder ao cálculo do equilíbrio da massa de solo através das equações da estática:

$$\sum F_v = 0 \quad (3.1)$$

$$\sum F_h = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum M_o = 0 \quad (3.3)$$

O cálculo das expressões 3.1, 3.2 e 3.3 é realizado dividindo o solo acima da linha de rotura em fatias de faces verticais (figuras 3.1 e 3.2) e analisando o equilíbrio das mesmas.

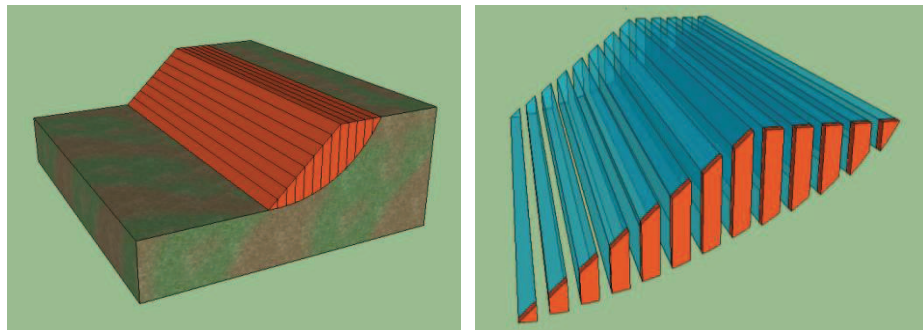


Fig. 3.1 – Divisão de um talude em fatias

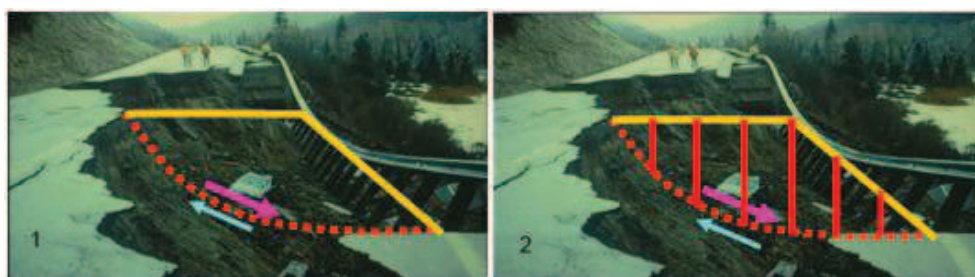


Fig. 3.2 – Possível divisão de um talude real em fatias (Gomes, 2011)

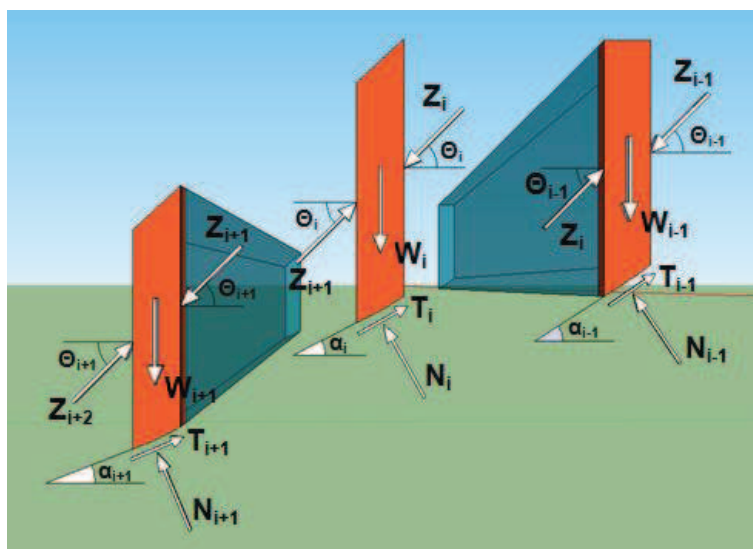


Fig. 3.3 – Forças de interacção entre fatias

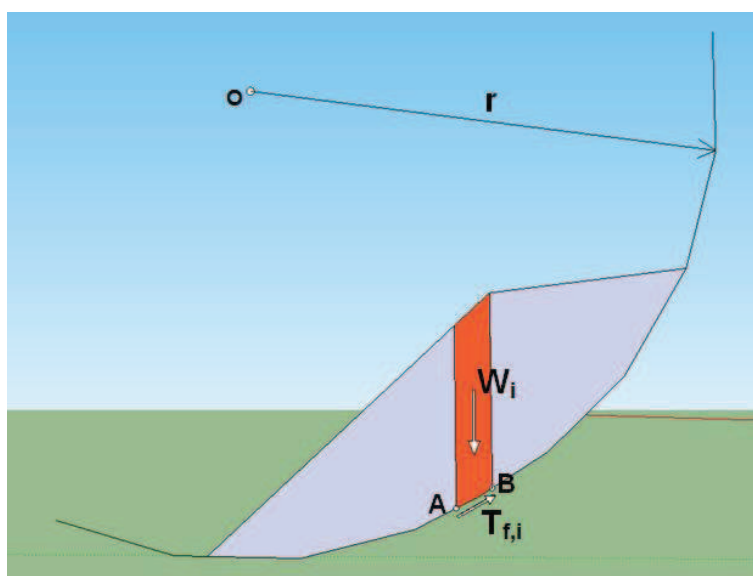


Fig. 3.4 – Fatia genérica

Escrevendo uma equação de momentos em relação ao ponto O (figura 3.4) e tendo em conta as forças representadas na figura 3.3, vem:

$$M_{est} = r \sum T_{f,i} * l_{AB,i} \quad (3.4)$$

$$M_{inst} = r \sum W_i * \sin \alpha_i \quad (3.5)$$

em que M_{est} é o momento das forças estabilizadoras (aquelas que se opõem ao deslizamento), $l_{AB,i}$ o comprimento do segmento recto que une os pontos A e B da base de uma fatia genérica i , e M_{inst} o momento das forças instabilizadoras (aquelas que favorecem o deslizamento).

Definindo o factor de segurança pela equação 2.3 e substituindo o numerador e denominador pelas expressões 3.4 e 3.5, respectivamente, vem:

$$FS = \frac{\sum T_{f,i} * l_{AB,i}}{\sum W_i * \sin \alpha_i} \quad (3.6)$$

Atendendo á definição de $T_{f,i}$ (equação 2.5) a expressão anterior pode ser escrita da forma:

$$FS = \frac{\sum (c'_i * l_{AB,i} + \sigma'_i \tan \phi'_i * l_{AB,i})}{\sum W_i * \sin \alpha_i} \quad (3.7)$$

Simplificando, pode escrever-se ainda:

$$FS = \frac{\sum (c'_i * l_{AB,i} + \tan \phi'_i N'_i)}{\sum W_i * \sin \alpha_i} \quad (3.8)$$

Por equilíbrio de forças segundo a direcção horizontal, vem:

$$Z_i \cos \theta_i - Z_{i+1} \cos \theta_i + N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i = 0 \quad (3.9)$$

onde Z_i e θ_i são a resultante das forças de interacção e sua inclinação com a horizontal, respectivamente, e N_i , α_i e T_i a reacção normal, a inclinação e a força tangencial na base da fatia, respectivamente.

Do equilíbrio de forças na direcção vertical resulta:

$$Z_i \sin \theta_i - Z_{i+1} \sin \theta_i + W_i - N_i \cos \alpha_i - T_i \sin \alpha_i = 0 \quad (3.10)$$

A obtenção da expressão de FS poderia ser feita, tal como já se referiu, através de uma equação de equilíbrio de forças ou pela equação de equilíbrio limite ao corte. A sua determinação a partir da equação de momentos é, no entanto, a mais utilizada pelos diferentes métodos de equilíbrio limite.

Analisando o número de incógnitas e o número de equações disponíveis verifica-se que o problema é estaticamente indeterminado. Sendo n o número de fatias, temos $(6*n-2)$ incógnitas para $(4*n)$ equações. Os quadros 3.1 e 3.2 fazem a listagem de cada uma das equações e incógnitas.

Quadro 3.1 – Listagem de equações

Equações	Tipo de equação
n	Equilíbrio de momentos
$2*n$	Equilíbrio de forças (em x e y)
n	Critério de rotura de Mohr-Coulomb
$4*n$	Total de equações

Quadro 3.2 – Listagem de incógnitas

Incógnitas	Tipo de variável
1	Factor de segurança
n	N' (força normal na base da fatia)
n	Ponto de aplicação de N'
n	T (força de corte na base da fatia)
$n-1$	Z (força de interacção entre fatias)
$n-1$	Θ (inclinação da força Z)
$n-1$	Ponto de aplicação de Z
$6*n-2$	Total de variáveis

Com o intuito de resolver o problema da hiperstaticidade, vários autores formularam novamente o método das fatias introduzindo hipóteses para reduzir o número de incógnitas. Uma das simplificações adoptada em todos os métodos consistiu em assumir que o esforço normal na base actua no ponto central da fatia, o que será razoável se ela for de largura infinitesimal. Desta forma o número de incógnitas ficou reduzido para $(5*n-2)$. Para $n>2$ o problema continua indeterminado, exigindo a implementação de outras simplificações, para além da exposta, o que resultou na origem de novos métodos de análise.

Em 1936, Fellenius introduziu o primeiro método para uma superfície de deslizamento circular, também conhecido por Método Sueco. Outros lhe sucederam, como por exemplo, Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Correia (1988), entre outros. A explanação detalhada de cada um extrapola o âmbito deste trabalho. Tal apenas será feito em relação

aos de Morgenstern-Price e Correia e em capítulo próprio, uma vez que foram os implementados no programa TALUDES_Mv1.

3.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

Com a evolução dos computadores surgiram vários estudos que fazem a avaliação relativa e comparação dos métodos de equilíbrio limite, especialmente nos últimos 25 anos, como refere Duncan (1996). Embora não se fazendo uma abordagem exaustiva de cada um dos métodos, o autor julga pertinente a apresentação das principais diferenças entre os mesmos, desde a sua génese aos resultados por eles fornecidos.

3.2.1. DIFERENÇAS ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE NA SUA GÉNESE

Dada a grande diversidade de métodos de equilíbrio limite, interessa dar a conhecer ao leitor os aspectos que os diferenciam e avaliar a consistência do cálculo na derivação do factor de segurança. O uso generalizado dos mesmos tornou-se uma realidade imediata, dada a facilidade de análise de geometrias mais ou menos complexas, com possibilidade de consideração de pressões neutras e de vários tipos de solos (Terzaghi and Peck, 1967). Compreenderá o leitor que a adequação dos mesmos para os diversos casos de obra poderá ser limitada, havendo uns mais apropriados que outros para o tratamento de certos problemas.

Conforme refere Krahn (2001), as grandes diferenças entre os métodos residem nas equações da estática que são satisfeitas, nas forças entre fatias consideradas no cálculo (normais e de corte), e na distribuição das forças de interacção. As forças normais e de corte actuam na base e nas faces laterais das fatias, conforme ilustrado pela figura Fig. 3.5, onde X_i representa a força tangencial e E_i a força normal entre fatias. Na base estão aplicadas N_i e T_i , a reacção normal e de corte, respectivamente.

Nos quadros 3.3 e 3.4 apresentam-se as características dos principais métodos de equilíbrio limite (os mais abordados na bibliografia). A partir do número de equações da estática consideradas no cálculo, é-lhes atribuída a classificação de métodos rigorosos ou não rigorosos. Os primeiros serão, naturalmente, aqueles que satisfazem as três condições de equilíbrio (força nas duas direcções e momentos). Embora o método de Janbu seja referido no quadro 3.3, o mesmo autor desenvolveu também um método rigoroso. No entanto esse não será aqui abordado.

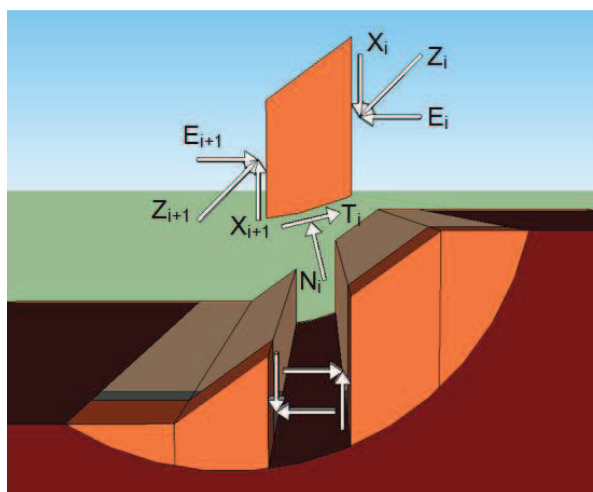


Fig. 3.5 – Forças normais e de corte numa fatia genérica

Quadro 3.3 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite não rigorosos

Métodos	Superfície	$\sum M_o=0$	$\sum F_h=0$	$\sum F_v=0$	Força E	Força X	Z
Fellenius	Circular	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não existe
Bishop Simplificado	Qualquer	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
Janbu Simplificado	Qualquer	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal

Quadro 3.4 – Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite rigorosos

Métodos	Superfície	$\sum M_o=0$	$\sum F_h=0$	$\sum F_v=0$	Força E	Força X	Z
Spencer	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável
Correia	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

3.2.1.1. Método de Fellenius

O método de Fellenius é o mais simples de todos, pois é o único que estabelece uma equação linear para determinação do factor de segurança, não sendo, por isso, necessário qualquer processo iterativo. Assume que as forças de interacção entre fatias são paralelas à base das mesmas, o que, dessa forma, permite dispensá-las do cálculo. De facto, esta simplificação não é verdadeira, pois as forças resultantes, sendo, segundo o método, paralelas à base, não podem ter a mesma inclinação em todas as fatias. Quando se passa para a análise da fatia seguinte, a inclinação muda (Fredlund, 1977). Desta forma, o princípio da acção-reacção de Newton não é satisfeito. A reacção normal na base das fatias (figura 3.6) pode ser obtida através do equilíbrio de forças segundo a direcção perpendicular à base ou através das equações de equilíbrio segundo a vertical e a horizontal. A equação do factor de segurança deriva de uma equação de momentos.

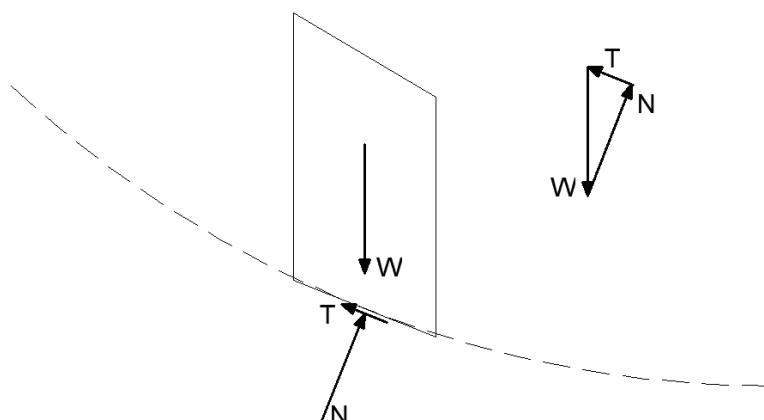


Fig. 3.6 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Fellenius)

3.2.1.2. Método de Bishop

O método de Bishop foi desenvolvido inicialmente para análise de superfícies circulares, mas a sua aplicação também é válida para superfícies não circulares. O método ignora as forças de corte entre as fatias (figura 3.7) e satisfaz apenas o equilíbrio de momentos (de onde deriva o factor de segurança). Os bons resultados de FS que este método fornece para determinado tipo de análises motivaram o seu estudo mais aprofundado. Zhu (2008) mostra que o facto de as forças de corte entre fatias não aparecerem na equação do factor de segurança não quer dizer que sejam zero, mas sim que um dos termos dessa equação seja zero. Tal acontece se se assumir uma distribuição adequada das forças de corte verticais entre fatias que satisfaça, ao mesmo tempo, o equilíbrio de forças horizontais. Daí a sua precisão quando comparado com outros métodos. A reacção normal na base é obtida através do equilíbrio de forças segundo a direcção vertical.

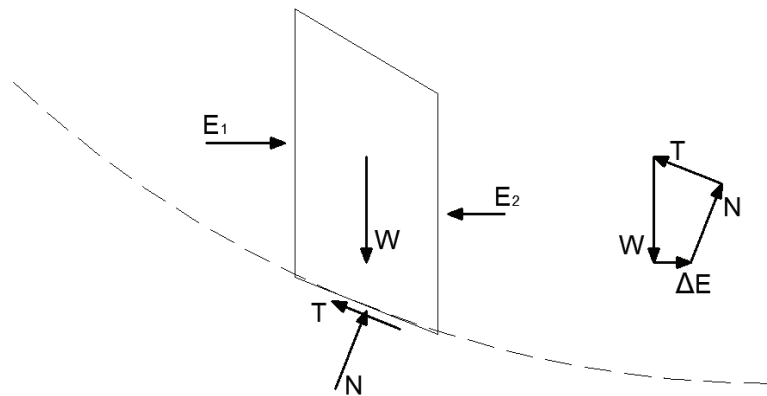


Fig. 3.7 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Bishop)

3.2.1.3. Método de Janbu (simplificado)

O método de Janbu (simplificado) ignora as forças normais e de corte entre fatias (figura 3.8) e satisfaz apenas o equilíbrio de forças. O método introduz um factor correctivo f_0 que multiplica pelo factor de segurança resultante do equilíbrio de forças segundo a direcção horizontal. Este factor correctivo existe para ter em conta as forças de interacção negligenciadas pelo método. O factor de segurança final é o que resulta do produto com f_0 . A reacção normal na base é calculada pela equação de equilíbrio de forças verticais (Fredlund, 1977).

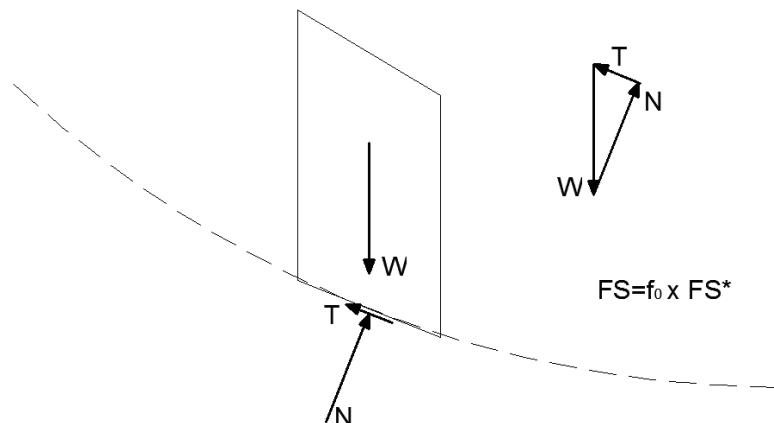


Fig. 3.8 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Janbu simplificado)

3.2.1.4. Método de Spencer

O método de Spencer, considerado rigoroso, satisfaz todas as equações de equilíbrio (momentos e forças). As forças de interacção entre fatias são representadas por uma resultante Q que assume uma inclinação constante θ com a horizontal, em cada fatia (figura 3.9). Spencer entendeu válida a hipótese de o rácio entre forças de corte (X) e forças normais (E) ser constante. Essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermédio da mesma. A reacção normal N é obtida pelo equilíbrio de forças na direcção paralela e perpendicular à base das fatias. O factor de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direcção horizontal ou paralela à base das fatias. O método prevê o cálculo de FS para os dois ângulos, correspondentes aos dois lados das fatias (Fredlund, 1977).

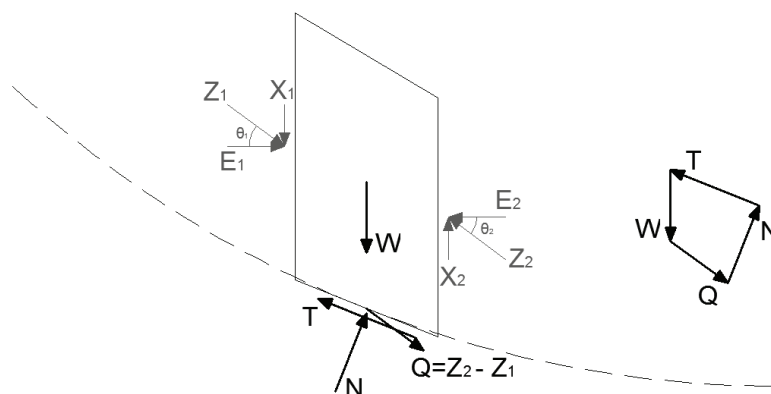


Fig. 3.9 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Spencer)

3.2.1.5. Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price será exposto com detalhe no capítulo 4. Pertence ao grupo dos métodos rigorosos, cumprindo, por isso, todas as condições de equilíbrio. As forças de interacção são, neste caso, controladas por uma função $f(x)$ multiplicada por um factor λ , que deve ser especificada previamente. Essa função determina a inclinação das forças entre fatias (figura 3.10). Se for constante este método dá os mesmos resultados que o de Spencer.

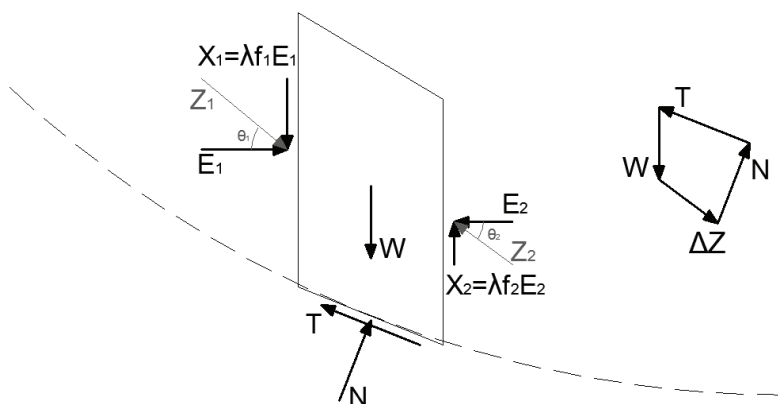


Fig. 3.10 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Morgenstern-Price)

O factor de segurança e o valor de λ são obtidos através da combinação das equações de equilíbrio de forças nas direcções normal e tangencial à base das fatias e de uma equação de momentos, formando um sistema. A obtenção da solução numérica é feita por iteração, dada a não linearidade das expressões, através do método de Newton-Raphson.

3.2.1.6. Método de Correia

O método de Correia também será exposto detalhadamente no capítulo 4. Tal como o anterior, assegura o cumprimento de todas as condições de equilíbrio e recorre a uma função $f(x)$ na sua formulação. A diferença em relação ao método de Morgenstern-Price está na distribuição da força tangencial de interacção (figura 3.11). Esta é obtida a partir da função referida, multiplicada por $X_{\max}$, parâmetro de escala calculado no processo de obtenção do factor de segurança. A função $f(x)$ “define qualitativamente a variação da força tangencial de interacção” (Correia, 1989) e deve ser escolhida previamente. O factor de segurança é obtido através de uma única equação não linear, sendo esta a grande vantagem em relação a todos os outros métodos ditos rigorosos. A sua dedução parte do equilíbrio de forças nas direcções horizontal e vertical e de uma equação de momentos em torno de um ponto arbitrário. A resolução da equação não linear do factor de segurança faz-se através do método de Newton-Raphson.

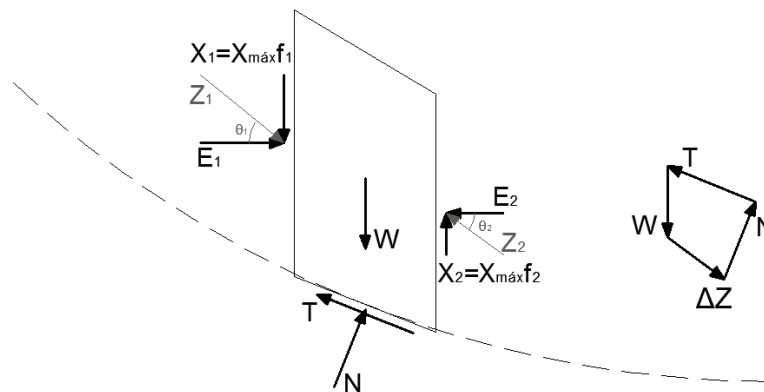


Fig. 3.11 – Fatia genérica e polígono de forças (método de Correia)

3.2.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS

A comparação dos resultados obtidos pelos vários métodos de equilíbrio limite, no cálculo de um problema específico de estabilidade de taludes, pode ser feita através da análise dos resultados de um único método, não mencionado até ao presente, que foi desenvolvido por Fredlund na Universidade de Saskatchewan: o método de Equilíbrio Limite Generalizado (Krahn, 2003).

Esta metodologia tem a vantagem de incorporar todas as hipóteses assumidas pelos restantes métodos, seleccionando para cada caso apenas as que interessam, incluindo as considerações relativas à distribuição das forças de interacção entre fatias. Quer isto dizer que a sua utilização permite extrair os mesmos factores de segurança que Bishop, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price quando aplicados individualmente ao mesmo caso de estudo.

3.2.2.1. Breve apresentação do método de Equilíbrio Limite Generalizado (GLE)

O método de Equilíbrio Limite Generalizado é uma extensão dos métodos de Spencer e Morgenstern-Price, na medida em que também nesta formulação as forças de interacção são determinadas por uma equação do tipo:

$$X = E\lambda f(x) \quad (3.11)$$

em que $f(x)$ é uma função, λ a percentagem do valor da função usada, e E e X as forças normal e tangencial de interacção, respectivamente. O método faz o cálculo de dois factores de segurança (Krahn, 2003), um formulado a partir do equilíbrio de momentos (F_m), outro a partir do equilíbrio de forças (F_f):

$$F_m = \frac{\sum [c'\beta R + (N - \mu\beta)R \tan \emptyset']}{\sum Wx - \sum Nf \pm Dd} \quad (3.12)$$

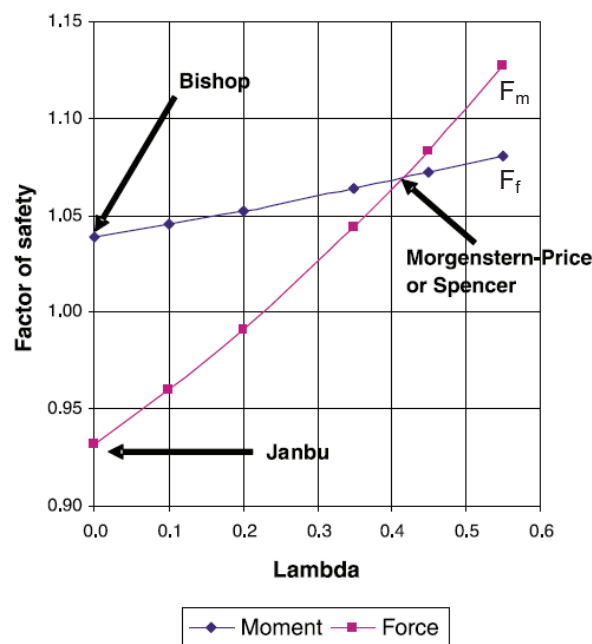
$$F_f = \frac{\sum [c'\beta \cos \alpha + (N - \mu\beta)R \tan \emptyset' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (3.13)$$

em que β , R , x , f , d e ω são parâmetros geométricos e D a linha de impulso (linha que contém os pontos laterais onde são aplicadas as forças de interacção de todas as fatias de um talude). A variável N , correspondente à força normal na base da fatia, é definida pela expressão 3.14.

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c'\beta \sin \alpha \tan \emptyset'}{(F_m \text{ ou } F_f)}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \emptyset'}{(F_m \text{ ou } F_f)}} \quad (3.14)$$

Naturalmente, a utilização de F_m ou de F_f no cálculo de N dependerá do tipo de análise a efectuar, e que passará pela utilização da equação 3.12 ou 3.13. Conforme refere o próprio Krahn (2003), um aspecto relevante deste procedimento tem a ver com a constatação de que a força N é dependente das forças tangenciais de interacção de cada lado das fatias. Em consequência, essa força será diferente para os vários métodos, dependendo da maneira como estes tratam as forças de interacção.

A comparação de resultados parte do traçado de um gráfico como o da figura 3.12, para uma geometria e função de interacção definidas previamente, onde nas abcissas estão valores de λ e nas ordenadas valores de FS. Os métodos de Bishop e Janbu não consideram a existência de forças tangenciais entre fatias ($\lambda = 0$). Por outro lado, o primeiro apenas satisfaz o equilíbrio de momentos e o segundo o equilíbrio de forças. Assim, os factores de segurança correspondentes aos dois métodos serão os apontados na figura 3.12.

Fig. 3.12 – Factor de segurança vs. λ (Krahn, 2003)

Como os métodos de Spencer e Morgenstern-Price garantem o cumprimento de todas as equações de equilíbrio, os seus factores de segurança corresponderão à ordenada do ponto de intersecção das duas rectas. O factor de segurança obtido será o de um ou outro método conforme a função adoptada para traduzir o comportamento das forças entre fatias.

3.2.2.2. Apresentação dos resultados obtidos pelo GLE

Os métodos de Bishop e de Janbu (simplificado) fornecem, em muitos casos, resultados de FS com uma precisão aceitável. No entanto, não verificam o equilíbrio conjunto de forças e momentos. O GLE demonstra que, no caso de superfícies de deslizamento circulares, o equilíbrio de momentos é independente das forças de corte entre fatias, embora o mesmo não se passe com o equilíbrio de forças. Já no caso de linhas de rotura planas (tipo cunha), a interdependência é precisamente ao contrário: equilíbrio de momentos dependente das forças tangenciais de corte e equilíbrio de forças independente daquelas. Por essa razão, o método de Bishop, que apenas verifica o equilíbrio de momentos, fornece valores bastantes aceitáveis de FS para linhas de rotura circulares, e recomenda-se para essas análises. Já o de Janbu, que apenas verifica o equilíbrio de forças, fornece valores bastante aceitáveis para linhas de rotura planares.

No caso de superfícies mistas, o GLE mostra que ambas as equações de equilíbrio estático dependem das forças de corte entre fatias. O comportamento das curvas em função de λ para os dois tipos de FS anteriormente referidos é o apresentado na figura 3.13.

Verifica-se que o factor de segurança diminui com λ , o mesmo é dizer, com o aumento das forças de corte entre fatias, quando aquele deriva do equilíbrio de momentos, e que aumenta quando provém do equilíbrio de forças. A análise do gráfico permite concluir, assim, que uma análise pelo método de Bishop, para este tipo de superfícies, pode conduzir a factores de segurança sobrestimados, e que a mesma análise aplicando o método de Janbu (simplificado) conduz a resultados muito afastados da

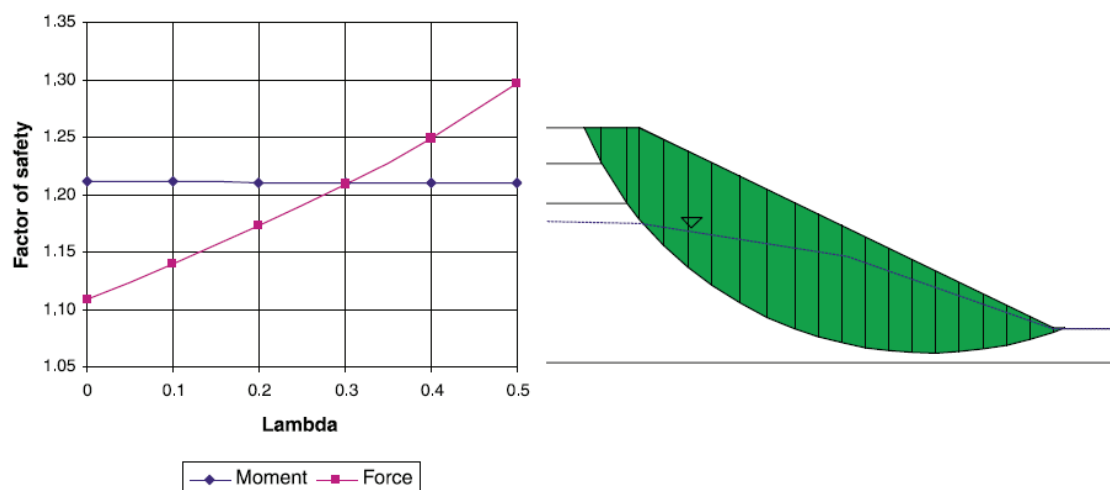


Fig. 3.13 – Factor de segurança vs. λ para uma superfície mista (Krahn, 2003)

realidade, embora do lado da segurança. Por outro lado, a utilização de métodos rigorosos, nomeadamente, Morgenstern-Price, Correia e Spencer, conduzirão a valores intermédios que parecem ser mais fiáveis.

No caso de taludes com cargas concentradas, ancoragens ou muros de suporte, verifica-se que os dois factores de segurança são muito sensíveis à variação das forças de interacção, pelo que estas não poderão ser, de forma alguma, descuradas nas análises deste género.

O tipo de função adoptada pode ter influência nos resultados para o caso de taludes com diferentes estratos. Verificou-se que as duas curvas de FS andam bastante próximas uma da outra para qualquer função de interacção mas, também, que, consoante a distribuição dessa mesma função, o ponto de intersecção das duas curvas pode dar-se para ordenadas muito diferentes ditando, consequentemente, factores de segurança também esses muito distintos.

Duncan (1996) refere que a máxima diferença entre factores de segurança calculados por métodos rigorosos, é de cerca de 12%, normalmente até menos, concluindo de seguida que da utilização dos mesmos se obtém uma boa resposta para o problema da estabilidade de taludes. No entanto, refere também que a precisão dos resultados dependerá, em boa medida, da precisão dos parâmetros introduzidos no cálculo: geometria, pesos volúmicos, pressões neutras, etc.

4

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

4.1. GENERALIDADES

O programa TALUDES_Mv1 conta com a implementação de dois métodos rigorosos de cálculo: o de Morgenstern-Price e o de Correia.

O primeiro método citado surgiu da necessidade de se estudarem superfícies de deslizamento não circulares, uma vez que essas são as mais frequentes na natureza, respeitando, por outro lado, o cumprimento total das condições de equilíbrio e de fronteira (Morgenstern and Price, 1965). O método conduz a bons resultados mas impõe a resolução de duas equações não lineares para obtenção do factor de segurança, tal como outros métodos rigorosos. Apesar disso, é dos que envolve menor dificuldade numérica.

O método de Correia (1989) é aplicável, tal como o anterior, a qualquer tipo de superfície de escorregamento e assegura o cumprimento total das condições de equilíbrio, com a vantagem de precisar apenas de uma equação não linear para obter valores de FS. O esforço de cálculo fica, desta forma, minorado quando comparado com outros métodos. A sua divulgação é ainda relativamente restrita mas o método revela grandes potencialidades de cálculo que devem ser exploradas, conforme atestado em vários trabalhos, nomeadamente, teses de mestrado, como é o caso de Silva (2010) e Freitas (2011).

Ambos os métodos necessitam de ser automatizados com um programa de cálculo para que a sua utilização se torne prática e expedita.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) apareceu na década de 60 e, apesar das suas potencialidades, implicava inicialmente custos enormes de utilização, tanto ao nível de inputs como de tempo em melhoramento das análises e avaliação de resultados. O desenvolvimento dos computadores conduziu ao aparecimento de diversos programas comerciais com esse método, tornando, por um lado, a sua utilização mais acessível e, por outro, o processamento de cálculo muito mais eficiente. No entanto, os ganhos de tempo em termos de cálculo não tiveram um efeito muito significativo no processo global de avaliação do factor de segurança, uma vez que esses “custos” representam não mais de 10% do custo total da análise (Duncan, 1996).

4.2. MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

4.2.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Morgenstern e Price partiram do talude apresentado na figura 4.1 para estudar o equilíbrio da massa assinalada a cinzento, limitada pela superfície do terreno (descrita pela equação $y = z(x)$) e por uma linha de rotura curva (dada por $y = y(x)$). Duas linhas de impulso são apresentadas na figura, ambas desconhecidas à partida: a linha de impulso relativa às forças efectivas ($y = y'_t(x)$) e a linha de impulso referente às pressões neutras ($y = h(x)$).

Na figura 4.2 apresentam-se as forças actuantes numa fatia infinitesimal da massa em equilíbrio.

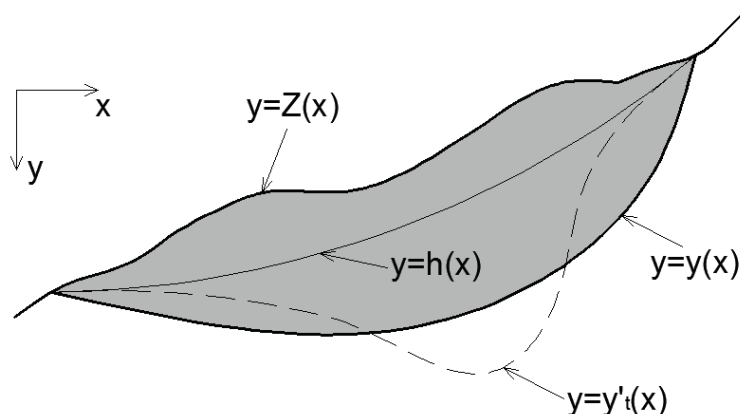


Fig 4.1 – Massa associada ao deslizamento

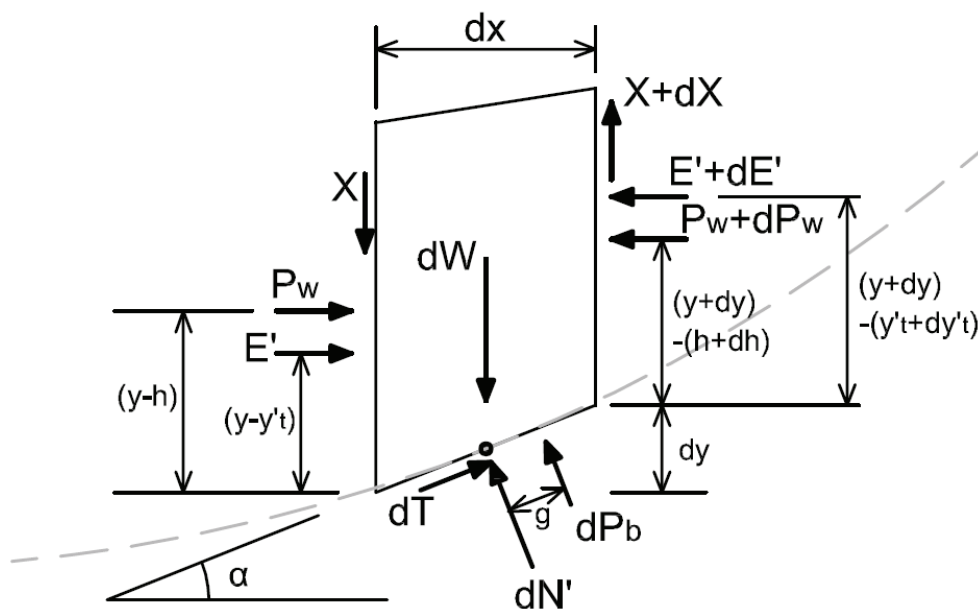


Fig 4.2 – Forças actuantes numa fatia genérica infinitesimal

O significado de cada uma das forças/parâmetros é o que se apresenta a seguir:

- E' - força normal efectiva de interacção;
- X - força tangencial de interacção;
- dW - peso da fatia;
- P_w - resultante das pressões neutras que actuam na face lateral da fatia;
- dP_b - resultante da pressão neutra na base da fatia;
- dN' - força normal efectiva na base da fatia;
- dT - força de corte na base da fatia;
- α - inclinação da base da fatia.

A formulação do método começa com uma equação de equilíbrio de momentos em torno do ponto médio da base da fatia (equação 4.1), condição suficiente para impedir a rotação da mesma:

$$E' \left[(y - y'_t) - \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] + P_w \left[(y - h) - \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] - (E' + dE') \left[y + dy - y'_t - dy'_t + \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] - X \frac{dx}{2} - (X + dX) \frac{dx}{2} - (P_w + dP_w) \left[(y + dy) - (h + dh) - \frac{dy}{2} \right] - dP_b \cdot g = 0 \quad (4.1)$$

Esta será a primeira equação diferencial dirigida para a solução do problema. Simplificando e resolvendo-a com dx a tender para zero, resulta na expressão:

$$X = \frac{d}{dx} (E' \cdot y'_t) - y \frac{dE'}{dx} + \frac{d}{dx} (P_w \cdot h) - y \frac{dP_w}{dx} \quad (4.2)$$

Através de equações de equilíbrio de forças nas direcções N e T obtêm-se as restantes condições da estática que devem ser satisfeitas no cálculo:

$$\text{direcção N:} \quad dN' + dP_b = dW \cos \alpha - dX \cos \alpha - dE' \sin \alpha - dP_w \sin \alpha \quad (4.3)$$

$$\text{direcção T:} \quad dT = dE' \cos \alpha + dP_w \cos \alpha - dX \sin \alpha + dW \sin \alpha \quad (4.4)$$

Por outro lado, o critério de rotura de Mohr-Coulomb permite a consideração de mais uma equação:

$$dT = \frac{1}{F} (c' \cdot dx \cdot \sec \alpha + dN' \cdot \tan \phi') \quad (4.5)$$

onde c' representa a coesão, ϕ' o ângulo de atrito e F o factor de segurança.

Atendendo ao facto de que as fatias são infinitesimais, dT pode ser eliminado das equações 4.4 e 4.5 e dN' da equação 4.3. Se igualarmos 4.4 a 4.5 e eliminarmos o termo dN' obtemos nova equação diferencial (4.6). Para isso, basta dividir ambos os membros por $dx \cdot \cos \alpha$, substituir $\tan \alpha$ por $-dy/dx$ e dP_b por $r_u \cdot dW \cdot \sec \alpha$, em que r_u é um termo definido por Bishop e Morgenstern, que relaciona a pressão neutra com o peso da fatia ($r_u = dP_b / (dW \cdot \sec \alpha)$). A equação resultante é a que a seguir se apresenta:

$$\begin{aligned} & \frac{dE'}{dx} \left[1 - \frac{\tan \phi'}{F} \frac{dy}{dx} \right] + \frac{dX}{dx} \left[\frac{\tan \phi'}{F} + \frac{dy}{dx} \right] = \\ & = \frac{c'}{F} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{dP_w}{dx} \left[\frac{\tan \phi'}{F} \frac{dy}{dx} - 1 \right] + \frac{dW}{dx} \left\{ \frac{\tan \phi'}{F} + \frac{dy}{dx} - r_u \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] \frac{\tan \phi'}{F} \right\} \quad (4.6) \end{aligned}$$

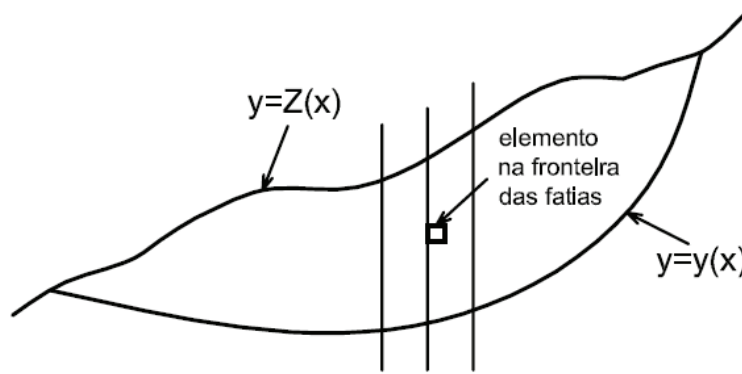


Fig 4.3 – Elemento da fatia na interface

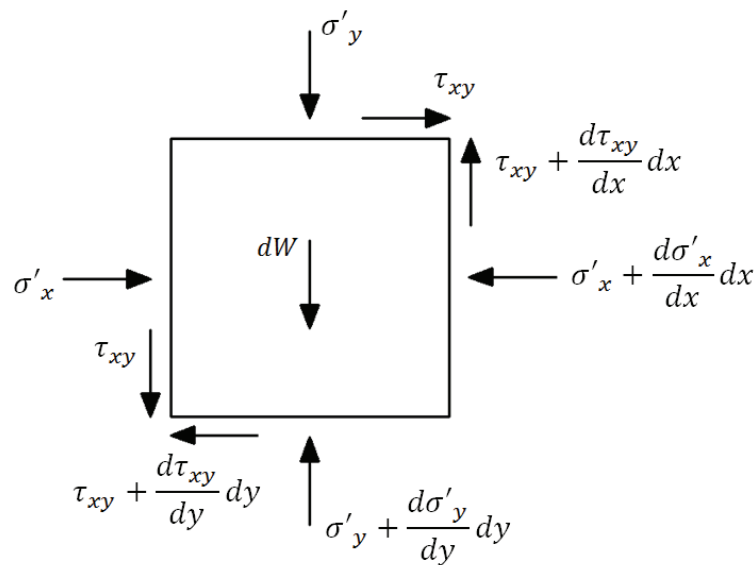


Fig 4.4 – Forças efectivas que actuam num elemento

As expressões 4.2 e 4.6 constituem as duas equações diferenciais definidoras do equilíbrio da massa em estudo (Morgenstern e Price, 1965).

Dada a definição da função y (em função de x), o problema é estaticamente indeterminado. Repare-se que as funções E' , X e y'_t são desconhecidas. Torna-se, por isso, necessário, introduzir simplificações para remover a hiperstaticidade.

Os dois autores partiram da distribuição das forças internas num elemento isolado junto da fronteira das fatias (figura 4.3) para obter uma relação entre as duas componentes da força de interacção (figura 4.4).

Definidas as forças internas normais e tangenciais, respectivamente, por:

$$E' = \int_z^y \sigma'_x(y) dy \quad (4.7)$$

$$X = \int_z^y \tau_{xy}(y) dy \quad (4.8)$$

os autores obtêm uma relação entre as forças E' e X , dada por:

$$X = \lambda f(x) E' \quad (4.9)$$

mas passaram a defini-las em termos de tensões totais, de forma a simplificar as expressões, conforme os próprios referem no artigo (Morgenstern e Price, 1965).

Assim, especificando uma distribuição razoável para as forças de interacção, restam as incógnitas λ e F cujos valores poderão ser encontrados com a resolução das expressões diferenciais 4.2 e 4.6. A função $f(x)$ terá que obedecer a alguns critérios, ditados pelo comportamento do solo, para que os resultados do factor de segurança sejam válidos.

Na divisão em fatias, o método assume que a base é linear, bem como as fronteiras entre estratos e destes com o nível freático. A própria função de interacção depende linearmente de x .

4.2.2. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_Mv1

O algoritmo implementado no TALUDES_Mv1 segue os mesmos passos que o apresentado por Zhu *et al.* (2005). Os algoritmos existentes até então, para além de não estarem facilmente acessíveis, revelavam-se algo morosos no cálculo. Zhu sentiu a necessidade de construir um mais simples e fácil de programar, em que as soluções de FS e λ fossem obtidas com menos esforço de cálculo, ao fim de poucas iterações.

As expressões que permitem encontrar os valores destas duas variáveis são relativamente complicadas e patenteiam forte não linearidade. Zhu trabalhou-as novamente obtendo duas equações mais simples para o cálculo de FS e λ , tornando o processo de programação e de cálculo muito mais eficiente.

4.2.2.1. Determinação de FS e λ

A metodologia adoptada prevê a divisão de uma massa deslizante em fatias, tal como preconizado pelo Método de Morgenstern-Price, sujeita a acção do peso próprio, forças sísmicas, pressões neutras e sobrecarga à superfície (esta última acção ainda não pode ser introduzida no TALUDES_Mv1). Difere da apresentada por Zhu apenas na numeração adoptada para o lado esquerdo e direito da fatia.

Considere-se, então, a fatia representada na figura 4.6, elemento parcelar de uma massa deslizante como, por exemplo, a da figura 4.5, e as forças nela representadas.

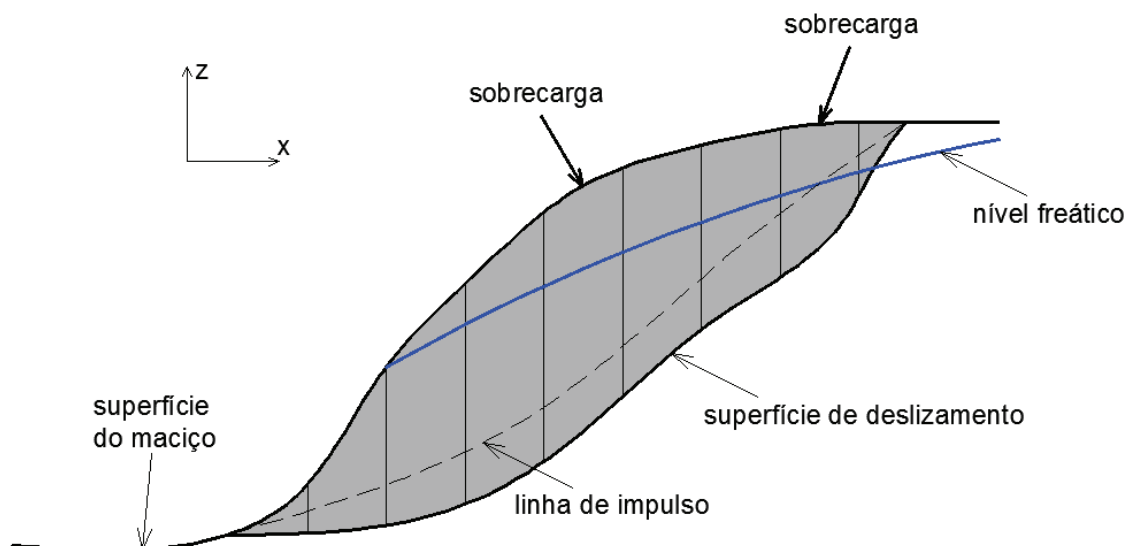


Fig 4.5 – Massa deslizante

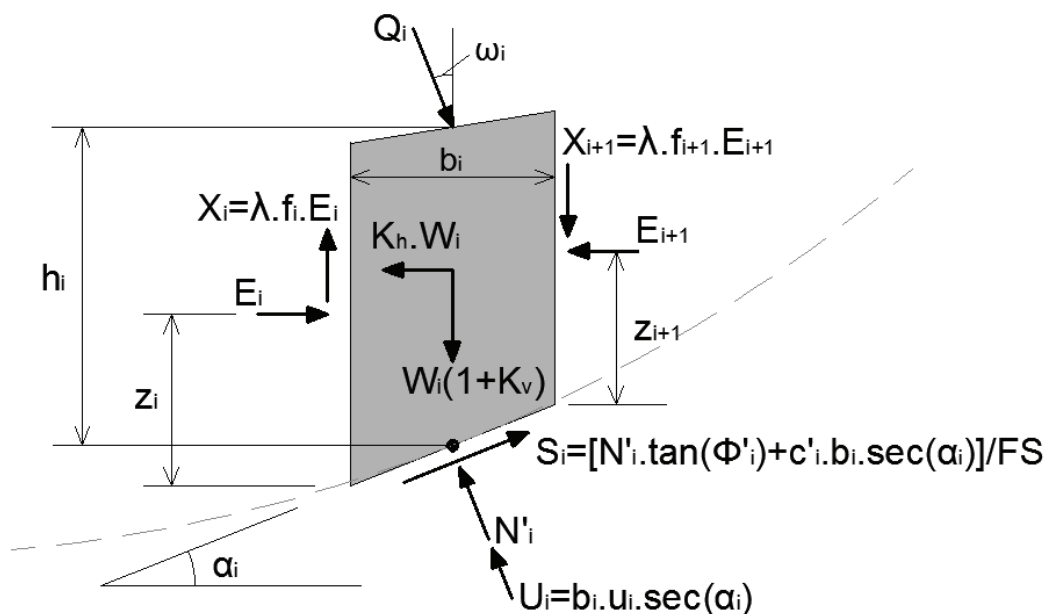


Fig 4.6 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Morgenstern-Price

De uma equação de equilíbrio de forças na direcção perpendicular à base resulta:

$$(W_i^* - \lambda f_i E_i + \lambda f_{i+1} E_{i+1} + Q_i \cos \omega_i) \cos \alpha_i + (-k_h W_i + E_i - E_{i+1} + Q_i \sin \omega_i) \sin \alpha_i - U_i - N'_i = 0 \quad (4.10)$$

em que

$$W_i^* = W_i(1 + k_v) \quad (4.11)$$

Com o mesmo procedimento, mas na direcção paralela à base, obtém-se:

$$-S_i + (W_i^* - \lambda f_i E_i + \lambda f_{i+1} E_{i+1} + Q_i \cos \omega_i) \sin \alpha_i - (-k_h W_i + E_i - E_{i+1} + Q_i \sin \omega_i) \cos \alpha_i = 0 \quad (4.12)$$

em que

$$S_i = \frac{N'_i \tan \phi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i}{F_s} \quad (4.13)$$

A variável F_s presente em 4.13 é o factor de segurança.

Resolvendo as expressões 4.10 e 4.12 em ordem a N'_i e S_i , respectivamente, obtém-se:

$$N'_i = (W_i^* - \lambda f_i E_i + \lambda f_{i+1} E_{i+1} + Q_i \cos \omega_i) \cos \alpha_i + (-k_h W_i + E_i - E_{i+1} + Q_i \sin \omega_i) \sin \alpha_i - U_i \quad (4.14)$$

e

$$S_i = \frac{N'_i \tan \phi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i}{F_s} = (W_i^* - \lambda f_i E_i + \lambda f_{i+1} E_{i+1} + Q_i \cos \omega_i) \sin \alpha_i - (-k_h W_i + E_i - E_{i+1} + Q_i \sin \omega_i) \cos \alpha_i \quad (4.15)$$

Introduzindo os termos $\bar{R}_i$ e T_i , em que:

$$\bar{R}_i = W_i^* \cos \alpha_i - k_h W_i \sin \alpha_i + Q_i \sin(\omega_i - \alpha_i) - U_i \quad (4.16)$$

e

$$T_i = W_i^* \sin \alpha_i + k_h W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin(\omega_i - \alpha_i) \quad (4.17)$$

as equações 4.14 e 4.15 podem ser reescritas, respectivamente, da forma:

$$N'_i = \bar{R}_i - E_{i+1}(\sin \alpha_i - \lambda f_{i+1} \cos \alpha_i) + E_i(\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \quad (4.18)$$

$$\frac{N'_i \tan \phi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i}{F_s} = T_i + E_{i+1}(\cos \alpha_i + \lambda f_{i+1} \sin \alpha_i) - E_i(\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) \quad (4.19)$$

Nestas expressões, o termo $\bar{R}_i$ é o somatório das componentes de força que contribuem para a resistência ao corte, com exceção da força tangencial de interação, e T_i é o somatório das componentes que tendem a causar instabilidade.

Se em 4.19 substituirmos N'_i pela equação 4.18 obtém-se:

$$\begin{aligned} & \frac{[\bar{R}_i - E_{i+1}(\sin \alpha_i - \lambda f_{i+1} \cos \alpha_i) + E_i(\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i)] \tan \phi'_i}{F_s} + \frac{c'_i b_i \sec \alpha_i}{F_s} = \\ & = T_i + E_{i+1}(\cos \alpha_i + \lambda f_{i+1} \sin \alpha_i) - E_i(\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Manipulando a expressão 4.20, esta toma a forma:

$$\begin{aligned} & E_{i+1}[(\sin \alpha_i - \lambda f_{i+1} \cos \alpha_i) \tan \phi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_{i+1} \sin \alpha_i) F_s] = \\ & = E_i[(\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \tan \phi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) F_s] - F_s \cdot T_i + \bar{R}_i \end{aligned} \quad (4.21)$$

A introdução das variáveis:

$$\Phi_{i+1} = (\sin \alpha_i - \lambda f_{i+1} \cos \alpha_i) \tan \phi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_{i+1} \sin \alpha_i) F_s \quad (4.22)$$

$$\Phi_i = (\sin \alpha_{i-1} - \lambda f_i \cos \alpha_{i-1}) \tan \phi'_{i-1} + (\cos \alpha_{i-1} + \lambda f_i \sin \alpha_{i-1}) F_s \quad (4.23)$$

$$\psi_i = \frac{[(\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \tan \phi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) F_s]}{\Phi_i} \quad (4.24)$$

permite que a expressão 4.21 seja escrita da forma:

$$E_{i+1}\Phi_{i+1} = \psi_i E_i \Phi_i + \bar{R}_i - F_s T_i \quad (4.25)$$

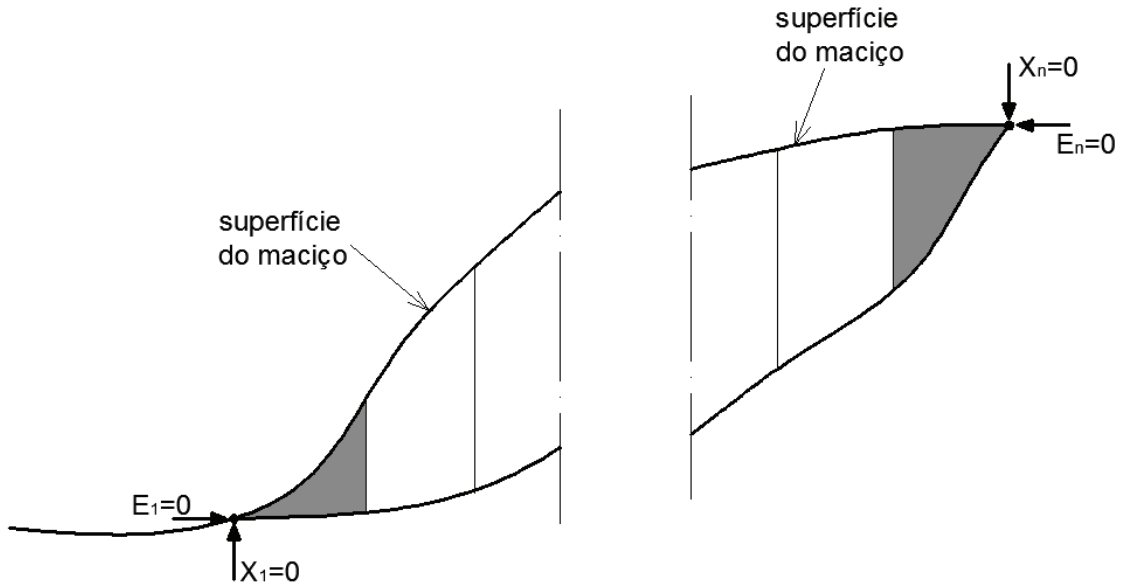


Fig 4.7 – Forças nas extremidades da primeira e última fatia

Sabendo que as forças de interacção nas extremidades esquerda e direita da primeira e última fatias, respectivamente, são nulas (figura 4.7), a equação final do factor de segurança pode ser obtida simulando, por exemplo, um talude com uma divisão em 4 fatias. Assim,

$$E_1 = 0 \quad (4.26)$$

$$E_2\Phi_2 = \psi_1 E_1\Phi_1 + \bar{R}_1 - F_s T_1 \quad (4.27)$$

como

$$\psi_1 E_1\Phi_1 = 0 \quad (4.28)$$

então

$$E_2\Phi_2 = \bar{R}_1 - F_s T_1 \quad (4.29)$$

por outro lado,

$$E_3 \Phi_3 = \psi_2 E_2 \Phi_2 + \bar{R}_2 - F_s T_2 \quad (4.30)$$

Substituindo 4.29 na expressão 4.30, obtém-se:

$$E_3 \Phi_3 = \psi_2 \bar{R}_1 - \psi_2 F_s T_1 + \bar{R}_2 - F_s T_2 \quad (4.31)$$

Continuando o processo, vem:

$$E_4 \Phi_4 = \psi_3 E_3 \Phi_3 + \bar{R}_3 - F_s T_3 \quad (4.32)$$

Substituindo 4.31 em 4.32, resulta:

$$E_4 \Phi_4 = \psi_3 \psi_2 \bar{R}_1 - \psi_3 \psi_2 F_s T_1 + \psi_3 \bar{R}_2 - \psi_3 F_s T_2 + \bar{R}_3 - F_s T_3 \quad (4.33)$$

Finalmente,

$$0 = E_5 \Phi_5 = \psi_4 E_4 \Phi_4 + \bar{R}_4 - F_s T_4 \quad (4.34)$$

Substituindo 4.33 em 4.34, vem:

$$0 = \psi_4 \psi_3 \psi_2 \bar{R}_1 + \psi_4 \psi_3 \bar{R}_2 + \psi_4 \bar{R}_3 - \psi_4 \psi_3 \psi_2 F_s T_1 - \psi_4 \psi_3 F_s T_2 - \psi_4 F_s T_3 + \bar{R}_4 - F_s T_4 \quad (4.35)$$

Daqui resulta a equação do factor de segurança:

$$F_s = \frac{\psi_4 \psi_3 \psi_2 \bar{R}_1 + \psi_4 \psi_3 \bar{R}_2 + \psi_4 \bar{R}_3 + \bar{R}_4}{\psi_4 \psi_3 \psi_2 T_1 + \psi_4 \psi_3 T_2 + \psi_4 T_3 + T_4} \quad (4.36)$$

Generalizando a expressão 4.36 para uma massa dividida em n fatias, o factor de segurança vale:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i+1}^n \psi_j) + T_n} \quad (4.37)$$

Uma vez que o factor de segurança aparece nos dois membros da equação 4.37, a sua resolução terá que ser feita iterativamente, partindo de um valor inicial de FS.

4.2.2.2. Função de interacção $f(x)$

No processo de cálculo de FS (e de λ , como se verá mais adiante) é preciso definir o valor da função de interacção.

A função proposta por Zhu (equação 4.38) é uma extensão da função meio-seno e possibilita uma análise à sensibilidade do método no que respeita à escolha de $f(x)$.

$$f(x) = \sin^\mu \left[\pi \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^\nu \right] \quad (4.38)$$

onde a e b são as abcissas dos extremos da superfície de deslizamento, e μ e ν são valores não negativos, geralmente contidos nos intervalos $[0;0,5]$ e $[0,5;2]$, respectivamente.

O citado autor acaba por concluir que a escolha desta função não produz diferenças significativas em termos de resultados.

No programa TALUDES_Mv1 implementaram-se as funções constante ($f(x) = 1$) e meio seno ($f(x) = \sin x, x \in [0; \pi]$);

4.2.2.3. Linha de impulso

A determinação da linha de impulso é feita a partir de uma equação de equilíbrio de momentos para cada fatia, em relação ao ponto médio da base. Assim, a partir da figura 4.6, pode escrever-se:

$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow E_i(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i) - E_{i+1}(z_{i+1} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i) + X_{i+1} \frac{b_i}{2} + X_i \frac{b_i}{2} \\ &\quad - k_h W_i \frac{h_i}{2} + Q_i \sin \omega_i h_i = 0 \quad (4.39) \end{aligned}$$

Atendendo à definição de X e E , a equação 4.39 pode ser escrita da forma:

$$\begin{aligned} E_{i+1}(z_{i+1} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i) &= E_i(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i) + \lambda \frac{b_i}{2} (f_{i+1} E_{i+1} + f_i E_i) \\ &\quad - k_h W_i \frac{h_i}{2} + Q_i \sin \omega_i h_i \quad (4.40) \end{aligned}$$

Tendo em conta que:

$$M_{i+1} = E_{i+1} z_{i+1} \quad (4.41)$$

$$M_i = E_i z_i \quad (4.42)$$

a equação 4.40 assume o aspecto seguinte:

$$M_{i+1} = M_i + \lambda \frac{b_i}{2} (f_{i+1} E_{i+1} + f_i E_i) - \frac{b_i}{2} (E_{i+1} + E_i) \tan \alpha_i - k_h W_i \frac{h_i}{2} + Q_i \sin \omega_i h_i \quad (4.43)$$

Como as forças de interacção nas fatias inicial e final são nulas à esquerda e direita das mesmas, respectivamente, significa que o momento inicial e final também será nulo, ou seja:

$$M_0 = E_0 z_0 = 0 \quad (4.44)$$

$$M_n = E_n z_n = 0 \quad (4.45)$$

Assim, através da expressão 4.43 poderá extrair-se o valor da força E à esquerda das fatias e calcular, pela relação existente entre as forças de interacção, a força X . Para isso, falta, no entanto, conhecer o valor de λ .

Adoptando um procedimento idêntico ao exposto para a dedução da fórmula do factor de segurança, a aplicação da equação 4.43 a cada uma das n fatias permite obter a expressão geral para a determinação de λ :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i (E_{i+1} + E_i) \tan \alpha_i + k_h W_i h_i - 2 Q_i \sin \omega_i h_i]}{\sum_{i=1}^n b_i (f_{i+1} E_{i+1} + f_i E_i)} \quad (4.46)$$

Os valores iniciais de FS e λ podem ser a unidade e zero, respectivamente. A convergência do método acontecerá quando a variação de FS e de λ se torne em valor absoluto inferior à tolerância definida pelo utilizador.

4.3. MÉTODO DE CORREIA

4.3.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A formulação do método de Correia parte da análise de um talude com uma superfície de deslizamento qualquer, limitada pela superfície do terreno, conforme sugere a figura 4.8. As forças consideradas são as representadas na figura 4.9, cujo significado se passa a apresentar:

- W - Peso da fatia;

- N - Resultante das tensões normais na base tal que:

$$N = N' + u \Delta x \sec \alpha \quad (4.47)$$

- S - Resultante das tensões tangenciais na base;
- E - Força normal de interacção entre fatias;
- X - Força tangencial de interacção entre fatias.

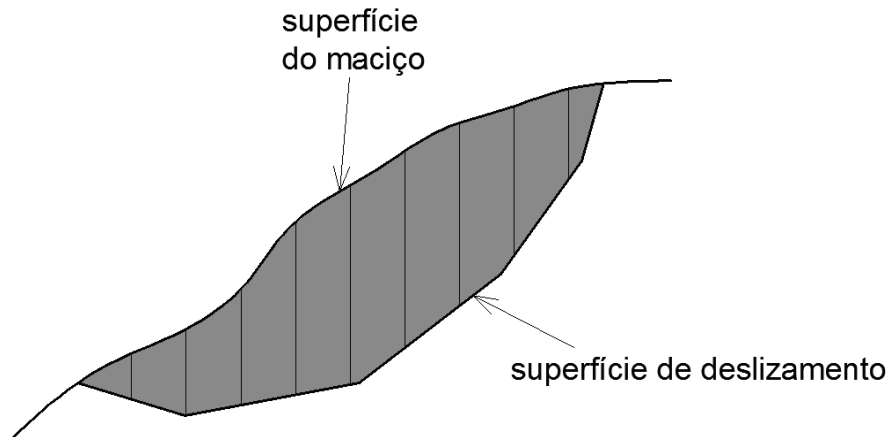


Fig 4.8 – Exemplo de talude para análise pelo método de Correia

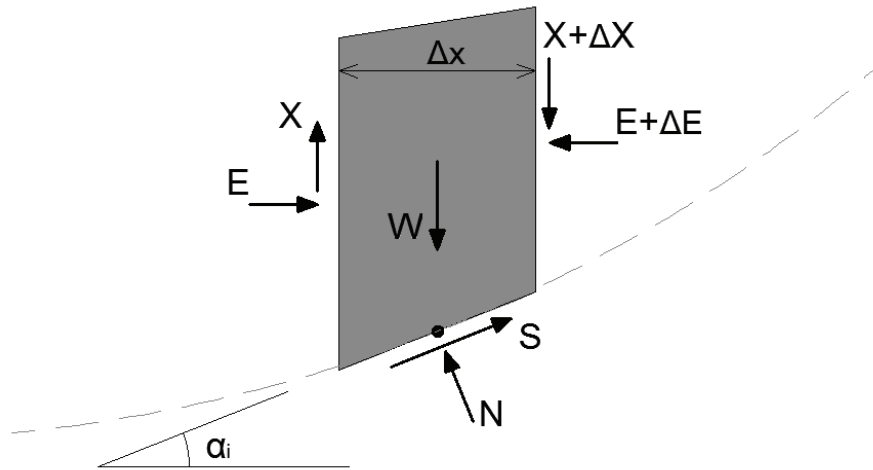


Fig 4.9 – Fatia genérica para análise pelo método de Correia

De uma forma genérica, o método assume o valor da força tangencial S dado pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb, do qual resulta:

$$S = \frac{c'}{F_s} \Delta x \sec \alpha + N' \frac{\tan \phi'}{F_s} \quad (4.48)$$

onde c' é a coesão, ϕ' o ângulo de atrito, Δx a largura da fatia, α a inclinação da base e F_s o factor de segurança a calcular.

Fazendo o equilíbrio de forças na direcção vertical e horizontal, obtém-se:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow W + \Delta X = N \cos \alpha + S \sin \alpha \quad (4.49)$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \Delta E = -N \sin \alpha + S \cos \alpha \quad (4.50)$$

Por manipulação das expressões 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50, surge uma expressão para o cálculo de ΔE mais completa e detalhada, que a seguir se apresenta:

$$\Delta E = \frac{(W + \Delta X)(\tan \phi' - F_s \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta x \sec^2 \alpha}{F_s + \tan \phi' \tan \alpha} \quad (4.51)$$

Aplicando o conceito de equilíbrio estático a toda a massa de solo acima da linha de rotura potencial, segundo a direcção horizontal, vem:

$$\sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha) = \sum \Delta E = 0 \quad (4.52)$$

O mesmo raciocínio aplicado ao equilíbrio de momentos em torno de um ponto arbitrário C , de coordenadas x_c e y_c , permite obter:

$$\sum (W - N \cos \alpha - S \sin \alpha)(x - x_c) + \sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha)(y - y_c) = 0 \quad (4.53)$$

onde x e y são as coordenadas do ponto médio da base da fatia.

A indeterminação estática, no método de Correia, é resolvida a partir da definição de uma função de distribuição da força tangencial de interacção (em vez da típica relação entre as forças normal e tangencial comum aos restantes métodos que implementam este tipo de solução). Com essa função a força tangencial vem dada por:

$$X = X_{máx} f(x) \quad (4.54)$$

Nesta última equação, $X_{máx}$ é um parâmetro de escala calculado no processo de obtenção do factor de segurança, e $f(x)$ uma função que pode assumir qualquer forma a partir do momento que conduza a valores nulos nas extremidades da massa de solo em análise (no próximo subcapítulo esta matéria será

discutida com mais pormenor). O objectivo da função de interacção é controlar a distribuição da força tangencial em cada fatia.

Desta forma, se a função $f(x)$ tem valor nulo nos pontos mais esquerda e mais à direita, significa que:

$$\sum \Delta f = 0 \quad (4.55)$$

onde Δf corresponde à diferença entre os valores de $f(x)$ à direita e à esquerda de cada fatia. O somatório das diferenças calculadas para o conjunto das fatias deve, segundo a condição 4.55, ter valor nulo.

Através das equações 4.49 e 4.50, a equação 4.43 toma a forma:

$$-\sum \Delta X (x - x_c) + \sum \Delta E (y - y_c) = 0 \quad (4.56)$$

Por outro lado, pela equação 4.40 deduz-se que:

$$\Delta X = X_{máx} \Delta f \quad (4.57)$$

e pelas expressões 4.52 e 4.55 chega-se a:

$$\sum \Delta f x_c = x_c \sum \Delta f = 0 \quad (4.58)$$

$$\sum \Delta E y_c = y_c \sum \Delta E = 0 \quad (4.59)$$

A partir de 4.51, 4.56, 4.58 e 4.59, as equações 4.52 e 4.56 ficam com o aspecto seguinte:

$$A_1 X_{máx} + A_2 = 0 \quad (4.60)$$

$$A_3 X_{máx} + A_4 = 0 \quad (4.61)$$

Uma vez que o algoritmo completo será explicado no subcapítulo que se segue, remete-se para o mesmo o significado das variáveis A_1 , A_2 , A_3 e A_4 .

As expressões 4.60 e 4.61 conduzem a:

$$\psi(F_s) = A_1 A_4 - A_2 A_3 = 0 \quad (4.62)$$

$$X_{m\acute{a}x} = -\frac{A_2}{A_1} \quad (4.63)$$

O coeficiente de segurança obtém-se pela resolução da equação não linear 4.62, através, por exemplo, do método de Newton-Raphson, que tem provado ser bastante eficiente para esse efeito. Conhecido FS e $X_{m\acute{a}x}$ é possível obter as forças de corte entre fatias pela equação 4.54, e, a partir dessas, determinar as forças normais pela soma consecutiva dos ΔE obtidos pela expressão 4.51.

4.3.2. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_Mv1

O algoritmo introduzido é o que foi descrito sumariamente até esta parte e que foi apresentado por Correia (1989) aquando da apresentação do método. É relativamente simples e, para além disso, conduz a resultados de uma forma eficiente, principalmente pelo facto de apenas precisar de uma equação não linear para obter valores de FS.

O algoritmo implementado possibilita a consideração de acção sísmica e de sobrecarga à superfície, tendo sido estas as únicas alterações em relação à sua versão original. O programa TALUDES_Mv1 não permite, para já, a introdução da última acção referida.

4.3.2.1. Determinação de FS e λ

Conforme já referido no subcapítulo anterior, o método permite o cálculo de FS de um talude cuja superfície de deslizamento pode assumir uma configuração qualquer. Após a divisão em fatias, o cálculo é efectuado individualmente pelo equilíbrio das mesmas. As forças consideradas na formulação do algoritmo estão representadas na figura 4.10, onde Q é a sobrecarga à superfície e W , peso da fatia, é multiplicado pelos coeficientes k_h e $(1 + k_v)$ relativos à acção sísmica.

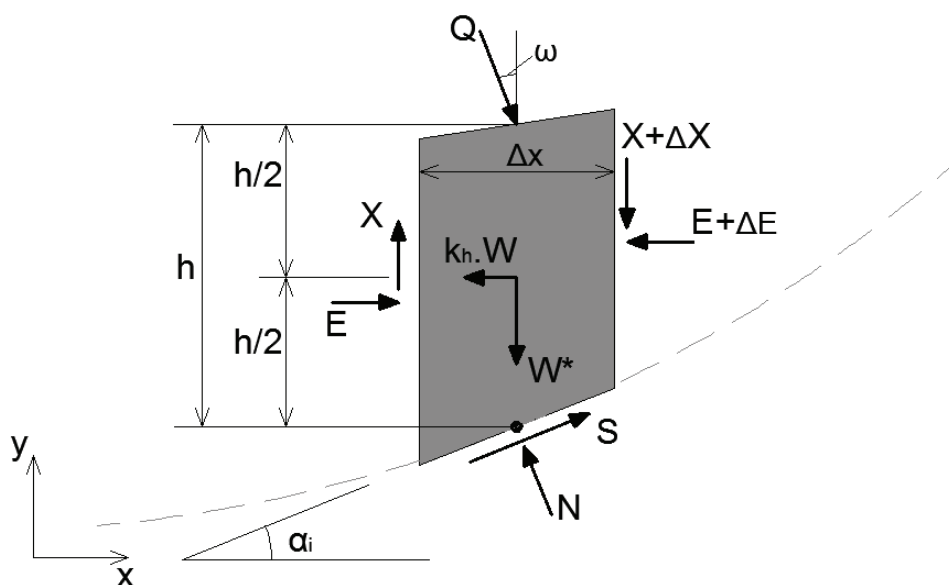


Fig 4.10 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Correia

Do equilíbrio de forças na direcção vertical resulta:

$$W^* + (X + \Delta X) + Q \cos \omega - X - N \cos \alpha - S \sin \alpha = 0 \quad (4.64)$$

$$W^* + \Delta X + Q \cos \omega = N \cos \alpha + S \sin \alpha \quad (4.65)$$

E na direcção horizontal:

$$E + S \cos \alpha - k_h W - (E + \Delta E) - N \sin \alpha + Q \sin \omega = 0 \quad (4.66)$$

$$\Delta E = -N \sin \alpha + S \cos \alpha - k_h W + Q \sin \omega \quad (4.67)$$

Sabendo que:

$$N = N' + u \frac{\Delta x}{\cos \alpha} \quad (4.68)$$

as equações 4.65 e 4.67 podem escrever-se, respectivamente, da forma:

$$W^* + \Delta X + Q \cos \omega = N' \cos \alpha + u \Delta x + S \sin \alpha \quad (4.69)$$

$$\Delta E = -N' \sin \alpha - u \Delta x \tan \alpha + S \cos \alpha - k_h W + Q \sin \omega \quad (4.70)$$

Da aplicação do critério de rotura de Mohr-Coulomb resulta:

$$S = \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} + \frac{N' \tan \phi'}{F_s} \quad (4.71)$$

ou ainda

$$-\frac{N' \tan \phi'}{F_s} + S = \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} \quad (4.72)$$

Se colocarmos as expressões 4.69 e 4.72 em sistema e o resolvermos na forma matricial pelo método de Cramer, obtemos duas expressões para o cálculo de N' e S . Assim:

$$\begin{cases} N' \cos \alpha + S \sin \alpha = W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x \\ -\frac{N' \tan \phi'}{F_s} + S = \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} \end{cases} \quad (4.73)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\frac{\tan \phi'}{F_s} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N' \\ S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x \\ \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} \end{Bmatrix} \quad (4.74)$$

A força normal N' valerá:

$$N' = \frac{\begin{vmatrix} W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x & \sin \alpha \\ \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\frac{\tan \phi'}{F_s} & 1 \end{vmatrix}} \quad (4.75)$$

$$N' = \frac{W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x - \frac{c' \Delta x \tan \alpha}{F_s}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F_s}} \quad (4.76)$$

Já a força tangencial S poderá ser escrita da forma:

$$S = \frac{\begin{vmatrix} \cos \alpha & W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x \\ -\frac{\tan \phi'}{F_s} & \frac{c' \Delta x}{F_s \cos \alpha} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\frac{\tan \phi'}{F_s} & 1 \end{vmatrix}} \quad (4.77)$$

$$S = \frac{\frac{c' \Delta x}{F_s} + \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x) \tan \phi'}{F_s}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F_s}} \quad (4.78)$$

Multiplicando as expressões 4.76 e 4.78 em ambos os membros por $F_s / \cos \alpha$, obtém-se:

$$N' = \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x - \frac{c' \Delta x \tan \alpha}{F_s}) \frac{F_s}{\cos \alpha}}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.79)$$

$$S = \frac{\frac{c' \Delta x}{\cos \alpha} + \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x) \tan \phi'}{\cos \alpha}}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.80)$$

Se na expressão 4.69 fizermos a substituição das variáveis N' e S pelas equações correspondentes agora deduzidas, ΔE poderá exprimir-se por:

$$\begin{aligned} \Delta E = & - \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x - \frac{c' \Delta x \tan \alpha}{F_s}) \frac{F_s}{\cos \alpha}}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \sin \alpha - u \Delta x \tan \alpha \\ & + \frac{\frac{c' \Delta x}{\cos \alpha} + \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega - u \Delta x) \tan \phi'}{\cos \alpha}}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \cos \alpha - k_h W + Q \sin \omega \end{aligned} \quad (4.81)$$

A reformulação da expressão 4.81, através de simplificações algébricas, nomeadamente, substituindo $(1 + \tan^2 \alpha)$ por $\sec^2 \alpha$, conduz à equação final que nos permitirá obter o valor de ΔE , que se apresenta na seguinte forma:

$$\Delta E = \frac{(W^* + \Delta X + Q \cos \omega) (\tan \phi' - F_s \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta x \sec^2 \alpha}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} - k_h W + Q \sin \omega \quad (4.82)$$

A expressão 4.82 permite calcular a diferença entre o valor as forças normais de interação à esquerda e direita de cada fatia. A sua dedução partiu, conforme referido, da análise do equilíbrio de uma fatia genérica.

Se agora analisarmos o equilíbrio da massa total, aplicando o mesmo tipo de raciocínio e aproveitando as considerações feitas até este ponto, obtém-se, pelo somatório de forças na direcção horizontal:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \sum \Delta E = \sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha - k_h W + Q \sin \omega) = 0 \quad (4.83)$$

Por outro lado, da equação de equilíbrio de momentos em torno de um ponto arbitrário c , definido pelas coordenadas x_c e y_c , envolvendo toda a massa de solo, resulta:

$$\begin{aligned} \sum M_c = 0 \Rightarrow & \sum (W^* + Q \cos \omega - N \cos \alpha - S) (x - x_c) + \\ & \sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha - k_h W + Q \sin \omega) (y - y_c) - \sum (k_h W \frac{h}{2} - Q \sin \omega h) \end{aligned} \quad (4.84)$$

onde x e y são as coordenadas do ponto médio de cada fatia.

Substituindo as expressões 4.65 e 4.67 em 4.84, obtém-se:

$$-\sum \Delta X(x - x_c) + \sum \Delta E(y - y_c) - \sum \left(k_h W \frac{h}{2} - Q \sin \omega h \right) = 0 \quad (4.85)$$

Apesar de já apresentadas no subcapítulo anterior, as expressões relativas à anulação da indeterminação estática voltam a ser escritas para facilitar o acompanhamento do raciocínio por parte do leitor. Assim, para definição da força tangencial de interação recorre-se a uma função $f(x)$, que deve ser nula nos pontos extremos da fatia mais esquerda e mais à direita do talude, em conjunto com um parâmetro de escala, $X_{máx}$. Desta forma, vem que:

$$\sum \Delta f = 0 \quad (4.86)$$

$$X = X_{máx} f(x) \quad (4.87)$$

A partir da expressão 4.87 podemos afirmar que:

$$\Delta X = X_{máx} \Delta f \quad (4.88)$$

Partindo da expressão 4.86 e 4.83, respectivamente, sabemos que:

$$\sum \Delta f x_c = x_c \sum \Delta f = 0 \quad (4.89)$$

$$\sum \Delta E y_c = y_c \sum \Delta E = 0 \quad (4.90)$$

Voltando à equação 4.83, se substituirmos ΔE pela expressão 4.82, colocando W^* e ΔX em termos diferentes, e depois aplicarmos 4.88 para definir ΔX , obtemos:

$$\begin{aligned} \sum \Delta E = \sum \left[\frac{(W^* + Q \cos \omega)(\tan \phi' - F_s \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta x \sec^2 \alpha}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} - k_h W + Q \sin \omega \right] \\ + X_{máx} \sum \frac{\Delta f (\tan \phi' - F_s \tan \alpha)}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} = 0 \quad (4.91) \end{aligned}$$

De uma maneira simplificada, podemos dizer que:

$$\sum \Delta E = A_1 X_{m\acute{a}x} + A_2 = 0 \quad (4.92)$$

onde

$$A_1 = \sum a_1 = \sum \frac{\Delta f (\tan \phi' - F_s \tan \alpha)}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.93)$$

e

$$A_2 = \sum a_2 \Leftrightarrow \sum \left[\frac{(W^* + Q \cos \omega)(\tan \phi' - F_s \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta x \sec^2 \alpha}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} - k_h W + Q \sin \omega \right] \quad (4.94)$$

Manipulando a equação 4.85, recorrendo às expressões 4.88, 4.89 e 4.80, podemos escrever:

$$A_3 X_{m\acute{a}x} + A_4 = 0 \quad (4.95)$$

onde

$$A_3 = \sum a_3 = \sum (a_1 \cdot y - \Delta f \cdot x) \quad (4.96)$$

e

$$A_4 = \sum a_4 = \sum (a_2 \cdot y - k_h W \frac{h}{2} + Q \sin \omega \cdot h) \quad (4.97)$$

A partir das expressões 4.92 e 4.95 verifica-se que:

$$-\frac{A_2}{A_1} = -\frac{A_4}{A_3} \Leftrightarrow A_1 A_4 = A_2 A_3 \quad (4.98)$$

de onde se conclui:

$$\psi(F) = A_1 A_4 - A_2 A_3 = 0 \quad (4.99)$$

$$X_{m\acute{a}x} = -\frac{A_2}{A_1} = -\frac{A_4}{A_3} \quad (4.100)$$

Aplicando o método de Newton-Raphson para resolver a expressão 4.99 vem:

$$F_{n+1} = F_n - \frac{\psi(F_n)}{\psi'(F_n)} \quad (4.101)$$

em que

$$\Delta F_n = -\frac{\psi(F_n)}{\psi'(F_n)} \quad (4.102)$$

A derivada da função ψ é dada por:

$$\psi'(F_s) = \frac{d\psi}{dF_s} = \frac{dA_1}{dF_s} \cdot A_4 + A_1 \frac{dA_4}{dF_s} - \frac{dA_2}{dF_s} \cdot A_3 - A_2 \frac{dA_3}{dF_s} \quad (4.103)$$

onde

$$\frac{dA_1}{dF_s} = \sum \frac{da_1}{dF_s} = \sum \frac{-\Delta f \cdot \tan \alpha - a_1}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.104)$$

$$\frac{dA_2}{dF_s} = \sum \frac{da_2}{dF_s} = \sum \frac{d\bar{a}_2}{dF_s} = \sum \frac{-(W^* + Q \cos \omega) \tan \alpha - \bar{a}_2}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.105)$$

$$\frac{dA_3}{dF_s} = \sum \frac{da_3}{dF_s} = \sum \frac{da_1}{dF_s} \cdot y \quad (4.106)$$

$$\frac{dA_4}{dF_s} = \sum \frac{da_4}{dF_s} = \sum \frac{d\bar{a}_4}{dF_s} = \sum \frac{d\bar{a}_2}{dF_s} \quad (4.107)$$

As variáveis $\bar{a}_2$ e $\bar{a}_4$ presentes em 4.94 e 4.95 valem:

$$\bar{a}_2 = \frac{(W^* + Q \cos \omega)(\tan \phi' - F_s \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta x \sec^2 \alpha}{F_s + \tan \alpha \tan \phi'} \quad (4.108)$$

$$\bar{a}_4 = a_2 \cdot y \quad (4.109)$$

Assim, ΔF obtém-se através da expressão:

$$\Delta F = \frac{A_1 A_4 - A_2 A_3}{\frac{dA_1}{dF_s} \cdot A_4 + A_1 \frac{dA_4}{dF_s} - \frac{dA_2}{dF_s} \cdot A_3 - A_2 \frac{dA_3}{dF_s}} \quad (4.110)$$

Arbitrando um valor inicial para o factor de segurança, um valor de ΔF será encontrado e somado ao FS inicial. O cálculo faz-se iterativamente até que ΔF seja menor que a tolerância especificada.

4.3.2.2. Função de interacção $f(x)$

A função de interacção a aplicar no método de Correia deve, como já foi referido, assumir valor nulo nas extremidades. Para além disso, ela deverá ser tal que as soluções obtidas para as forças de interacção sejam fisicamente admissíveis. As condições a obedecer são as já referidas por Morgenstern e Price (1965), as quais se passa a expor:

- as forças tangenciais de interacção não podem ser superiores à resistência ao corte do terreno (o critério de cedência tem de ser verificado);
- a linha de impulso deve estar compreendida entre a superfície do maciço e a superfície de deslizamento.

Como o próprio autor do método refere, a função deveria ser escolhida com base em estudos teóricos, como por exemplo, análises elasto-plásticas com elementos finitos. Na ausência desse tipo de estudos, a escolha deve ser fundamentada na experiência. Assim, a função em forma de sino, representada na figura 4.11, tem conduzido a resultados coerentes em muitos casos de estudo, cumprindo em todos eles as condições acima referidas.

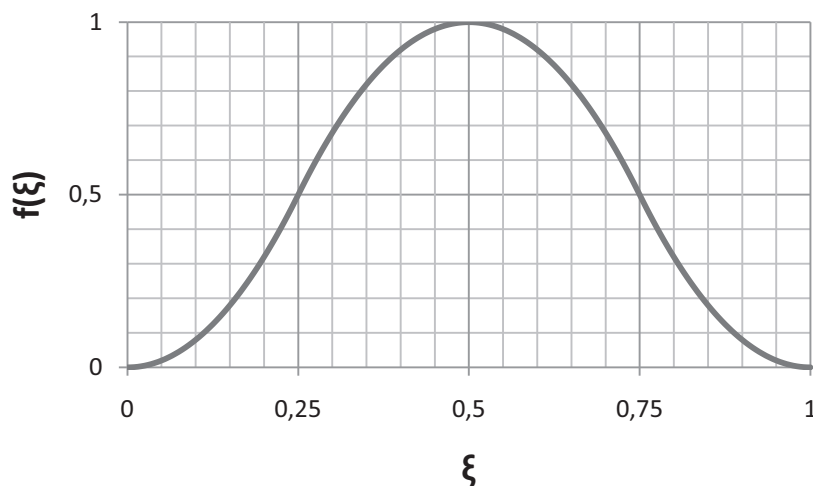


Fig 4.11 – Função “sino”

A função é simétrica, composta por três segmentos parabólicos, e tem pontos de inflexão em $\xi = 0,25$ e $\xi = 0,75$. As equações que definem cada um dos ramos da curva encontram-se no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Equações que definem a função seno

Intervalo	Equação
$[0;0,25]$	$f(\xi)=8.\xi^2$
$[0,25;0,75]$	$f(\xi)=-8(\xi-0,5)^2+1$
$[0,75;1,0]$	$f(\xi)=8(\xi-1)^2$

4.3.2.3. Linha de impulso

Os pontos de aplicação das forças de interacção são calculados a partir de uma equação de momentos em torno do ponto médio das fatias (figura 4.12).

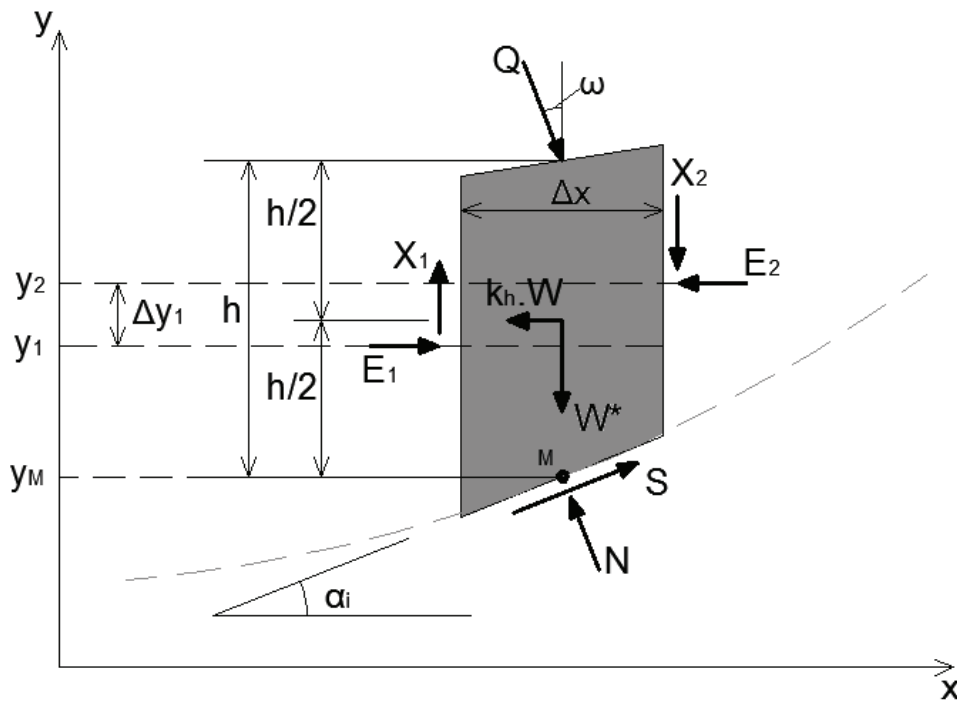


Fig 4.12 – Fatia genérica para formulação da linha de impulso

Assim,

$$\begin{aligned}
 \sum M_M &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow (X_1 + X_2) \frac{\Delta x}{2} + E_1(y_1 - y_M) - E_2(y_1 + \Delta y_1 - y_M) - k_h W \frac{h}{2} + Q \sin \omega h &= 0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \Delta y_1 &= \frac{\left[(X_1 + X_2) \frac{\Delta x}{2} - \Delta E(y_1 - y_M) - k_h W \frac{h}{2} + Q \sin \omega h \right]}{2} \quad (4.111)
 \end{aligned}$$

Como o ponto de aplicação das forças na interface é o mesmo, somando sucessivamente as diferenças de altura calculadas entre os lados das fatias, Δy , obtêm-se todos os pontos da curva.

4.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A aplicação dos métodos de equilíbrio limite às análises de estabilidade de taludes pode, conforme já explanado, suscitar algumas dúvidas quanto à razoabilidade dos seus resultados, dadas as simplificações teóricas que os caracterizam. Cedo se procurou implementar outro tipo de análises, que possibilitassem incorporar as relações tensão-deformação dos solos, como é o caso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF foi introduzido na engenharia geotécnica por Clough e Woodward (1967) no estudo de uma barragem de terra, onde foi usada uma lei constitutiva não linear, e as suas potencialidades tornaram-se desde logo evidentes. No entanto, vários factores impediram o uso mais amplo deste método como, por exemplo, o difícil acesso ao computador, o custo de processamento (sobretudo associado ao tempo de preparação e de cálculo), o pouco conhecimento sobre o método (vantagens e limitações) e a falta de estudos paramétricos entre MEF e métodos de equilíbrio limite. Hoje muitos desses aspectos já não se verificam e a sua utilização generalizou-se, nomeadamente, pelo aparecimento de vários programas comerciais voltados, precisamente, para os problemas geotécnicos (caso do Phase2 e Plaxis).

4.4.1. ASPECTOS GERAIS DA FORMULAÇÃO

O método nasce a partir da análise do material, designado por domínio, e acções actuantes sobre o mesmo, para um determinado caso em estudo. O problema pode colocar-se da seguinte forma: “num dado domínio, com características e propriedades conhecidas, pretende-se determinar o campo de deslocamentos e tensões, para um determinado conjunto de solicitações e condições fronteira” (Delgado, 1987).

As tensões/deformações unitárias são calculadas nos vários pontos constituintes do material através das teorias da Elasticidade e Plasticidade. O cálculo pode realizar-se considerando a não-linearidade da curva tensão-deformação do material, anisotropia, heterogeneidade, influência do estado de tensão inicial, fases de construção, etc.

A prossecução do método envolve várias etapas, às quais aqui se faz uma breve referência, considerando por simplicidade a aplicação a um problema elástico. Para uma abordagem aprofundada do MEF aconselha-se a leitura de Delgado (1987) e Onâte (2009).

4.4.1.1. Divisão do domínio contínuo

O domínio é discretizado em elementos, cujas ligações e características geométricas, constitutivas e resistentes são conhecidas (figura 4.13). Quanto maior o número de elementos mais aproximados serão os resultados do estado real de tensão e deformação. Os elementos podem ser estudados considerando diferentes números de nós.

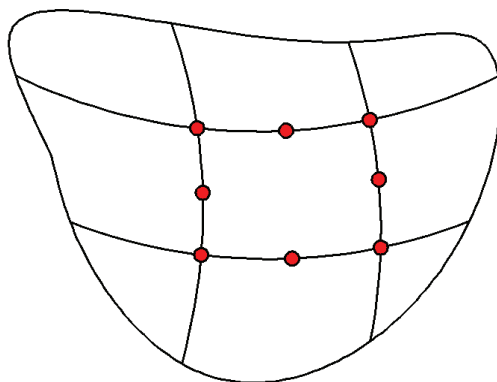


Fig 4.13 – Divisão de um domínio em elementos

4.4.1.2. Aproximação no interior do elemento

O MEF substitui a função contínua incógnita $\bar{f}_e(x, y, z)$ por uma função aproximada $\sum \varphi_i(x, y, z)C_i$ para caracterizar o material, onde φ_i são funções escolhidas criteriosamente e C_i os parâmetros desconhecidos, tantos quanto o número de nós por elemento.

A aproximação introduzida pode ser no campo das forças, dos deslocamentos ou dos dois em simultâneo. A selecção das funções φ_i depende dos parâmetros desconhecidos. Normalmente, são escolhidos aqueles que fornecem um significado físico mais claro.

Por exemplo, no caso da formulação através dos deslocamentos, a aproximação será feita no campo dos deslocamentos e as incógnitas (parâmetros desconhecidos) serão os deslocamentos (ou suas derivadas) nos nós. As funções especificadas caracterizarão os deslocamentos do elemento em cada direcção, representando, dessa forma, a sua deformação. Se a formulação se traduzir, agora, em termos de forças, a aproximação será no campo da tensões e as incógnitas serão as forças nos nós. As funções especificadas traduzirão, então, o estado de tensão do material nos pontos nodais.

4.4.1.3. Relações para cada elemento

De acordo com a aproximação introduzida, as relações do fenómeno em estudo são aplicadas aos diferentes elementos. As relações possíveis em termos de Mecânica dos Sólidos são as seguintes (Delgado, 1987):

- relação entre deslocamentos e deformações (relações geométricas);
- relação entre deformações e tensões (relações constitutivas);
- condições de equilíbrio associadas ao fenómeno;

A primeira relação pode traduzir-se por:

$$\varepsilon = [L] u \quad (4.112)$$

em que ε é o vector das deformações num ponto genérico, $[L]$ o operador diferencial, e u a função de forma associada ao deslocamento do elemento numa direcção específica.

A relação entre deformação e tensão é obtida após conhecido o estado de deformação do material, sendo que o estado de tensão apenas depende das suas características enquanto corpo. As relações entre os dois estados são conhecidas por relações constitutivas do material e expressam-se da seguinte forma:

$$\sigma = [D]\varepsilon \quad (4.113)$$

onde σ é o vector das tensões, $[D]$ a matriz constitutiva elástica e ε o vector das deformações definido pela expressão 4.99. No caso mais geral de ocorrência de não-linearidade das leis que regem o comportamento do domínio adopta-se um procedimento incremental-iterativo em que a carga vai sendo gradualmente aumentada procedendo-se, iterativamente, à actualização do campo de tensões através de

$$\Delta\sigma = D_{EP} \cdot \Delta\varepsilon \quad (4.114)$$

onde D_{EP} é a matriz elastoplástica constitutiva do material.

As relações de equilíbrio são as equações que regem o fenómeno físico em estudo. Elas definem o equilíbrio em qualquer ponto do domínio e podem ser introduzidas no MEF por três modos diferentes:

- princípio dos trabalhos virtuais (PTV) – campos de deslocamentos virtuais obtidos pela imposição de um deslocamento unitário em cada nó e em cada direcção;
- método dos resíduos pesados – os resíduos resultantes da introdução da função aproximada dos deslocamentos devem obedecer a um critério que os limita (geralmente, introduzindo-se funções de peso);
- métodos variacionais – um dado funcional deve satisfazer uma condição mínima.

Seja qual for o processo aplicado, todos conduzem a uma relação do tipo:

$$[K]a + f = 0 \quad (4.115)$$

em que $[K]$ é a matriz de rigidez, f o vector de forças nodais estaticamente equivalentes às forças de volume e de superfície aplicadas no elemento, e a os deslocamentos nodais.

4.4.1.4. Cálculo das deformações e tensões

Aplicando a expressão 4.115 a cada elemento do domínio, obtêm-se vários sistemas de equações, tantos quanto o número de elementos, em que cada equação traduz o equilíbrio de cada um deles ao longo de uma determinada direcção nodal. Aos nós contidos em mais que um elemento é imposto o mesmo valor de deslocamento. As equações de equilíbrio correspondentes, referentes a elementos distintos que contêm o mesmo ponto nodal, adicionam-se, resultando num sistema de equações global:

$$[K_g]a_g + f_g = 0 \quad (4.116)$$

Desta forma se reconstitui o domínio inicial, pela interacção dos diversos elementos através das condições que regem o equilíbrio dos nós.

As condições fronteira são, normalmente, introduzidas através de deslocamentos impostos nos nós de forma a impedir os movimentos do corpo rígido. Assim se torna possível a resolução do sistema 4.116 com vista à determinação dos deslocamentos nodais a_g .

Obtidos os deslocamentos nos nós procede-se à avaliação dos deslocamentos e tensões em qualquer ponto do domínio. Estas podem ser obtidas pela expressão 4.117:

$$\sigma = [D][B]a \quad (4.117)$$

em que $[B]$ é a matriz das derivadas cartesianas das funções de forma.

4.4.2. APLICAÇÃO NA SIMULAÇÃO DE COLAPSO

O Método dos Elementos Finitos permite a realização de simulações de colapso, por exemplo, no caso de solos. A sua aplicação visa determinar a superfície de deslizamento associada a uma grande massa de solo, e cálculo do respectivo factor de segurança. A simulação de colapso pode ser feita por duas vias:

- redução progressiva dos parâmetros de resistência dos solos;
- aumento progressivo do carregamento que solicita o solo.

A redução dos parâmetros resistentes é a via utilizada pelos programas comerciais utilizados neste estudo (sendo referida como "*Phi-c reduction*" no Plaxis e como "*Shear Strength Reduction*" no Phase2) e define-se por:

$$c'^* = \frac{c'}{M} \quad (4.118)$$

$$\tan^* \phi' = \frac{\tan \phi'}{M} \quad (4.119)$$

onde M é o parâmetro adoptado para reduzir os valores de c' e $\tan \phi'$, aplicado em cada análise, até que a rotura ocorra. Esta acontece quando $M = FS$. A técnica, envolve desta forma, várias análises do mesmo problema mas com diferentes valores dos parâmetros resistentes.

Para ambos os casos, a não convergência do cálculo do sistema de equações não lineares que traduz o equilíbrio do solo dá a indicação da rotura do talude.

5

DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO ESTUDO

5.1. GENERALIDADES

O presente trabalho conta com a aplicação de três programas de cálculo a alguns casos de estabilidade de taludes. O programa TALUDES_Mv1 foi desenvolvido no âmbito desta tese com a implementação de dois métodos de equilíbrio limite rigorosos, conforme já referido nos capítulos anteriores. Pretende-se comparar os resultados obtidos através desta ferramenta com aqueles que se obtêm via programas comerciais, nomeadamente, Plaxis e Phase2, cujo cálculo se processa por elementos finitos. Ao longo deste capítulo serão apresentadas as três ferramentas de cálculo, com maior destaque para o TALUDES_Mv1, dada a sua especificidade.

5.2. TALUDES_Mv1

5.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento de um programa de estabilidade de taludes exige uma apreciação cuidada de todos os factores relevantes para a obtenção do factor de segurança. Para isso importa distinguir as diferentes fases de todo o processo e estudar as instruções mais eficazes para a concretização de cada passo. O programa será mais ou menos eficiente consoante a precisão das instruções introduzidas.

As fases consideradas no desenvolvimento do TALUDES_Mv1 foram as seguintes:

- reconhecimento da geometria do talude (incluindo estratos e nível freático);
- definição das superfícies de deslizamento;
- divisão da massa deslizante, correspondente a cada linha de rotura, em fatias;
- caracterização das fatias (peso, coesão, ângulo de atrito e pressão neutra);
- avaliação do factor de segurança.

Para cada uma destas etapas foi necessário estudar as condições a satisfazer, definir o caminho que conduzia ao menor esforço computacional e entender as consequências das instruções implementadas, para, de uma forma assertiva e eficiente, obter os resultados esperados.

O programa foi desenvolvido em Matlab, ferramenta de cálculo muito actual e bastante divulgada, com potencialidades enormíssimas, especialmente em termos gráficos. O estudo da sua linguagem tornou-se fundamental, especialmente das funções disponíveis no software que em muito facilitam a implementação das tarefas. Além disso, foi necessário conhecer os seus pontos mais fracos, aqueles pudessem pôr em causa a performance do TALUDES_Mv1 (exemplo: evitar ciclos “for” e “while”) e

os seus pontos mais fortes (ex: cálculo vectorial). Para isso, o autor recorreu, para além do “help” do Matlab, à bibliografia disponível, como é o caso de Faustino (2009) e Ferreira (2009).

5.2.2. ESTRUTURA DO PROGRAMA

O programa TALUDES_Mv1 conta com 5 rotinas que serão chamadas para o cálculo conforme as opções do utilizador. Quando o programa é aberto aparece uma mensagem de boas vindas e é pedida a introdução do tipo de análise pretendido: análise de uma superfície circular específica, análise de uma superfície poligonal específica ou busca do factor de segurança mínimo (figura 5.1 e anexo B).

```
>> run('C:\TALUDE_Mv1\TALUDES_Mv1.m')
PROGRAMA TALUDES_Mv1 (Matlab, versão n°1)
Autores: João Paulo Silva
        Prof. José Couto Marques

Bem vindo ao programa TALUDES_Mv1!

Entre na pasta "ficheiros_TALUDE_Mv1", abra o ficheiro excel "Caracterização do talude"
e introduza os dados de acordo com o tipo de análise que pretende!
Tipos de análise:
    Superfície circular específica - 1
    Superfície poligonal específica - 2
    Busca de FS mínimo - 3

Especifique o tipo de análise pretendida(digite o número correspondente):
```

Fig. 5.1 – Aspecto inicial do programa TALUDES_Mv1

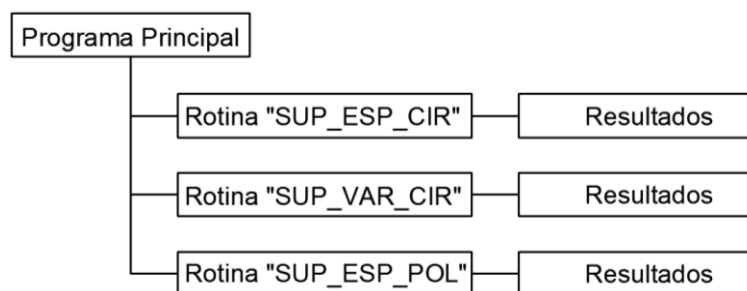


Fig. 5.2 – Estrutura de cálculo do programa TALUDES_Mv1

Em função do número escolhido pelo utilizador, o programa correrá a rotina pedida, lançando os resultados após o cálculo. O esquema que traduz o seu funcionamento é o representado na figura 5.2, onde “SUP_ESP_CIR”, “SUP_VAR_CIR” e “SUP_ESP_POL” são as rotinas para análise de uma superfície circular específica, busca do factor de segurança mínimo e análise de superfície poligonal específica, respectivamente. Todas as instruções relativas ao cálculo, desde a detecção da geometria ao lançamento de resultados numéricos e gráficos, encontram-se dentro das respectivas rotinas. A cada uma delas está associado um ficheiro de introdução de dados, que será apresentado no subcapítulo seguinte, e ao qual o TALUDES_Mv1 faz referência ao ser aberto (figura 5.1) para lembrar ao utilizador o seu preenchimento.

As rotinas apresentadas na figura 5.2 seguem um tronco comum, em termos de programação, variando apenas nalguns aspectos de acordo com a especificidade de cada uma. A figura 5.3 apresenta a estrutura que lhes está associada.

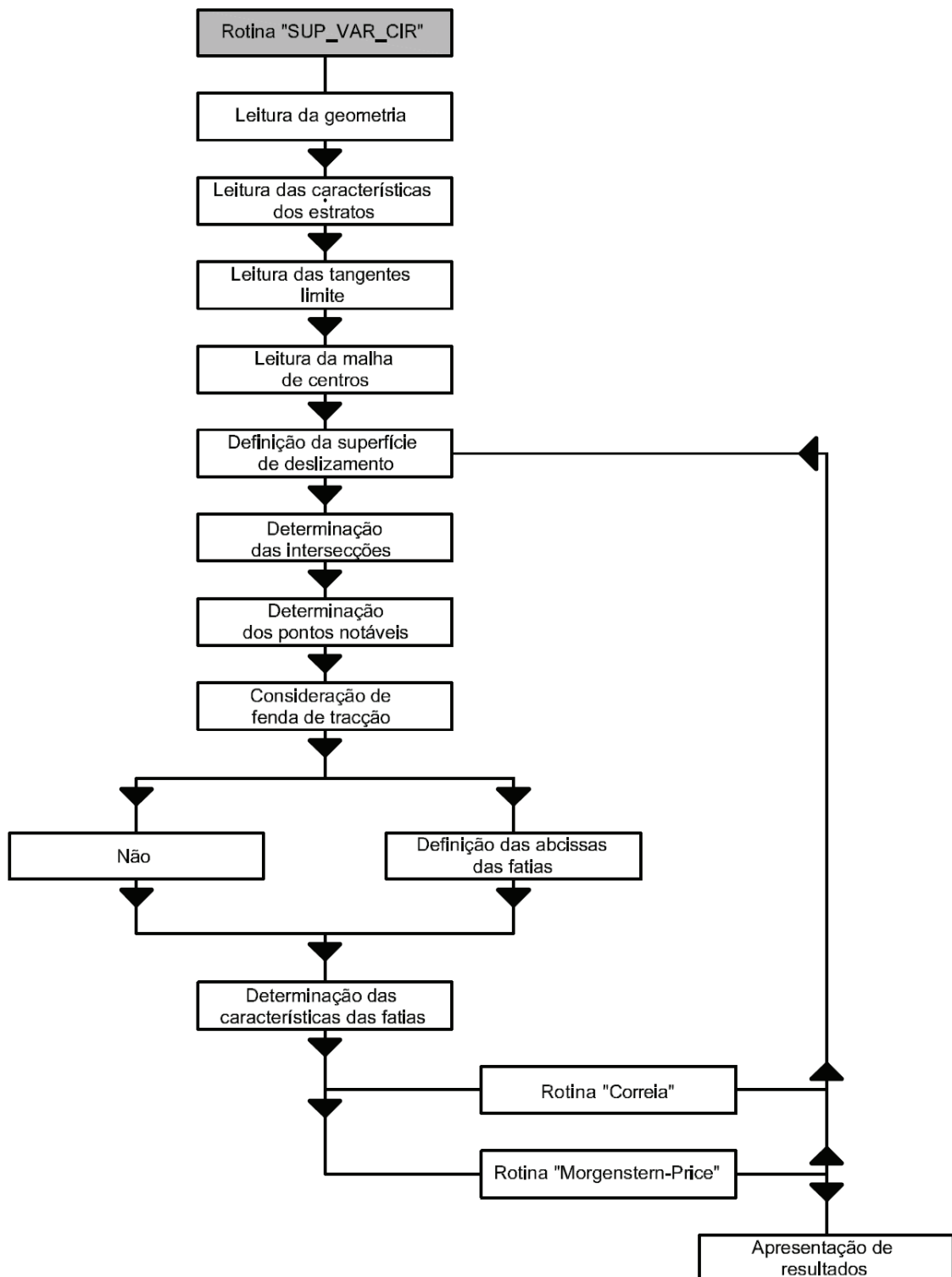


Fig. 5.3 – Estrutura da rotina "SUP_VAR_CIR"

A busca pela superfície de deslizamento que dá o FS mínimo é feita através da definição de uma malha de centros e da introdução das coordenadas correspondentes às tangentes mínima e máxima. Estas definem o raio mínimo e máximo das superfícies com centro na malha referida. Naturalmente, no caso das rotinas “SUP_ESP_CIR” e “SUP_ESP_POL” o programa não faz esse tipo de leituras, uma vez que a superfície de deslizamento a analisar é introduzida pelo utilizador.

A rotina correspondente à superfície poligonal específica não conta com a instrução relativa à fenda de tracção. De facto, como se trata da introdução de segmentos, o utilizador pode considerá-la na mesma dando a informação ao programa das coordenadas do segmento que a define, no momento em que introduz a superfície de deslizamento.

5.2.3. INTRODUÇÃO DE DADOS

A introdução dos dados faz-se através de um ficheiro Excel específico, designado “Caracterização do talude”, constituído por três folhas devidamente formatadas para cada tipo de análise. O programa TALUDES_Mv1 extrai a informação do respectivo ficheiro e prossegue o cálculo a partir dos valores lidos. Toda a informação requerida para o cálculo é fornecida através desse ficheiro.

Apresentam-se agora algumas figuras relativas à folha Excel “Sup. circulares várias” associada à rotina que faz a busca do factor de segurança mínimo.

1. Preencha o quadro azul:									
Dados gerais						Sismo		Cálculo de FS	
Nº de estratos	3	NMFat	1000	EDouDE	1	kv	0	itermax	1000
INFdet	1	LargMaxFat	0,2	Ftrac	0	kh	0		
NF	1	AltMinFat	0,2	xFtrac	65				

Se o maciço desliza da esquerda para a direita coloque 1 em "EDouDE"; senão coloque 0 ;
Se pretende informação detalhada relativa à superfície de deslizamento do maciço coloque 1 em "INFdet"; senão coloque 0 ;
Se existe fenda de tracção coloque 1 em "Ftrac"; senão coloque 0 ;
NF - nível freático; coloque 1 se existe nível freático; senão coloque 0 ;
NMFat - número máximo de fatias;
LargMaxFat - largura máxima das fatias;
AltMinFat - altura mínima das fatias;
xFtrac - coordenada x da fenda de tracção;
itermax - número máximo de iterações;

Fig. 5.4 – Quadro para introdução de dados gerais, dados de sismo e número de iterações

A informação é introduzida em vários quadros numerados e de cores diferentes, dispostos na vertical e complementados com alguma informação, conforme mostra a figura 5.4. Neste caso concreto, o utilizador introduz informação relativa:

- ao número de estratos;
- à escrita de informação detalhada;
- à inclusão do nível freático;
- ao número máximo de fatias;
- à largura máxima das fatias;
- à altura mínima das fatias;
- ao sentido de deslizamento do talude;
- à fenda de tracção;
- à abcissa da fenda de tracção;

- ao coeficiente sísmico horizontal;
- ao coeficiente sísmico vertical;
- ao número máximo de iterações no cálculo de FS.

2. Preencha o quadro amarelo:

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	20	21	24	26
$\Phi(^{\circ})$	35	30	32	22
$c'(\text{kPa})$	10	5	7	2

Fig. 5.5 – Quadro para introdução das características dos materiais

A figura 5.5 apresenta o quadro onde se faz a introdução das características dos solos constituintes de cada estrato, nomeadamente, peso volúmico, ângulo de atrito e coesão.

3. Preencha o quadro vermelho introduzindo as coordenadas de cada estrato a partir do ponto mais à esquerda:

Coordenadas									
Estrato 1		Estrato 2		Estrato 3		Estrato 4		Nível freático	
xx1	yy1	xx2	yy2	xx3	yy3	xx4	yy4	xxw	yyw
1	40	1	35	1	30			1	37
60	40	30	35	30	30			30	37
100	49	70	35	70	30			70	37
160	49	160	35	160	30			160	37

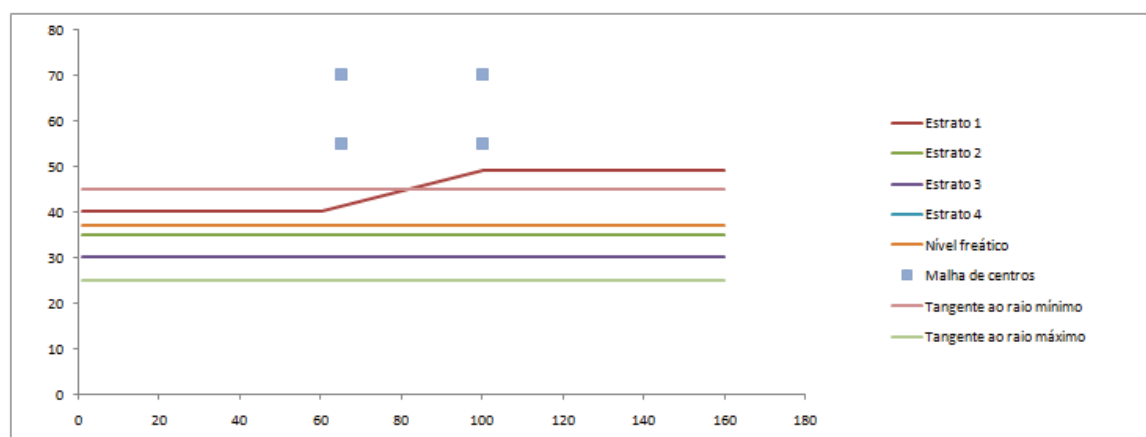


Fig. 5.6 – Quadro para introdução das coordenadas das superfícies dos estratos e do nível freático

A figura 5.6 mostra o quadro onde se faz a introdução das coordenadas da superfície dos estratos e do nível freático. A introdução dos pontos deve ser feita da esquerda para a direita, independentemente da configuração da superfície. O nível freático pode assumir qualquer configuração desde que as ordenadas dos respectivos pontos não se repitam. Para ajudar a fazer a entrada correcta de coordenadas, criou-se o gráfico apresentado na figura 5.6, permitindo que o utilizador visualize a geometria do problema à medida que insere os dados.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
65	70	35	15
100	70		
100	55		
65	55		

Fig. 5.7 – Quadro para introdução das coordenadas da malha de centros e comprimento e largura da quadrícula

A figura 5.7 mostra o quadro onde se faz a introdução das coordenadas da malha de centros e do comprimento e largura da quadrícula. No caso apresentado, temos apenas uma quadrícula pelo que a análise vai ser feita com superfícies centradas apenas em quatro pontos.

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
1	45	1	25	20
160	45	160	25	

Fig. 5.8 – Quadro para definição das coordenadas das rectas tangentes e respectivo incremento

A figura 5.8 apresenta o quadro onde se faz a introdução das coordenadas relativas às rectas tangentes. Estas definem as superfícies de deslizamento de raio mínimo e máximo. O incremento também é definido neste quadro. No caso apresentado, as superfícies analisadas terão apenas dois raios possíveis.

As folhas Excel associadas às restantes rotinas não contam com os dois últimos quadros apresentados pois a superfície de deslizamento é especificada pelo utilizador. As figuras 5.9 e 5.10 mostram os quadros que permitem introduzir as coordenadas de uma superfície poligonal e circular específicas, respectivamente.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Superfície de deslizamento	
Coordenadas	
xc	yc
11,1	45,7
39,1	22,9
67,2	11,5
95,1	8,1
114,4	9,7
133,9	15,1

Fig. 5.9 – Quadro para introdução da superfície poligonal específica

4. Preencha o quadro verde introduzindo os dados relativos à superfície de deslizamento:

Superfície deslizamento	
Xc	27
Yc	17
Raio	11

Fig. 5.10 - Quadro para introdução da superfície circular específica

Por fim, a figura 5.11 apresenta o quadro onde o utilizador especifica o método de cálculo utilizado para realização da análise. O factor de segurança pode ser obtido através de Correia (rotina apresentada no anexo C), Morgenstern-Price ou ambos. No caso do método de Morgenstern-Price, o utilizador pode ainda escolher a função de interacção (constante ou meio seno).

5. Preencha o quadro a cinzento indicando os métodos de cálculo a adoptar:

Métodos de cálculo		Função	
Correia	0	sino	Método de Morgenstern-Price:
Morgenstern-Price	1	2	Função meio seno - 2
			Função constante - 1

SALVAR O FICHEIRO (CLICAR NA DISQUETE DESTA FOLHA) E GUARDAR NA PASTA "TALUDES_JP1"

Fig. 5.11 – Definição do método de cálculo

Todos os quadros de introdução de dados, com excepção daquele que define as coordenadas dos estratos, devem ter as suas células preenchidas. Se só existem, por exemplo, três estratos, as células do quadro amarelo, relativas às propriedades do quarto estrato, devem ser preenchidas com zeros. O mesmo procedimento deve ser efectuado nos restantes.

```

Cálculo com introdução do nível freático!

O maciço sofre deslocamento da esquerda para a direita!

Não foi introduzida fenda de tracção!

Leitura dos estratos bem sucedida!

Dados relativos à superfície circular de deslizamento:

      Xc=30;  Yc=55;  Raio=10;

Constituição do maciço: três estratos!

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE CORREIA EXECUTADO COM SUCESSO

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE EXECUTADO COM SUCESSO

```

Fig. 5.12 – Informação sumária do TALUDES_Mv1

O programa foi elaborado de maneira a transmitir alguma informação acerca dos dados introduzidos na folha de “inputs”. Desta forma, o utilizador poderá aperceber-se da introdução de algum dado

errado. A figura 5.12, extraída durante a corrida de um dos casos em análise, mostra alguma dessa informação fornecida.

À medida que a programação ia evoluindo, houve também a preocupação de fazer com que o programa lançasse mensagens de erro quando algum dos dados fosse contraditório, ou alguma das condições de cálculo (por exemplo, altura mínima das fatias) não fosse cumprida. É o que acontece quando o utilizador especifica que existe nível freático mas não introduz as suas coordenadas. A figura 5.13 mostra a mensagem lançada nessa situação concreta.

```
>> run('C:\TALUDE_Mv1\TALUDES_Mv1.m')
PROGRAMA TALUDES_Mv1 (Matlab, versão n°1)
Autores: João Paulo Silva
        Prof. José Couto Marques

Bem vindo ao programa TALUDES_Mv1!

Entre na pasta "ficheiros_TALUDE_Mv1", abra o ficheiro excel "Caracterização do talude"
e introduza os dados de acordo com o tipo de análise que pretende!
Tipos de análise:
    Superfície circular específica - 1
    Superfície poligonal específica - 2
    Busca de FS mínimo - 3

Especifique o tipo de análise pretendida(digite o número correspondente): 1

Cálculo sem introdução do nível freático!

O maciço sofre deslocamento da direita para a esquerda!

Não foi introduzida fenda de tracção!

Leitura dos estratos bem sucedida!

ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa ao nível freático

A >> |
```

Fig. 5.13 – Exemplo de informação de erro lançada pelo programa

5.2.4. GEOMETRIA E ESTRATIFICAÇÃO DO TALUDE

A geometria dos problemas define-se a partir da superfície do maciço e da inclusão dos estratos. Basta, para isso, introduzir as coordenadas das superfícies de separação no ficheiro de dados. Estes devem ter sempre sinal positivo, o que significa que apenas é utilizado o primeiro quadrante, conforme exemplificado na figura 5.6. Por outro lado, e conforme já referido, as coordenadas devem ser inseridas começando pelo ponto extremo esquerdo até ao ponto extremo direito de cada estrato. Além disso, o número de pontos que define cada uma das superfícies deve ser o mesmo. Assim, se uma precisar, por exemplo, de seis pontos para ficar definida, também as outras, mesmo que sejam rectas, devem ser especificadas com os mesmos seis pontos.

A profundidade de cada estrato depende da cota à qual o seguinte se encontra. O último estrato definido terá uma profundidade igual à distância entre a sua superfície e o eixo das abcissas. Se apenas um for considerado no cálculo, então a sua profundidade será a diferença de cotas entre a superfície do maciço e o eixo citado.

O utilizador pode considerar, no máximo, 4 estratos, tendo especial atenção para a definição do último a ser inserido. Face ao exposto, este deve ficar a uma ordenada suficientemente acima do $y=0$ para que

possa ter alguma expressão. O autor aconselha a que a introdução dos estratos se inicie pelo de cota mais baixa.

É essencial o cumprimento destes pequenos aspectos no que respeita à definição da geometria, uma vez que a possança dos estratos terá influência directa no peso das fatias.

5.2.5. CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO

Para qualquer problema passível de análise no TALUDES_Mv1, o utilizador pode definir se pretende ou não incluir o nível freático. Em caso afirmativo, terá que inserir as coordenadas da linha piezométrica. Esta será, assim, formada por segmentos rectos e poderá assumir uma configuração qualquer desde que nenhuma das suas ordenadas se repita.

5.2.6. DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO

A definição da superfície de deslizamento varia consoante o tipo de rotina utilizada. Se for a “SUP_ESP_CIR” o utilizador terá que introduzir as coordenadas do centro da superfície e indicar o seu raio. O programa lê os dados inseridos e faz o cálculo em função dessa superfície circular específica.

Se, por outro lado, estiver a usar a “SUP_ESP_POL”, o utilizador terá que inserir as coordenadas da superfície de deslizamento, através de segmentos rectos, tantos quanto os necessários para que a linha de rotura fique bem definida. O cálculo será, então, realizado em função dessa superfície introduzida.

Já se a rotina for a “SUP_VAR_CIR”, o próprio programa definirá várias superfícies circulares e, para cada uma, fará o cálculo do factor de segurança. Para isso basta introduzir as coordenadas de quatro pontos, definidores de um quadrilátero, que será, depois, dividido em quadrículas com altura e largura especificadas pelo utilizador (podem ser diferentes). Para cada ponto da quadrícula o programa desenha várias circunferências, tantas quanto o número de raios possíveis, e procede ao cálculo de FS.

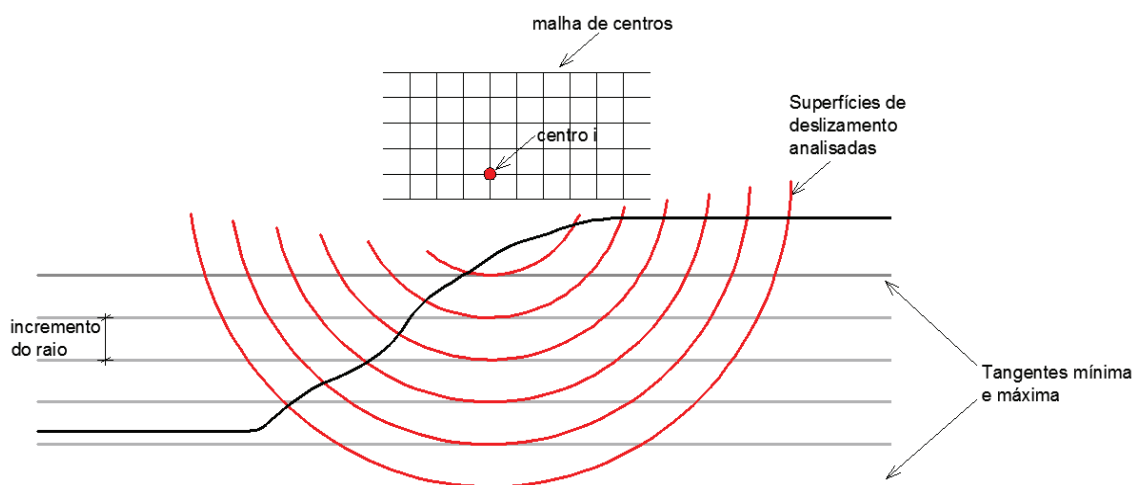


Fig. 5.14 – Malha de centros e superfícies de deslizamento

A definição dos raios faz-se através da consideração de duas rectas, que serão tangentes ao raio mínimo e máximo, e da introdução do respectivo incremento. Todas as superfícies circulares

analisadas terão um raio compreendido entre a tangente mínima e máxima, a variar do incremento considerado. Desta forma, o programa assume um centro, faz variar o raio até que todas as superfícies possíveis tenham sido desenhadas e calcula os respectivos factores de segurança. Concluída a análise, avança para o centro seguinte, repetindo o procedimento (figura 5.14). O cálculo será tanto mais rigoroso quanto mais apertada for a quadrícula, pois mais superfícies serão desenhadas e mais valores de FS serão obtidos.

5.2.7. DETERMINAÇÃO DAS SUPERFÍCIES INVÁLIDAS

Quando a rotina utilizada é aquela em que o utilizador pretende fazer uma busca pela superfície de deslizamento que conduz ao factor de segurança mínimo, pode dar-se o caso de o programa desenhar superfícies inválidas. Mesmo na rotina onde é introduzida uma superfície circular específica, pode acontecer, por distração do utilizador, que a superfície introduzida não seja válida.

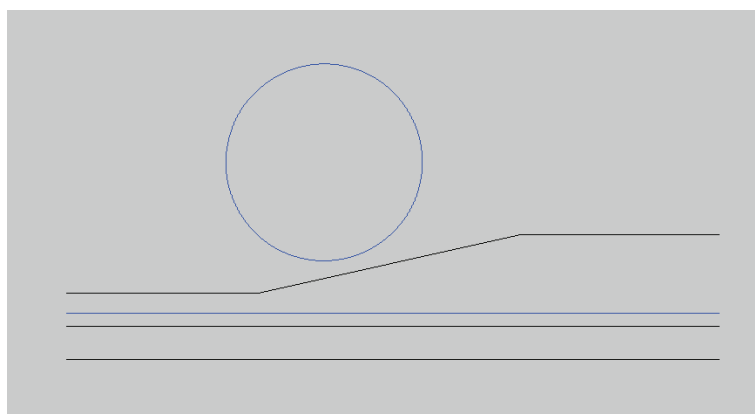


Fig. 5.15 – Imagem fornecida pelo programa TALUDES_Mv1 (caso 1)

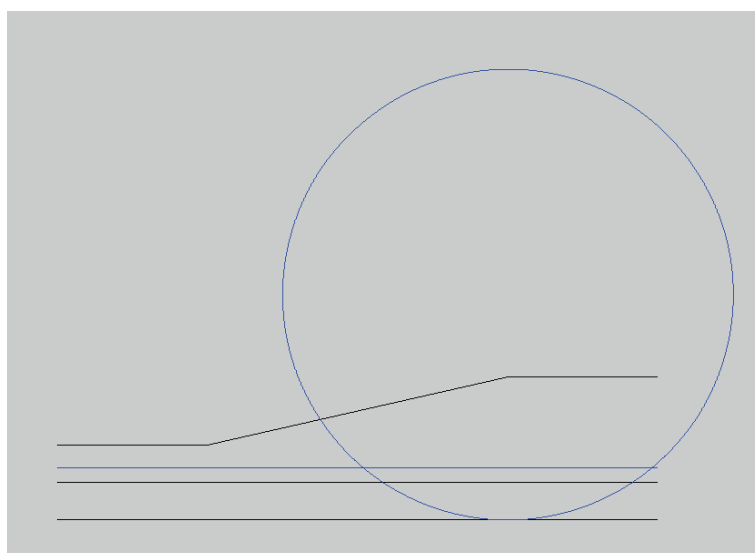


Fig. 5.16 – Imagem fornecida pelo programa TALUDES_Mv1 (caso 2)

Uma superfície será considerada inválida quando:

- a superfície não tem um raio suficientemente grande que permita a intersecção com o talude (figura 5.15);
- a superfície intersecta os limites laterais dos estratos ou a base do talude (não há uma massa potencialmente instável circunscrita) (figura 5.16).

No caso da rotina “SUP_VAR_CIR”, o programa TALUDES_Mv1 ignora essa superfície e passa ao desenho e análise da seguinte. Se for a “SUP_ESP_CIR”, o programa lança uma mensagem de erro, desenha a superfície introduzida e pára o processo (figura 5.17). É importante que o mesmo esteja preparado para reconhecer esse tipo de superfícies e eliminá-las antes de proceder à divisão das fatias da massa deslizando e posterior cálculo do factor de segurança.

```
>> run('C:\TALUDE_Mv1\TALUDES_Mv1.m')
PROGRAMA TALUDES_Mv1 (Matlab, versão n°1)
Autores: João Paulo Silva
        Prof. José Couto Marques

Bem vindo ao programa TALUDES_Mv1!

Entre na pasta "ficheiros TALUDE_Mv1", abra o ficheiro excel "Caracterização do talude"
e introduza os dados de acordo com o tipo de análise que pretende!

Tipos de análise:
  Superfície circular específica - 1
  Superfície poligonal específica - 2
  Busca de FS mínimo - 3

Especifique o tipo de análise pretendida (digite o número correspondente): 1

-----
Cálculo iniciado
-----
Cálculo com introdução do nível freático!

O maciço sofre deslocamento da direita para a esquerda!

Não foi introduzida fenda de tracção!

Leitura dos estratos bem sucedida!

Dados relativos à superfície circular de deslizamento:

      Xc=100; Yc=60; Raio=30;

A superfície de deslizamento em análise não intersecta a superfície do terreno
e/ou intersecta os limites laterais dos estratos!

fx SOLUÇÃO: Reveja e introduza novamente os dados que definem a superfície de deslizamento a analisar!>>
```

Fig. 5.17 – Informação lançada pelo TALUDES_Mv1 quando a superfície circular específica introduzida não é válida

Existe ainda uma outra situação em que o TALUDES_Mv1 não considera válida a superfície desenhada. Trata-se do caso em que, após a divisão da massa deslizando em fatias, estas têm uma altura máxima tão pequena que não justificam qualquer análise de estabilidade. Isto acontece já numa fase mais avançada do processamento de dados uma vez que é necessária a altura das fatias. Nestas situações, o TALUDES_Mv1 pára o cálculo se a rotina utilizada for a “SUP_ESP_CIR” ou a “SUP_ESP_POL”, lançando uma mensagem para o utilizador onde avisa que a altura mínima das fatias não foi atingida. Se a rotina usada for a “SUP_VAR_CIR”, interrompe o cálculo e avança para a superfície seguinte.

A consideração destas superfícies leva a uma perda de tempo que não se justifica já que a massa deslizante envolvida é insignificante.

Um dos problemas detectados durante a validação do programa prendeu-se com as linhas de rotura que intersectam a superfície do maciço em mais do que dois pontos. O problema ficou resolvido com instruções acerca dos pontos que o TALUDES_Mv1 deve considerar, tirando partido do modo como o programa define a linha de rotura.

5.2.8. DIVISÃO DA MASSA INSTÁVEL EM FATIAS

A divisão em fatias da massa potencialmente instável deve obedecer a alguns critérios para que a atribuição dos parâmetros resistentes e a avaliação do peso seja mais fácil e rigorosa. Existem pontos da geometria do talude onde obrigatoriamente deve haver uma divisão. São eles:

- pontos de intersecção da superfície de deslizamento com a superfície dos vários estratos;
- pontos notáveis das superfícies dos estratos (ex: pontos onde há mudança de declive);
- pontos de intersecção do nível freático com as superfícies dos estratos e com a linha de rotura.

A introdução de novas divisões é feita entre cada par de pontos acima definidos, conforme a distância que os separa. Se for maior que a largura máxima definida para a fatia, o programa introduz novas divisões, tantas quantas as necessárias para que esse “input” seja respeitado.

5.2.9. CÁLCULO COM FENDA DE TRACÇÃO

A simulação de uma fenda de tracção pode ser feita utilizando as três rotinas, embora na “SUP_ESP_POL” o procedimento para introdução da mesma esteja “diluído” na definição da superfície de deslizamento, conforme já explicado.

O TALUDES_Mv1 não detecta por si só a existência dessa fenda, devendo, por isso, ser introduzida pelo utilizador.

5.2.10. DETERMINAÇÃO DO FACTOR DE SEGURANÇA

Definida a geometria e as características das fatias para cada superfície, o programa inicia o cálculo do factor de segurança. A análise pode ser feita através de dois métodos, em simultâneo ou individualmente: método de Correia e método de Morgenstern-Price. Os algoritmos implementados são os apresentados nos subcapítulos 4.2 e 4.3 e ambos iniciam o cálculo com um factor de segurança unitário.

As funções utilizadas nos métodos são a função seno para Correia, e as funções “meio seno” ou constante ($f(x) = 1$) para Morgenstern-Price. Para o último método, o utilizador escolhe aquela que achar mais adequada para a análise em curso.

5.2.11. VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS

No ficheiro de “inputs” o utilizador especifica se pretende ou não informação detalhada do cálculo. Ainda que não seja requerida, o programa lança sempre alguma informação relativa ao processamento

dos dados e resultados propriamente ditos. A figura 5.18 mostra a escrita fornecida pelo programa na análise de uma superfície específica. Quando um factor de segurança é obtido, o programa informa que o cálculo foi obtido com sucesso. Se tal não acontecer, a mensagem será no sentido de que nenhum factor de segurança foi encontrado e que, por isso, os dados de entrada devem ser revistos. Além disso, são indicados o tempo de cálculo, os valores de FS, $X_{máx}$ e/ou λ , consoante o método escolhido, e o número de iterações necessárias para conseguir a convergência.

```

Cálculo com introdução do nível freático!

O maciço sofre deslocamento da direita para a esquerda!

Não foi introduzida fenda de tracção!

Leitura dos estratos bem sucedida!

Dados relativos à superfície circular de deslizamento:

    Xc=100; Yc=60; Raio=30;

Constituição do maciço: três estratos!

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE CORREIA EXECUTADO COM SUCESSO

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE EXECUTADO COM SUCESSO

Tempo de cálculo (em segundos): 0.70992

MÉTODO DE CORREIA:

    Factor de Segurança obtido: 4.9138

    Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança: 553.1773

    Número de iterações realizadas: 9

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

    Factor de Segurança obtido: 4.9184

    Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: 0.19363

    Número de iterações realizadas: 27

```

Fig. 5.18 – Informação lançada pelo programa no final do cálculo

Se, por outro lado, o utilizador pretender informação detalhada, será apresentado um conjunto de informação relativo a todas as superfícies analisadas e outro relativo à superfície que conduziu ao factor de segurança mínimo, como, por exemplo, reacção normal na base e forças de interacção entre fatias. Em anexo o leitor poderá encontrar a informação extraída relativa aos casos de estudo deste trabalho.

Todos os resultados apresentados no “comand window” do Matlab são guardados num ficheiro “txt”, na pasta “Resultados” que acompanha o programa TALUDES_Mv1.

Para além de resultados numéricos, o TALUDES_Mv1 permite também a visualização de resultados gráficos, nomeadamente:

- geometria do talude;

- superfície de deslizamento crítica;
- malha de centros com sinalização a vermelho do centro da superfície supracitada;
- divisão em fatias;
- linha de impulso;
- histogramas com representação da força normal, N' , e das forças de interacção, X e E ;
- sobreposição na mesma figura das linhas de impulso fornecidas pelos dois métodos.

Os resultados gráficos serão apresentados ao leitor no capítulo dedicado à análise de resultados, quando se compararem os valores obtidos pelos diferentes programas utilizados no estudo.

5.3. PLAXIS

5.3.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

O Plaxis é um programa de cálculo por elementos finitos, desenvolvido especificamente para a realização de análises de deformação e estabilidade de obras de carácter geotécnico (Plaxis 2008). Trata-se de um programa bi-dimensional em que, para a realização do cálculo, se pode considerar estado plano de deformação ou estado axissimétrico.

O utilizador cria a geometria pretendida através de pontos e linhas no plano x-y. Após introdução da mesma, uma malha de elementos finitos é gerada automaticamente, podendo ser refinada pelo utilizador. Os elementos podem ser quadrangulares ou triangulares. Para as análises efectuadas neste trabalho serão utilizados os últimos citados, com 15 nós cada. De entre os vários modelos de cálculo que o programa permite adoptar, será utilizado o critério de cedência de Mohr-Coulomb.

O programa divide-se em 4 rotinas de cálculo: “Input”, “Calculations”, “Output” e “Curves”.

A rotina “Input” permite a definição da geometria e de elementos de suporte, a geração da malha de elementos finitos e a geração das condições iniciais.

A rotina “Calculations” permite o início do cálculo definindo o tipo de análise a realizar. O utilizador pode introduzir várias fases de construção, que corresponderão a etapas de cálculo faseadas, onde, para cada uma, introduzirá o tipo de cálculo pretendido: cálculo plástico, análise de consolidação ou análise de estabilidade (a escolhida para o estudo presente).

A rotina “Output” permite a visualização dos resultados provenientes do cálculo, numéricos ou gráficos, como, por exemplo, deformações e tensões.

A rotina “Curves” permite gerar gráficos do tipo “carga-deslocamento” e “tensão-deformação”.

5.3.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE: “PHI-C REDUCTION”

As análises efectuadas neste trabalho são do tipo elastoplásticas e contam com a geração das tensões iniciais, devido à acção da gravidade, e das pressões neutras, quando existe nível freático (são geradas antes do cálculo propriamente dito e tidas em consideração no decorrer daquele).

A análise de estabilidade no Plaxis faz-se seleccionando na rotina “Calculations” o tipo de cálculo “Phi-c reduction”.

O programa reduz gradualmente os parâmetros resistentes $\tan \phi'$ e c' do solo até que a rotura ocorra. O multiplicador total $\sum Msf$ é usado para definir o valor daqueles em cada estado da análise, e é dado por:

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi'_{inicial}}{\tan \phi'_{reduzido}} = \frac{c'_{inicial}}{c'_{reduzido}} = FS \quad (5.1)$$

O valor inicial de $\sum Msf$ será, naturalmente, 1,0. Iniciado o cálculo, este valor vai aumentando à medida que $\tan \phi'$ e c' são reduzidos até que se dê a rotura.

O multiplicador Msf é usado para controlar a magnitude da redução daqueles parâmetros, gradualmente e com incrementos de 0,1. O programa realiza, por defeito, 100 “steps” de carga, neste caso, de redução dos parâmetros. Se ao fim desse processo a rotura não tiver sido atingida, será necessário repetir o cálculo definindo mais “steps” de redução.

O factor de segurança é dado pelo valor de $\sum Msf$ no final do cálculo.

5.4. PHASE2

5.4.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

O Phase2 é um programa 2D dedicado ao cálculo de tensões e deformações no subsolo, através de elementos finitos. O cálculo pode ser realizado considerando o estado plano de deformação ou o estado axissimétrico, tal como no Plaxis, permitindo também a construção faseada e a introdução de vários elementos de suporte nas simulações de cálculo.

O processo de definição da geometria é idêntico ao Plaxis. O utilizador desenha as linhas ou introduz coordenadas dos pontos que definem o problema. O programa gera automaticamente a malha e esta pode ser refinada em função do tipo de análise desejada. Também a aqui os elementos podem assumir configuração quadrangular e triangular, embora com um número máximo de 8 nós. Nos exemplos em estudo neste trabalho serão utilizados elementos triangulares de 6 nós.

O programa está dividido em três módulos ou rotinas diferentes: “Model”, “Compute” e “Interpret”.

A rotina “Model” é o módulo que permite a introdução dos dados, nomeadamente, geometria, condições fronteiras, condições iniciais, definição dos materiais e geração da malha, entre outros.

A rotina “Compute” faz o cálculo pedido em função dos dados introduzidos no “Model” e só se inicia se uma malha de elementos finitos tiver sido gerada. Após a corrida, são gerados ficheiros, do tipo “.R??”, “.X??”, “.LOG” e “.U??” que contêm a informação resultante do cálculo.

A rotina “Interpret” é o módulo que permite a visualização e interpretação dos resultados obtidos com rotina “Compute”, desde gráficos a colorações relativas a tensões e deformações.

5.4.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE: “SHEAR STRENGTH REDUCTION”

As análises implementadas neste trabalho utilizam o critério de cedência de Mohr-Coulomb e consideram o campo de tensões gravítico (são geradas as tensões iniciais antes do cálculo propriamente dito). Nos problemas em que existe nível freático o programa entra em consideração com as pressões neutras geradas.

O programa reduz gradualmente os parâmetros resistentes $\tan \phi'$ e c' do solo em sucessivas análises até que se verifique a falta de convergência do processo de cálculo, que assinalará a ocorrência da rotura. O cálculo do factor de segurança faz-se através da expressão:

$$FS = \frac{S_{max}}{S} \quad (5.2)$$

em que S_{max} e S são a resistência máxima ao corte e a resistência mobilizada, respectivamente. As equações que definem cada uma destas variáveis não serão aqui expostas, mas se o leitor estiver interessado pode consultá-las nos tutoriais do Phase2. Salienta-se apenas o facto de elas terem em conta o estado de tensão e deformação do material.

A figura 5.19 ajuda a perceber o conceito que está na base do cálculo de FS, que é, na verdade, o subjacente aos métodos de equilíbrio limite anteriormente apresentados. À medida que a resistência do maciço diminui o deslocamento ou deformação aumenta. A certa altura, as deformações em alguns pontos serão tão elevadas que o algoritmo de elementos finitos deixa de convergir. Tal indica que o talude rompeu e o factor de segurança encontrado será então o factor de segurança do talude.

2-D Graphical Representation

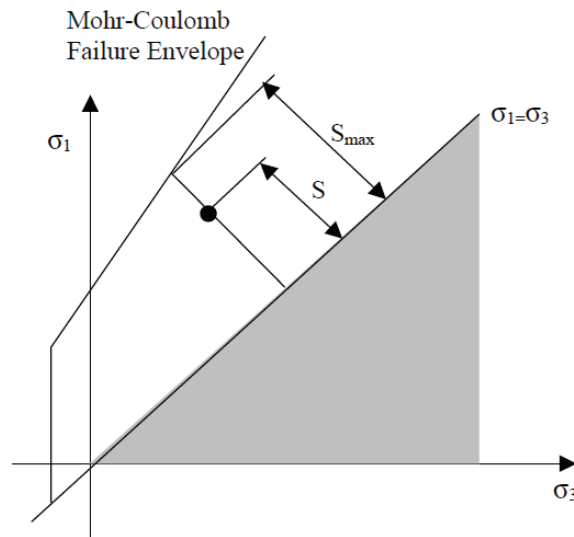


Fig. 5.19 – Definição de S_{max} e S

6

CASOS DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. GENERALIDADES

Ao conceito “criar”, tantas vezes ouvido no dia-a-dia, estão sempre associados dois termos que se revestem de especial importância e sem os quais qualquer ideia de “criação” não passaria disso mesmo. São eles “desenvolvimento” e “validação”. A ideia de criar um programa de cálculo da estabilidade de taludes tem como objectivo a sua aplicação futura aos mais variados casos, inspirando confiança ao utilizador quanto aos resultados obtidos, sem descuidar, no entanto, as limitações dos métodos implementados.

Concluída e apresentada a parte relativa à “construção” das rotinas de cálculo, apresentam-se agora dois casos de estudo, incluídos nos tutoriais do software Plaxis e Phase2, cujos resultados permitirão estabelecer uma comparação com os que se obtêm quando os mesmos exemplos são corridos no TALUDES_Mv1. Embora o Plaxis e Phase2 se apoiem num algoritmo de elementos finitos, cujo cálculo se espera ser mais realista, as diferenças não poderão ser muito elevadas, dado o carácter rigoroso dos métodos de equilíbrio limite utilizados e todas as considerações apresentadas até esta parte acerca dos mesmos. Duncan (1996) refere mesmo que a diferença de resultados entre uma e outra metodologia será inferior a 12%, dependendo da complexidade de cada problema.

Validados os resultados, procede-se à variação das características geométricas dos dois casos analisados, obtendo, desta forma, estudos de parametrização entre os métodos de equilíbrio limite implementados no TALUDES_Mv1 e o Método de Elementos Finitos.

6.2. CASO DE ESTUDO 1

6.2.1. GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

O primeiro caso de estudo corresponde a um aterro rodoviário, exposto num dos tutoriais do software Plaxis e representado, neste trabalho, na figura 6.1. O exemplo enunciado é constituído por três estratos, nomeadamente, areia, turfa e argila, o primeiro com 4m de altura e os restantes com 3m. O nível freático coincide com a linha de separação entre os estratos de areia e de turfa, pelo que parte do solo se encontra saturada (zona preenchida a cor azul). O quadro 6.1 apresenta as características relevantes de cada um destes materiais.

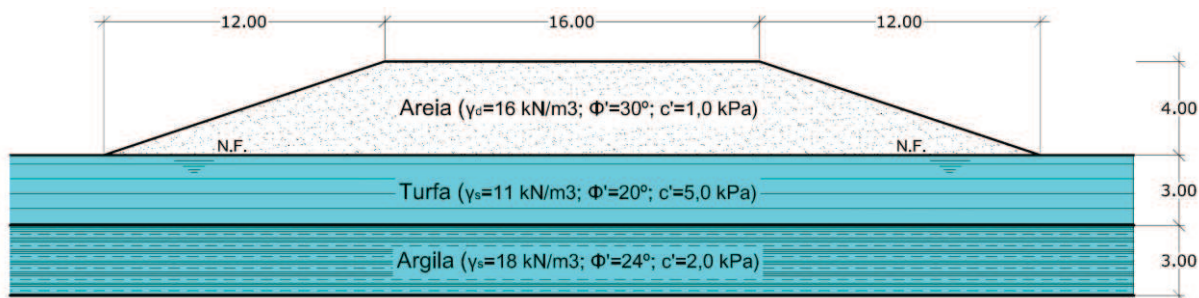


Fig. 6.1 – Caso de estudo 1

Quadro 6.1 – Características dos materiais relativos ao caso de estudo 1

Parâmetro	Areia	Turfa	Argila	Unidade
Comportamento	Drenado	Não drenado	Não drenado	-
Peso Volúmico Seco	16	8	15	kN/m ³
Peso Volúmico Saturado	20	11	18	kN/m ³
Permeabilidade Horizontal	1.0	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	m/dia
Permeabilidade Vertical	1.0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	m/dia
Módulo de Young	3000	350	1000	kPa
Coefficiente de Poisson	0.3	0.35	0.33	-
Coesão	1.0	5.0	2.0	kPa
Ângulo de atrito	30	20	24	°

Dada a simetria do problema apresentado, será modelada apenas metade da geometria (parte direita) em cada uma das ferramentas de análise.

6.2.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

As análises de estabilidade referentes ao caso de estudo 1 foram realizadas pelos programas Plaxis e TALUDES_Mv1. Efectuaram-se 4 estudos para a geometria apresentada na figura 6.1, fazendo variar apenas alguns aspectos constituintes, relativos ao número de estratos e nível freático. As características adoptadas para cada estudo são as seguintes:

- Problema 1: talude representado na figura 6.1;
- Problema 2: mesmas características do problema 1 considerando uma superfície de deslizamento poligonal;
- Problema 3: mesmas características do problema 1 considerando o maciço completamente drenado (não existe nível freático);
- Problema 4: mesmas características do problema 1 mas considerando apenas um estrato de argila.

6.2.3. APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

6.2.3.1. Problema 1

A figura 6.2 apresenta a geometria introduzida no Plaxis referente ao problema 1

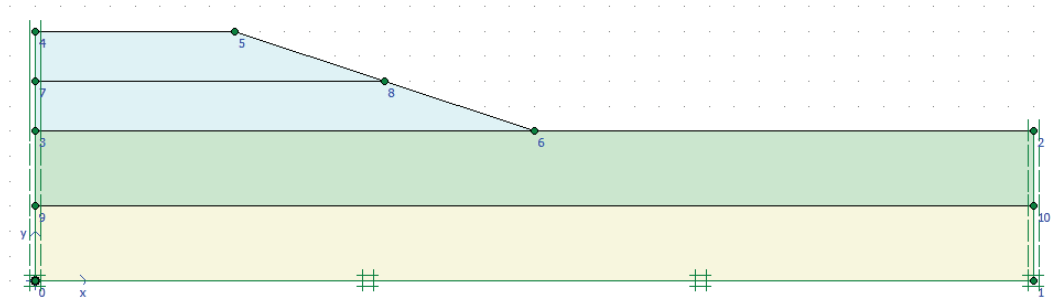


Fig. 6.2 – Geometria (problema 1 – Plaxis)

O nível freático encontra-se na separação entre os estratos areia e turfa. As fronteiras laterais são fechadas impedindo o fluxo de água através das mesmas. O cálculo faz-se, neste caso, com construção faseada, considerando uma fase de consolidação de 200 dias após a construção de cada uma das partes do aterro (camada superior). Daí a separação existente na figura 6.2 dentro do primeiro estrato. A malha utilizada é constituída por 152 elementos, de 15 nós cada, respeitando assim as instruções que acompanham o tutorial.

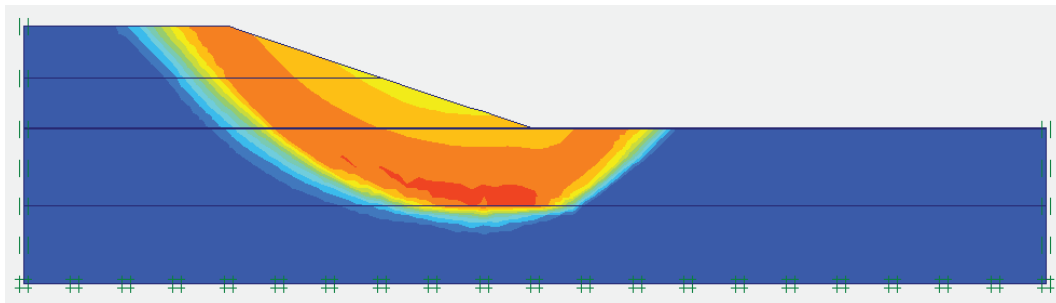


Fig. 6.3 – Superfície de deslizamento (problema1 – Plaxis)

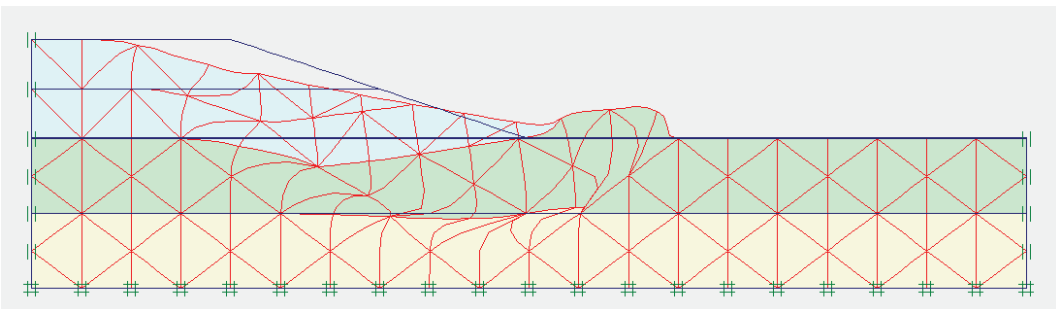


Fig. 6.4 – Deformação da malha (problema 1 – Plaxis)

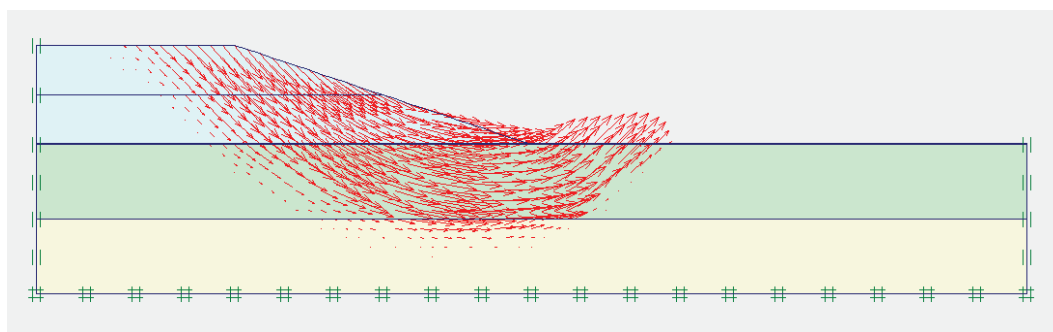


Fig. 6.5 – Vectors deslocamento (problema 1 – Plaxis)

A superfície crítica obtida é a representada na figura 6.3 e corresponde à interface que circunscreve a massa com tons mais claros. O factor de segurança calculado vale 1,34.

A linha de rotura intersecta os três estratos considerados, embora de forma muito ligeira na última camada. Em termos físicos, tal configuração parece fazer sentido, uma vez que o solo argiloso, com uma coesão bem mais pequena que a da turfa, oferece uma resistência ao corte menor.

As figuras 6.4 e 6.5 mostram a deformação da malha e os vectores deslocamento associados ao movimento da massa instável, respectivamente.

Introduzindo a geometria apresentada em 6.2.1 no TALUDES_Mv1, procurou-se encontrar a superfície circular crítica e comparar o valor correspondente de FS com o obtido pelo Plaxis.

A figura 6.6 corresponde a um dos vários dados gráficos fornecidos pelo TALUDES_Mv1 e mostra a geometria que foi modelada no Plaxis. A última camada tem como fronteira inferior o eixo das abcissas, conforme explicado no capítulo 5.

O primeiro cálculo, designado por “iteração 1”, foi realizado para uma malha de centros com as características definidas na figura 6.7. As rectas tangentes que definem o raio mínimo e máximo têm ordenadas $y=16\text{m}$ e $y=6\text{m}$, respectivamente. Os raios das circunferências analisadas sofrem um incremento de 5m , pelo que, nesta análise preliminar, apenas se consideraram 2 superfícies circulares para cada centro. A massa deslizante considerada foi dividida em fatias com a largura máxima de 1m .

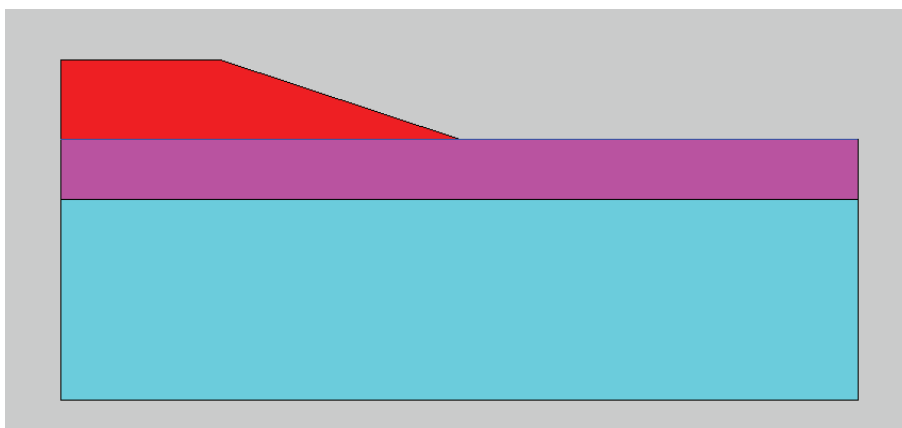


Fig. 6.6 – Geometria (problema 1 – TALUDES_Mv1)

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
22	30	5	5
32	30		
32	20		
22	20		

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	16	10	6	5
50	16	50	6	

Fig. 6.7 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 1 (problema1 – TALUDES_Mv1)

A figura 6.8 mostra os dados introduzidos relativos às características dos solos.

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	16	11	18	0
$\Phi(^{\circ})$	30	20	24	0
$c'(\text{kPa})$	1	5	2	0

Fig. 6.8 – Características dos estratos para a iteração 1 (problema1 –TALUDES_Mv1)

A superfície de rotura crítica obtida pelo TALUDES_Mv1 para o método de Correia e de Morgenstern-Price (função meio seno) foi a mesma e pode ser observada na figura 6.9. Os factores de segurança calculados são os mencionados no quadro 6.2. No anexo A encontra-se a informação lançada pelo TALUDES_Mv1 para o método de Correia.

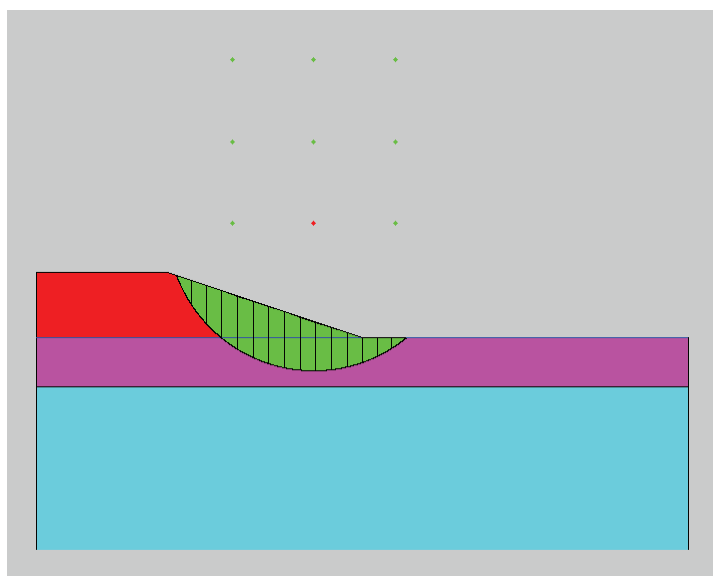


Fig. 6.9 – Superfície de deslizamento para a iteração 1 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

Quadro 6. 2 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 1) e Plaxis – problema 1

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	27	1.615	18.004	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	27	1.614	-	0.272
Plaxis	-	1.340	-	-

Os valores de FS obtidos com o TALUDES_Mv1 são significativamente diferentes do calculado pelo Plaxis (maiores, neste caso). Estreitando a malha de centros junto do ponto assinalado a vermelho na figura 6.9, poderão encontrar-se linhas de rotura que conduzam a FS menores que os observados. A nova análise contou com um crescimento da malha para baixo, uma vez que o centro da superfície crítica desenhada encontra-se na fronteira inferior da malha.

Introduzindo as coordenadas dos centros e rectas tangentes especificadas na figura 6.10, e realizando novo cálculo (iteração 2), obteve-se a superfície de deslizamento reproduzida na figura 6.11.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
20	23	2,5	1
30	23		
30	19		
20	19		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	16	10	8	4
50	16	50	8	

Fig. 6.10 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 2 (problema 1 –TALUDES_Mv1)

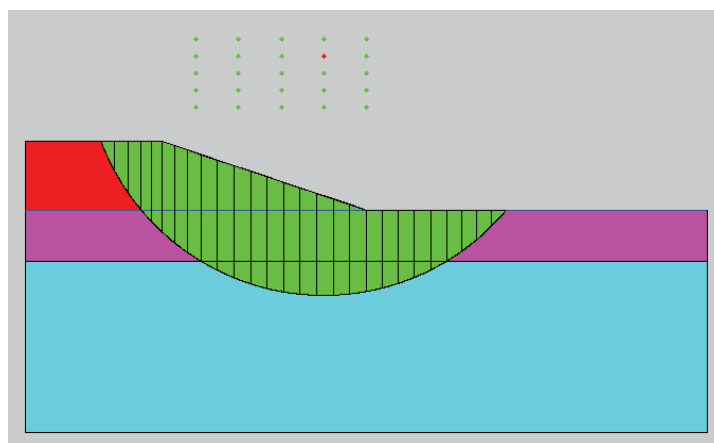


Fig. 6.11 – Superfície de deslizamento para a iteração 2 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

O quadro 6.3 mostra os factores de segurança obtidos.

Quadro 6. 3 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 2) e Plaxis – problema 1

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	75	1.567	41.592	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	75	1.567	-	0.165
Plaxis	-	1.340	-	-

Da observação do quadro 6.3, verifica-se que os valores de FS fornecidos pelo TALUDES_Mv1 ainda são relativamente elevados quando comparados com o do Plaxis. Foi necessário, por isso, proceder a novo estreitamento das malhas e iniciar um novo cálculo do factor de segurança.

Entrando no ficheiro de dados com os valores expressos na figura 6.12 e correndo novamente o TALUDES_Mv1 (iteração 3), obteve-se a superfície crítica reproduzida na figura 6.13.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
25	23	1	1
30	23		
30	19		
25	19		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	13	10	8	1
50	13	50	8	

Fig. 6.12 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

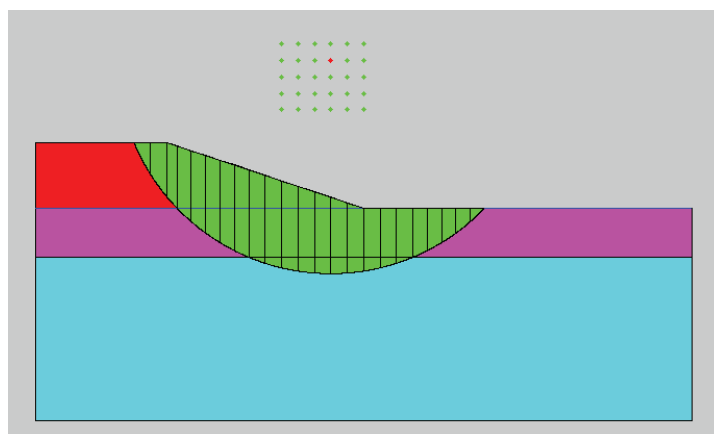


Fig. 6.13 – Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

O quadro 6.4 estabelece nova comparação entre factores de segurança.

Quadro 6.4 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 3) e Plaxis – problema 1

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	180	1.452	30.121	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	180	1.452	-	0.179
Plaxis	-	1.340	-	-

Os valores de FS calculados pelos dois métodos de equilíbrio limite estão agora mais próximos do obtido pelo programa comercial. No entanto, as condições de busca ainda podem ser melhoradas, pois pretende-se experimentar os métodos de equilíbrio limite ao máximo, ao ponto de se poder concluir a inexistência de uma outra superfície que conduza a um factor de segurança inferior.

Face ao exposto, diminuiu-se a altura e largura das quadrículas da malha de busca, aumentando o número de centros, e reduziram-se as dimensões exteriores do polígono que as circunscreve.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
26	23	0,2	0,2
29	23		
29	21		
26	21		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	11	10	9	0,2
50	11	50	9	

Fig. 6.14 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 4 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

Concomitantemente, definiu-se um incremento de raio diminuto e um novo valor para a largura máxima das fatias, que passaram a ser de 20 cm. A figura 6.14 apresenta as novas condições de busca.

Quadro 6.5 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 4) e Plaxis – problema 1

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	1936	1.423	25.625	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	1936	1.423	-	0.194
Plaxis	-	1.340	-	-

Realizado o cálculo de acordo com as considerações sustentadas (iteração 4) verifica-se a existência de uma superfície ainda mais crítica que a caracterizada anteriormente, comum aos dois métodos de equilíbrio limite utilizados e representada na figura 6.15. Os factores de segurança obtidos (figura 6.16) constam do quadro 6.5.

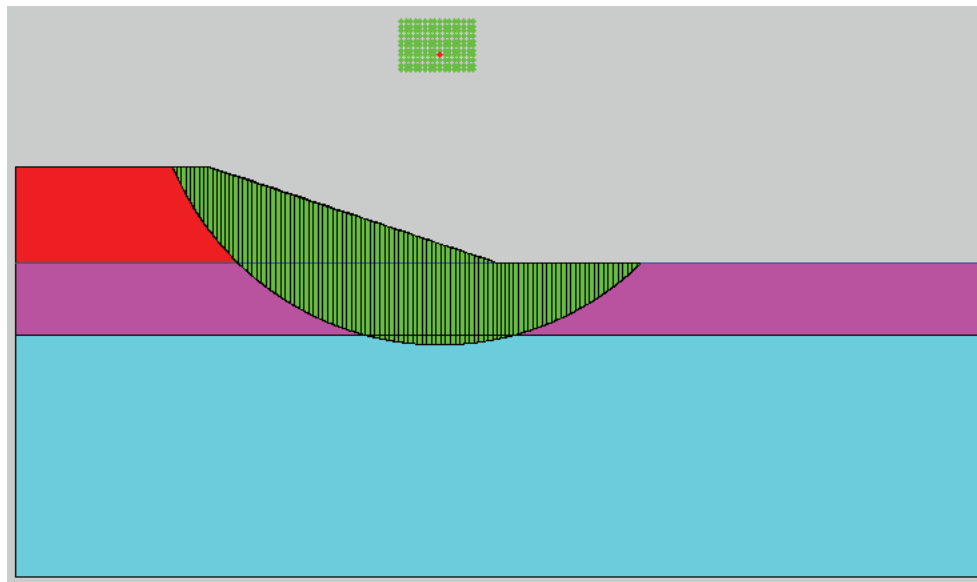


Fig. 6.15 – Superfície de deslizamento crítica para a iteração 4 (problema 1 – TALUDES_Mv1)

Esta última análise, além de conseguir uma maior aproximação entre os resultados de métodos de equilíbrio limite e Método dos Elementos Finitos, revela a eficiência do programa TALUDES_Mv1, que correu 1936 superfícies para cada método, dividindo a massa de solo em bastantes fatias (a massa correspondente à superfície crítica foi dividida em 101 fatias), em apenas 51,3 segundos.

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança mínimo obtido: 1.4227

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança mínimo obtido: 25.6251

Número de iterações realizadas: 8

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança mínimo obtido: 1.4231

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança mínimo obtido: -0.19437

Número de iterações realizadas: 13

Fig. 6.16 – Escrita do programa TALUDES_Mv1 no final do cálculo (problema 1)

Relativamente aos factores de segurança calculados, Correia e Morgenstern-Price conduzem a valores praticamente iguais (diferem apenas na quarta casa decimal). Comparando-os com o obtido pelo Plaxis, a diferença revela-se maior, no entanto, razoável. O TALUDES_Mv1 sobrestima o factor de segurança em 2,5% relativamente ao Plaxis, cujo valor de FS é mais conservativo. A diferença

observada pode dever-se a vários factores, nomeadamente às fases de cálculo consideradas no Plaxis que traduzem, indubitavelmente, um comportamento mais realista dos fenómenos que actuam sobre os solos. Outro factor que poderá estar na origem das diferenças observadas prende-se com o facto de se adoptarem superfícies circulares para o estudo de um talude não homogéneo. Observando a figura 6.3 percebe-se que a superfície de rotura não é circular, podendo existir, por isso, uma outra linha de rotura, com configuração curva mas não propriamente circular que conduza a um valor de FS menor.

A figura 6.17 permite visualizar as linhas de impulso correspondentes aos métodos de Correia e de Morgenstern-Price, podendo verificar-se que aquelas são praticamente coincidentes. Na figura 6.18 apresentam-se as forças normais e de corte entre fatias, assim como as reacções normal e tangencial na base das mesmas.

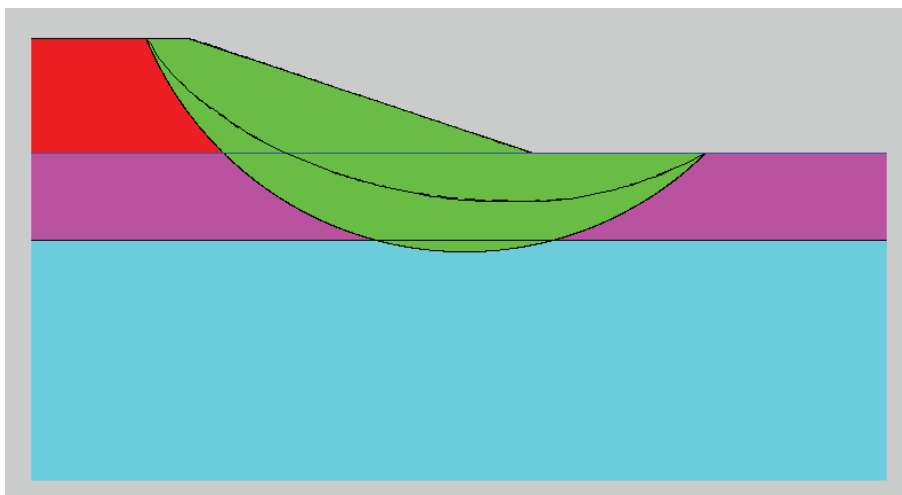


Fig. 6.17 – Sobreposição das linhas de impulso de Correia e Morgenstern-Price (problema 1 – TALUDES_Mv1)

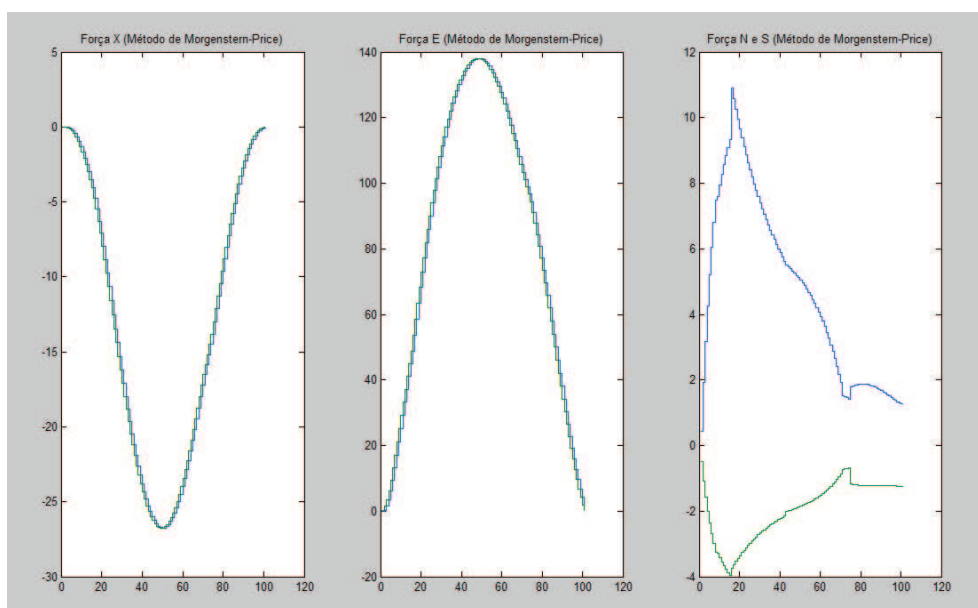


Fig. 6.18 – Força X, força E, força N' (azul) e força S (verde), respectivamente (problema 1 – TALUDES_MV1)

Ao longo deste processo de busca da superfície crítica verificou-se que o método de Morgenstern-Price não convergia quando determinadas superfícies eram desenhadas. A visualização das mesmas permitia concluir que aquelas não seriam de todas as linhas de rotura procuradas. No entanto, serve este pequeno comentário para chamar a atenção do leitor relativamente à definição das condições de busca, nomeadamente do posicionamento das tangentes que dão os raios mínimo e máximo, quando utiliza o programa TALUDES_MV1 ou outro similar.

Através da atribuição de diferentes secções ao longo da massa deslizante foi possível, no programa Plaxis, avaliar as forças resultantes normais e de corte ao longo daquelas. O procedimento adoptado é o apresentado na figura 6.19.

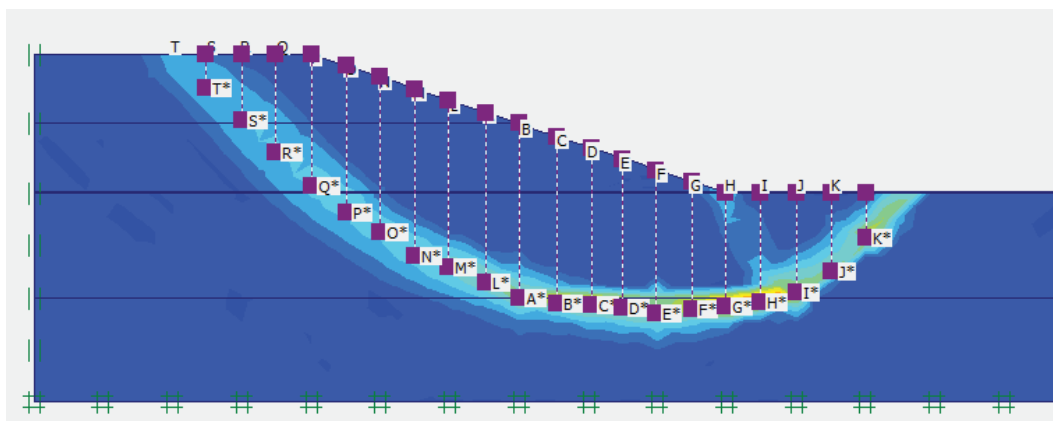


Fig. 6.19 – Divisão da massa deslizante em secções (problema 1 – Plaxis)

Procurou-se criar uma divisão de metro a metro ao longo da zona instável, a partir da imagem que dá a evolução das tensões de corte ao longo do maciço. Desta forma conseguiu-se definir com maior aproximação a superfície de deslizamento do Plaxis. Naturalmente que os dados obtidos para cada secção são aproximados, uma vez que, como a superfície de deslizamento não está definida com rigor, as secções foram mais ou menos prolongadas de acordo com o bom senso do autor.

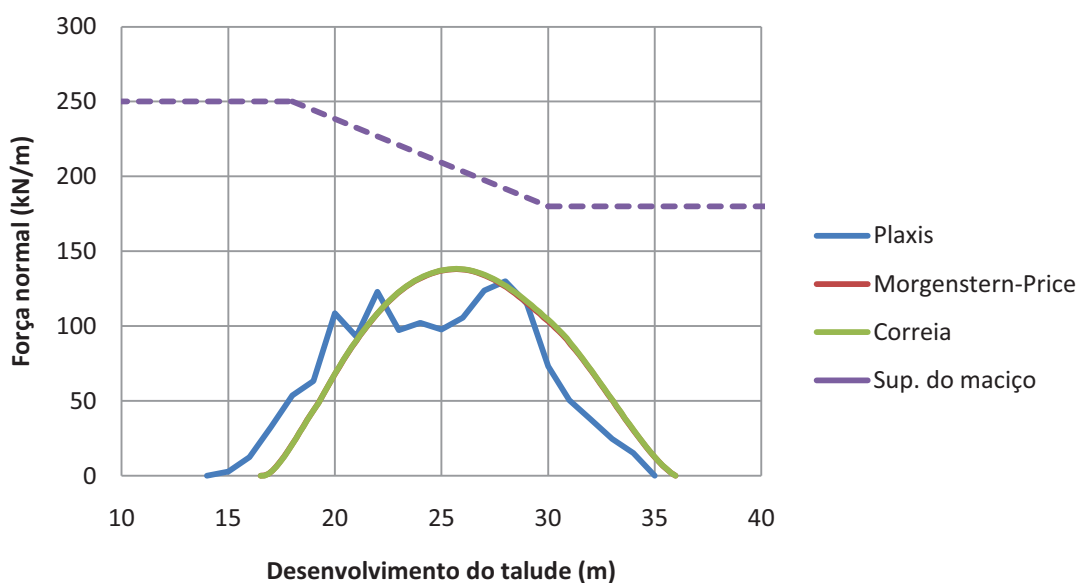


Fig. 6.20 – Distribuição da força normal E

Comparando os resultados obtidos pelo Plaxis e os fornecidos pelo TALUDES_Mv1 obtém-se o gráfico da figura 6.20, que mostra a evolução das forças normais ao longo do desenvolvimento da massa instável. Verifica-se que entre métodos de equilíbrio limite as forças são praticamente iguais (as curvas estão sobrepostas) e que, em certos troços da curva, os resultados são idênticos aos provenientes do cálculo por elementos finitos.

Apesar das irregularidades verificadas na curva obtida por MEF, o comportamento dos três gráficos é muito parecido, nomeadamente no que respeita à evolução das forças. A principal diferença está na magnitude das mesmas, especialmente entre as coordenadas $x=20\text{m}$ e $x=27\text{m}$.

Como as configurações das superfícies de deslizamento, fornecidas pelas duas metodologias usadas, são distintas, as respectivas curvas de forças encontram-se desfasadas da diferença entre amplitudes de desenvolvimento da massa instável. A distância entre pontos extremos da massa deslizante é relativamente maior no Plaxis do que no TALUDES_Mv1, o que, naturalmente, também contribui para a diferenças registadas entre as forças provenientes de cada uma das ferramentas.

É importante salientar que os resultados obtidos no Plaxis para as forças de interação são extrapolados a partir dos pontos de Gauss, conduzindo a valores por vezes irrealistas em determinadas zonas do maciço. Tal verificou-se várias vezes quando se procedia à definição das secções apresentadas na figura 6.19, em que o autor se viu forçado a introduzi-las ora mais à esquerda ora mais à direita dos pontos previamente definidos, de modo a obter valores coerentes com a evolução das forças dos dois lados da curva.

A figura 6.21 descreve a evolução das forças de corte calculadas no Plaxis e no TALUDES_Mv1.

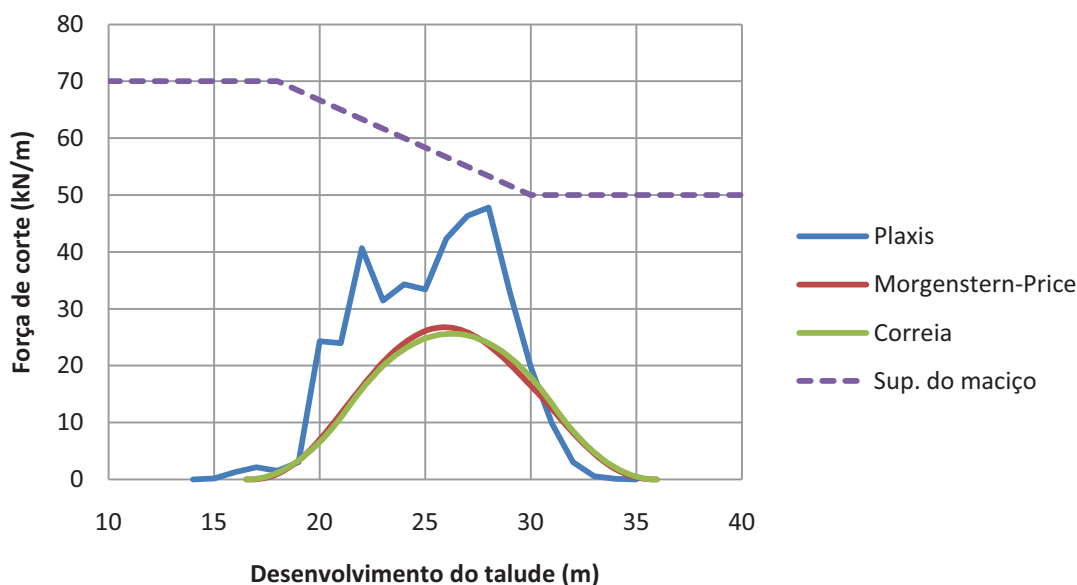


Fig. 6.21 – Distribuição da força tangencial X

Neste caso, apesar das três distribuições revelarem o mesmo comportamento, existe uma grande discrepância entre resultados provenientes de elementos finitos e equilíbrio limite, dado que os primeiros chegam a ser perto do dobro dos segundos a meio da massa instável. Tal significa que a taxa de variação das forças de corte é bem mais elevada na curva obtida pelo MEF.

Já os resultados fornecidos pelos métodos de Correia e Morgenstern-Price são muito semelhantes. As duas curvas quase se sobrepõem.

Da análise das duas figuras anteriores conclui-se que as distribuições de força normal e tangencial são idênticas para ambas as metodologias, embora a que resulta da análise pelo MEF assuma uma variação mais irregular. As diferenças entre a magnitude das forças de corte explicam-se, entre outros motivos, pelo facto de nos métodos de equilíbrio limite aquelas serem divididas pelo factor de segurança.

6.2.3.2. Problema 2

Conforme referido nos subcapítulos onde se explanaram os métodos de equilíbrio limite, quando o maciço em estudo é constituído por vários estratos, a superfície de deslizamento circular pode não ser a mais indicada para a realização da análise de estabilidade. No caso do problema 1, marcado pela constituição de 3 camadas diferentes, verificou-se que os factores de segurança avaliados pelo TALUDES_Mv1 eram significativamente diferentes do obtido com o Plaxis, embora dentro do intervalo expectável. Uma vez que o TALUDES_Mv1 permite adoptar para o cálculo de FS uma poligonal, procurou-se introduzir as coordenadas de uma linha segmentada que pudesse conduzir a uma factor de segurança mais próximo daquele que se obteve com o Plaxis.

Superfície de deslizamento	
Coordenadas	
xc	yc
15	17
17,7	15
19,6	13
22,7	10,8
25	9,9
28,1	9,6
30	9,9
32,1	11
34	12,3
34,8	13

Fig. 6.22 – Coordenadas da poligonal (problema 2 – TALUDES_Mv1)

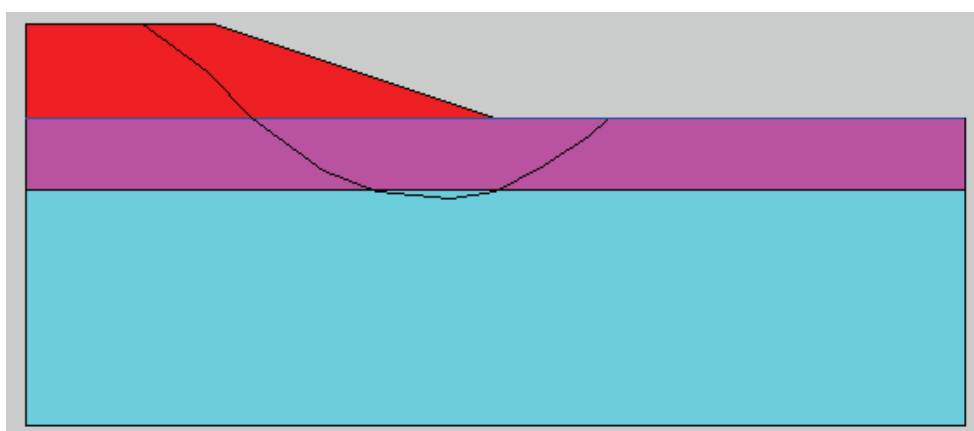


Fig. 6.23 – Superfície desenhada pelo TALUDES_Mv1 (problema 2)

As figuras 6.22 e 6.23 apresentam as coordenadas da poligonal considerada, menos inclinada na parte superior, e figura desenhada pelo TALUDES_Mv1, respectivamente.

O estudo da linha de rotura descrita conduziu a um factor de segurança igual a 1,4192 para o método de Correia e 1,4487 para o de Morgenstern-Price (figura 6.24). No entanto, analisando as linhas de impulso obtidas (figura 6.25), verificaram-se tracções no topo do talude. Optou-se então pela imposição de uma fenda de tracção e realização de novo cálculo.

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança obtido: 1.4192

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança: 20.8396

Número de iterações realizadas: 8

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança obtido: 1.4487

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: -0.19222

Número de iterações realizadas: 12

Fig. 6.24 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2)

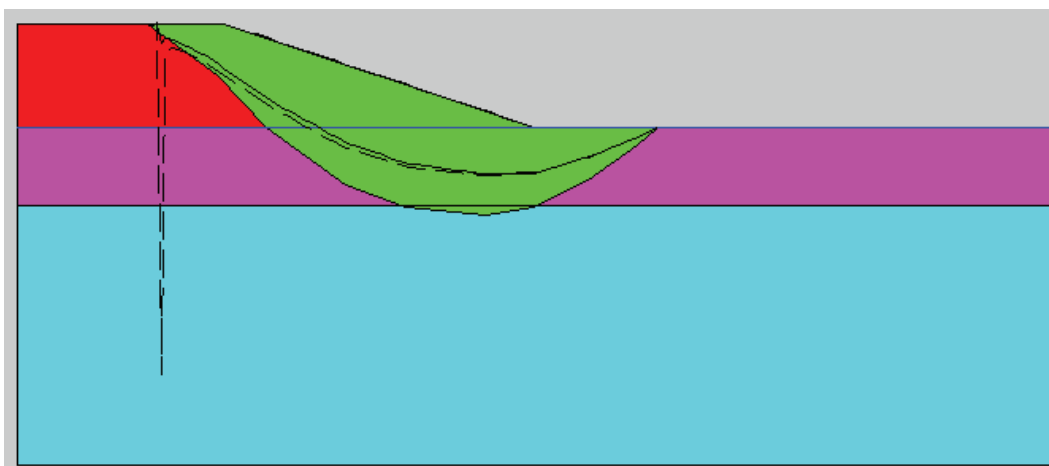


Fig. 6.25 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 2 – TALUDES_Mv1)

A fenda foi introduzida na coordenada $x=15,49$ e do cálculo resultaram os factores de segurança indicados na figura 6.26. Repare-se que, no caso do método de Correia, o valor de FS é inferior àquele que se obtém quando se considera a superfície de deslizamento circular. O método de Morgenstern-Price conduz, por outro lado, a valores superiores. Na figura 6.27 apresentam-se as linhas de impulso correspondentes.

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança obtido: 1.4209

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança: 22.5511

Número de iterações realizadas: 8

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança obtido: 1.445

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: -0.19794

Número de iterações realizadas: 13

Fig. 6.26 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2)

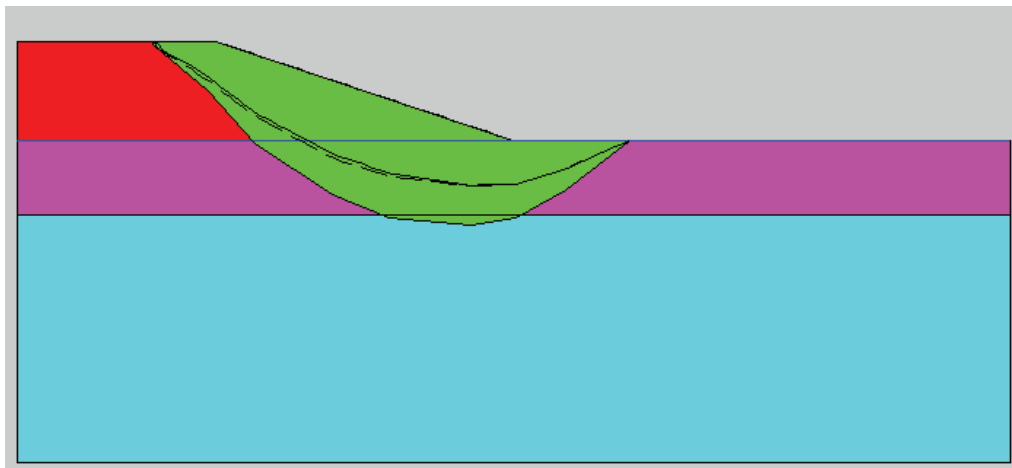


Fig. 6. 27 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 2 – TALUDES_Mv1)

O estudo efectuado mostra que a diferença entre os dois métodos de equilíbrio limite, em termos de factor de segurança, é maior quando se analisam superfícies de rotura poligonais, já que, até esta parte, em que apenas se estudaram superfícies circulares, os valores vinham a ser praticamente iguais.

O facto de se ter obtido um factor de segurança inferior para o método de Correia corrobora a ideia de que uma superfície poligonal, criteriosamente escolhida, pode, no caso de um talude não homogêneo, conduzir a um factor de segurança inferior ao que seria obtido com uma superfície circular.

O estudo da poligonal acima exposta permitiu, além do que já foi referido, distinguir a influência da coesão na instabilidade dos taludes. Se observarmos as características dos dois estratos inferiores, verificamos que os parâmetros resistentes atribuídos induzem a alguma incerteza no que respeita à magnitude das suas resistências. De facto, a argila tem ângulo de atrito e peso volúmico maiores que o da turfa, mas também uma coesão inferior. O que acontecerá se forem atribuídas às fatias definidas no último estrato as características da turfa em vez das da argila? O factor de segurança será maior ou menor do que o obtido? No sentido de avaliar o efeito da coesão e do ângulo de atrito na variação de

FS, realizaram-se dois cálculos fazendo variar as características do último estrato. No primeiro, foram atribuídas à camada inferior o ângulo de atrito e coesão da turfa, mantendo-se apenas o peso volúmico. No segundo, mantiveram-se a coesão e o peso volúmico da argila mas alterou-se o ângulo de atrito, que passou a assumir o mesmo valor que o da turfa ($c'=20^\circ$). Os resultados obtidos são os a seguir apresentados:

- Estrato inferior com $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, $c'=5 \text{ kPa}$ e $\phi'=20^\circ$

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança obtido: 1.4666

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança: 23.7281

Número de iterações realizadas: 8

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança obtido: 1.4907

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: -0.20429

Número de iterações realizadas: 13

Fig. 6.28 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2)

- Estrato inferior com $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, $c'=2 \text{ kPa}$ e $\phi'=20^\circ$

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança obtido: 1.3669

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança: 21.0725

Número de iterações realizadas: 7

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança obtido: 1.3896

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: -0.18849

Número de iterações realizadas: 13

Fig. 6.29 - Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 2)

A análise dos resultados patentes nas figuras 6.28 e 6.29 permite concluir que a redução da coesão induz uma quebra no factor de segurança. A aparente inferioridade, em termos de resistência, do segundo estrato não se verifica devido à sua significativa coesão, obtendo-se factores de segurança maiores quando a camada inferior assume as características da turfa em vez da argila. De facto, como

o peso volumico é pequeno, a sua contribuição para o aumento da reacção normal será menor do que a influência da coesão nas forças de corte.

Por outro lado, demonstra-se a influência do ângulo de atrito para a estabilidade do talude. Usando, por exemplo, o método de Morgenstern-Price, o factor de segurança calculado passa de 1,3896 para 1,445 quando o ângulo de atrito aumenta de 20° para 24° , respectivamente.

6.2.3.3. Problema 3

Com a presente análise pretende-se avaliar os resultados fornecidos pelo TALUDES_Mv1 e Plaxis para um maciço homogéneo na presença de nível freático. Assim, considerou-se o talude apresentado no subcapítulo anterior, assumindo que todo o solo constituinte é argila. As suas características são as descritas no quadro 6.1. A malha introduzida foi a designada no software por “fina” em detrimento da “média”, para tirar partido das suas capacidades, e considerou-se uma única fase de cálculo. O nível freático é constante e encontra-se à mesma cota do pé do talude. A figura 6.30 apresenta o maciço analisado.

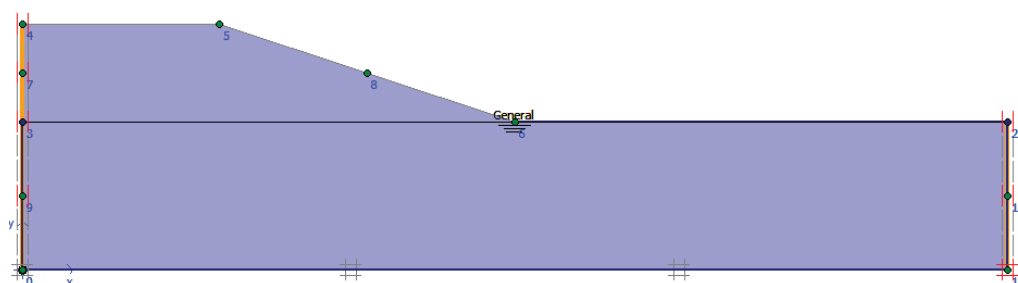


Fig. 6.30 – Maciço em estudo (problema 3 – Plaxis)

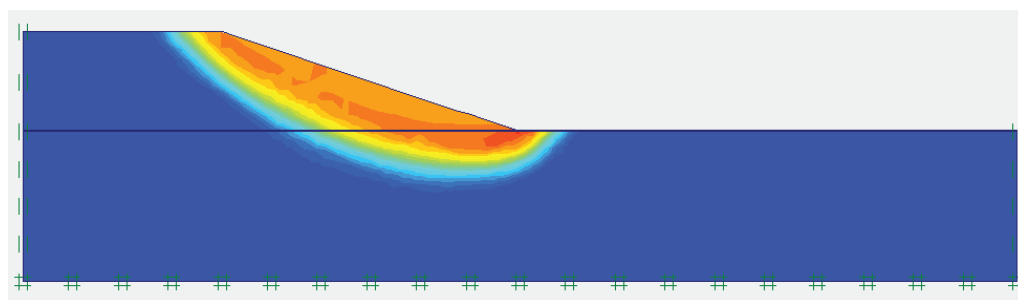


Fig. 6.31 – Superfície de deslizamento (problema 3 – Plaxis)

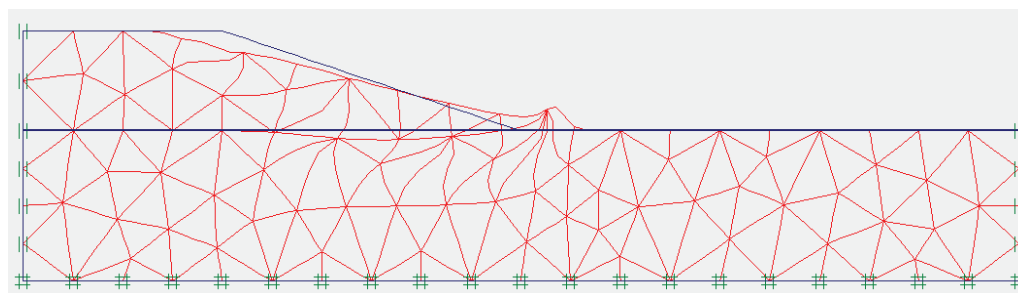


Fig. 6.32 – Deformação da malha (problema 3 – Plaxis)

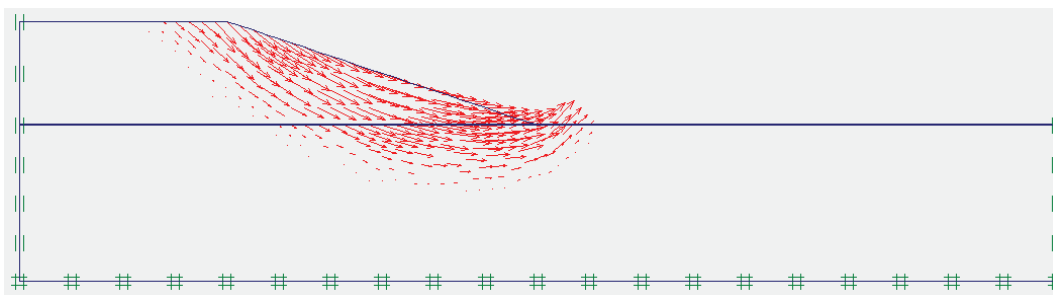


Fig. 6.33 – Vectores deslocamento (problema 3 – Plaxis)

Efectuado o cálculo obteve-se a massa deslizando representada na figura 6.31, em que o factor de segurança vale 1,516. As figuras 6.32 e 6.33 mostram a deformação da malha e os vectores deslocamento associados ao movimento da massa instável.

O mesmo estudo com o TALUDES_Mv1 conduziu, ao fim de 3751 superfícies analisadas, à representada na figura 6.34, tanto para o método de Correia como para o de Morgenstern-Price, com um factor de segurança igual a 1,789 para ambos quando arredondado à terceira casa decimal.

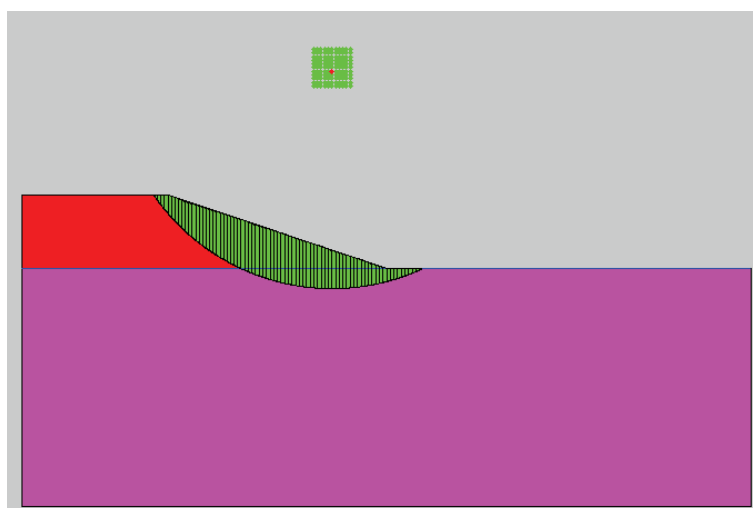


Fig. 6.34 – Superfície de deslizamento (problema 3 – TALUDES_Mv1)

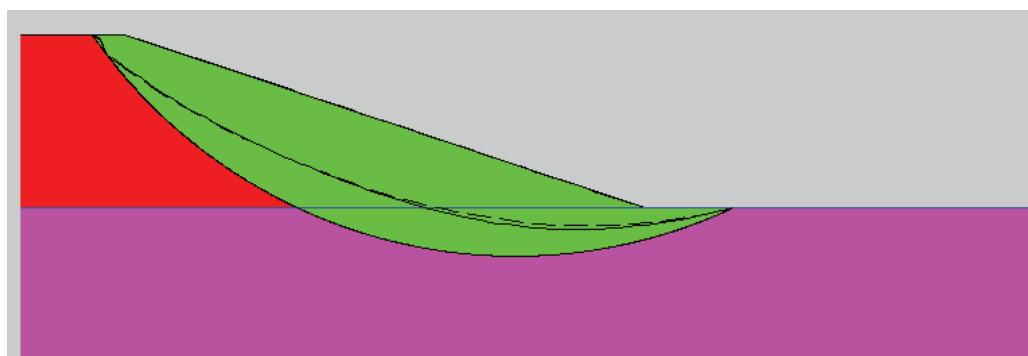


Fig. 6.35 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 3 – TALUDES_Mv1) – tracções no topo do talude

Os valores de FS calculados são mais elevados que o do Plaxis em cerca de 15,3%, o que já se torna uma diferença significativa. No entanto, observando as linhas de impulso obtidas (figura 6.35) verificou-se a existência de perturbações no topo do talude. Da análise do ficheiro de dados constatou-se a existência de tracções nessa zona. Procedeu-se, então, a um novo cálculo de FS para a superfície esquematizada mas introduzindo uma fenda de tracção na coordenada $x=17,3$ (junto da primeira divisão de fatias onde as tracções se haviam verificado). As figuras 6.36 e 6.37 apresentam os factores de segurança obtidos e as respectivas linhas de impulso, agora sem qualquer perturbação.

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança obtido: 1.7882

Valor de $X_{\max}$ correspondente ao Factor de Segurança: 13.5767

Número de iterações realizadas: 7

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança obtido: 1.7874

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança: -0.30926

Número de iterações realizadas: 8

Fig. 6.36 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após introdução de fenda de tracção (problema 3)

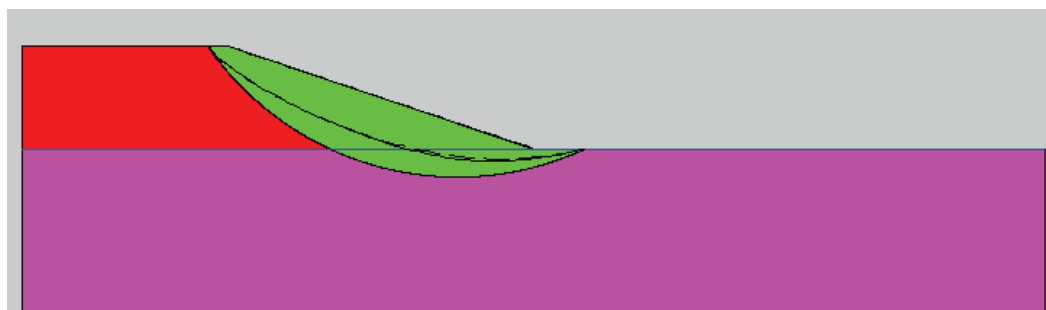


Fig. 6.37 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 3 – TALUDES_Mv1)

O quadro 6.6 faz a síntese dos resultados obtidos para o problema 3.

Quadro 6.6 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Plaxis – problema 3

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\max}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	3751	1.788	13.577	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	3751	1.787	-	0.309
Plaxis	-	1.516	-	-

A diferença verificada entre factores de segurança obtidos pelo TALUDES_Mv1 é irrisória. Já entre TALUDES_Mv1 e Plaxis o caso é notoriamente distinto: a diferença observada atinge os 15,2%.

6.2.3.4. Problema 4

O problema 4 prende-se com a avaliação do factor de segurança do maciço representado na figura 6.1 assumindo que não existe nível freático. Embora seja unânime a ideia de que o factor de segurança deva aumentar, com este tipo de análise poderá avaliar-se a magnitude dessa variação e perceber a sensibilidade dos métodos de equilíbrio limite à presença de água num maciço heterogéneo.

A modelação no Plaxis compreendeu as mesmas fases que haviam sido consideradas no problema 1. As figuras 6.38, 6.39 e 6.40 mostram, respectivamente, a superfície de deslizamento, os vectores deslocamento associados à massa instável e a malha de cálculo deformada.

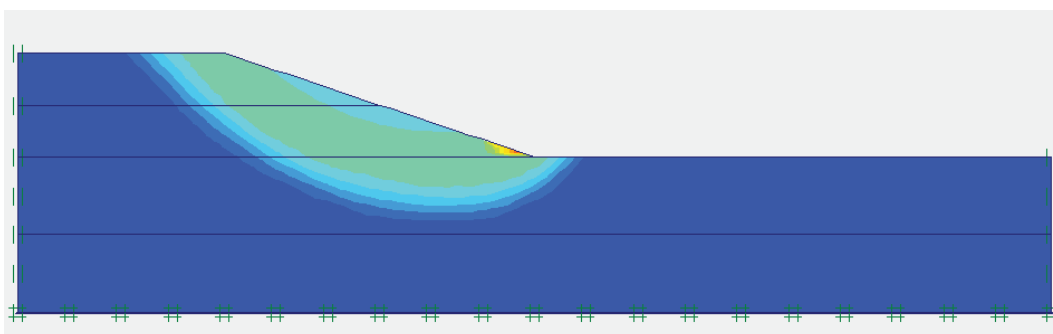


Fig. 6.38 – Superfície de deslizamento (problema 4 – Plaxis)

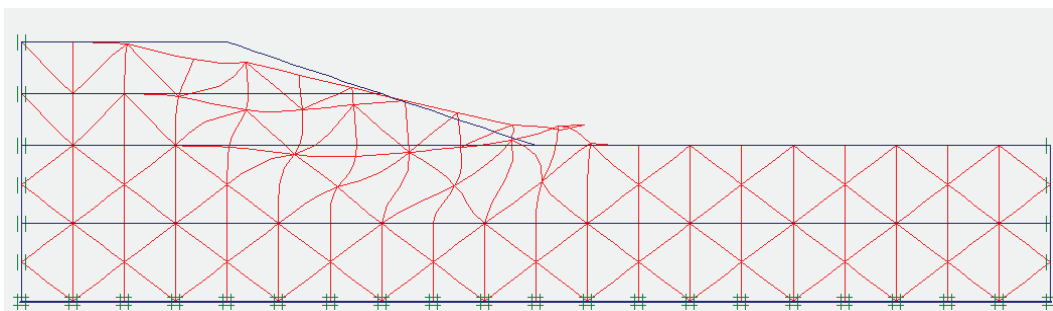


Fig. 6.39 – Deformação da malha (problema 4 – Plaxis)

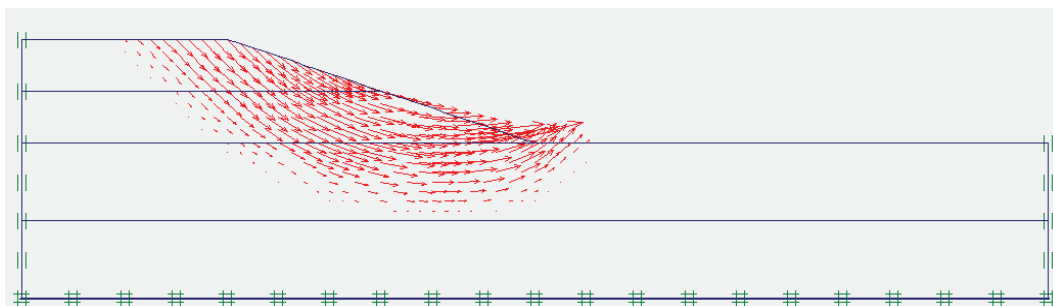


Fig. 6.40 – Vectores deslocamento (problema 4 – Plaxis)

O factor de segurança obtido vale 1,889. Comparando com o calculado no problema 1 a diferença é de 41%.

Efectuada a mesma análise com o TALUDES_Mv1, obtiveram-se os factores de segurança indicados na figura 6.41. A superfície de deslizamento correspondente a cada valor de FS é a mesma para os dois métodos e está representada na figura 6.42.

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança mínimo obtido: 2.0097

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança mínimo obtido: 19.371

Número de iterações realizadas: 7

MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:

Factor de Segurança mínimo obtido: 2.0081

Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança mínimo obtido: -0.31258

Número de iterações realizadas: 9

Fig. 6.41 – Escrita fornecida pelo TALUDES_Mv1 após o cálculo de FS (problema 4)

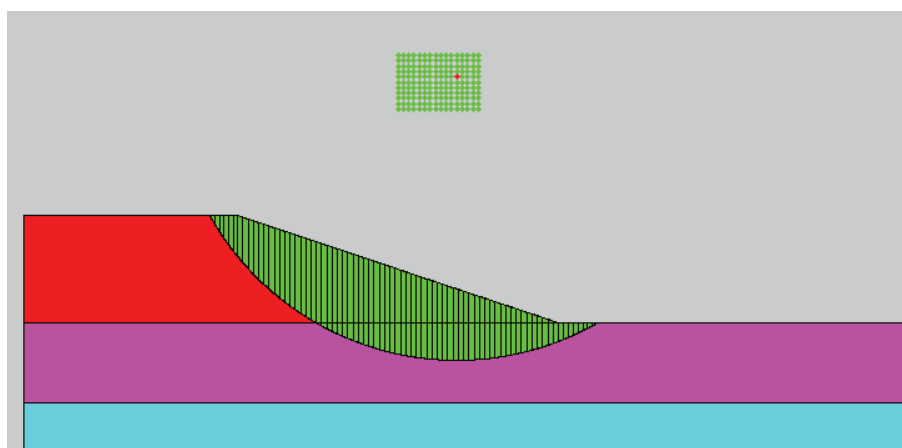


Fig. 6.42 – Superfície de deslizamento (problema 4 – TALUDES_Mv1)



Fig. 6.43 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 4 – TALUDES_Mv1)

Na figura 6.43 mostram-se as linhas de impulso para cada um dos métodos. Não apresentam qualquer perturbação e são muito próximas, o que também explica a proximidade dos factores de segurança.

O quadro 6.7 faz uma síntese dos valores agora obtidos.

Quadro 6.7 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Plaxis – problema 4

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	2816	2.010	19.371	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	2816	2.008	-	0.313
Plaxis	-	1.889	-	-

Comparando o maior dos valores de FS obtido quer no problema 1 quer na presente análise verifica-se uma diferença de 41,2%, praticamente igual à aferida entre os cálculos pelo MEF.

A diferença entre métodos de equilíbrio limite e Método de Elementos Finitos, neste problema 4, considerando o maior dos valores obtidos para a primeira metodologia citada, é de 6,0%.

6.3. CASO DE ESTUDO 2

6.3.1. GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

O segundo caso de estudo corresponde ao exemplo extraído de um dos tutoriais do Phase2, cuja geometria se apresenta na figura 6.44.

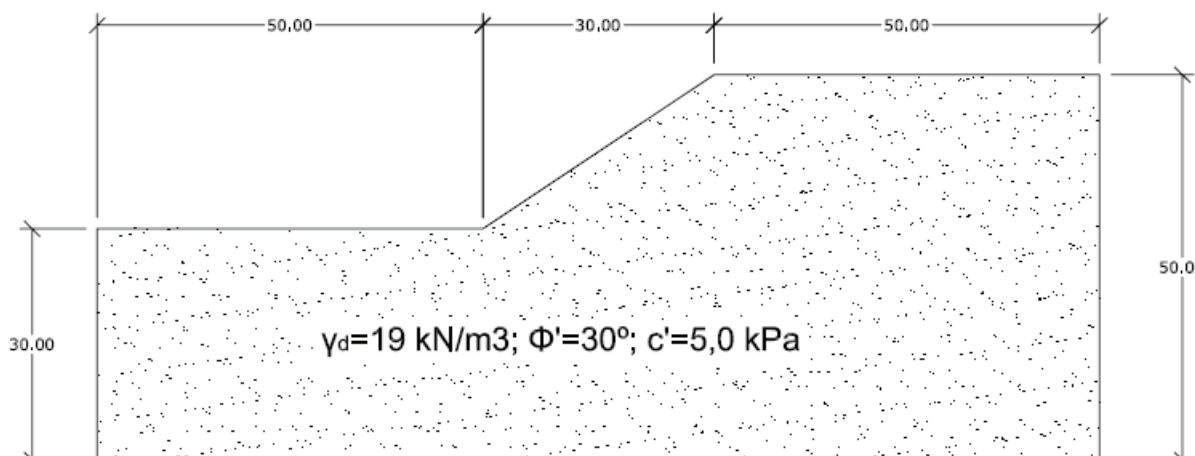


Fig. 6.44 – Caso de estudo 2

Trata-se de um talude homogêneo, que varia entre os 30m e os 50m de altura, constituído por um maciço terroso, com comportamento drenado, e ao qual são atribuídas as seguintes características:

- peso volúmico: 19 kN/m³;
- módulo de Young: 50000 kPa;
- coeficiente de Poisson: 0.4;
- coesão: 5kPa;
- ângulo de atrito: 30°.

6.3.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

O caso de estudo 2 será analisado pelo software Phase2 e TALUDES_Mv1. Através de pequenas variantes ao exemplo apresentado na figura 6.44 efectuar-se-ão estudos paramétricos entre o MEF e os métodos de equilíbrio limite. Assim, teremos:

- problema 5: talude representado na figura 6.44;
- problema 6: mesmas características do problema 6 com inclusão das forças sísmicas;
- problema 7: mesmas características do problema 6 com inclusão do nível freático;
- problema 8: mesmas características do problema 7, considerando dois estratos e forças sísmicas.

6.3.3. APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

6.3.3.1. Problema 5

A figura 6.45 mostra o talude referido em 6.3.1 modelado no programa Phase2.

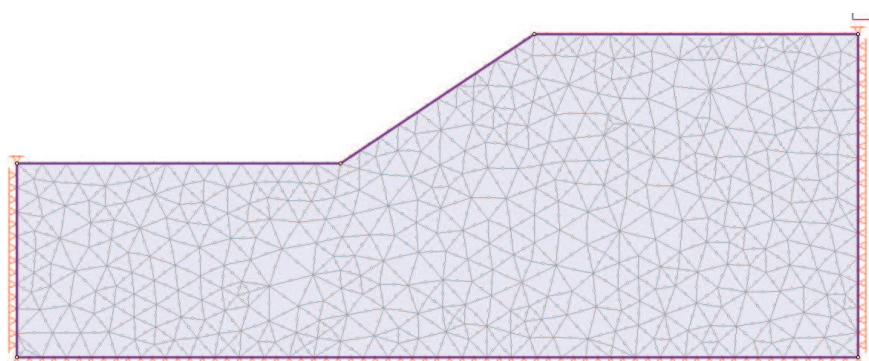


Fig. 6.45 – Geometria (problema 5 – Phase2)

O exemplo proposto pelo tutorial 8 do Phase2 é constituído por um único solo, drenado, sujeito à acção da gravidade, e modelado por uma malha de elementos finitos com aproximadamente 800 elementos triangulares, de 6 nós cada. O critério de rotura utilizado é o de Mohr-Coulomb.

Efectuado o cálculo no Phase2, obtém-se a superfície de rotura indicada na figura 6.46 , à qual corresponde um factor de segurança de 1,16.

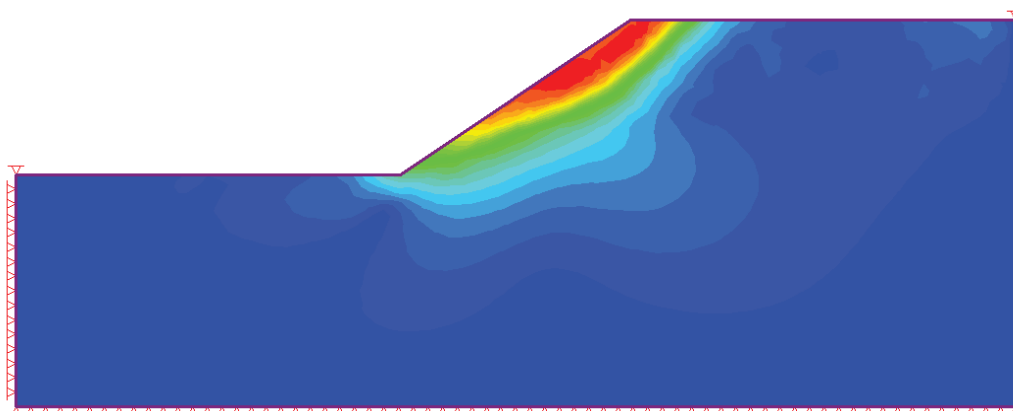


Fig. 6.46 – Superfície de deslizamento (problema 5 – Phase2)

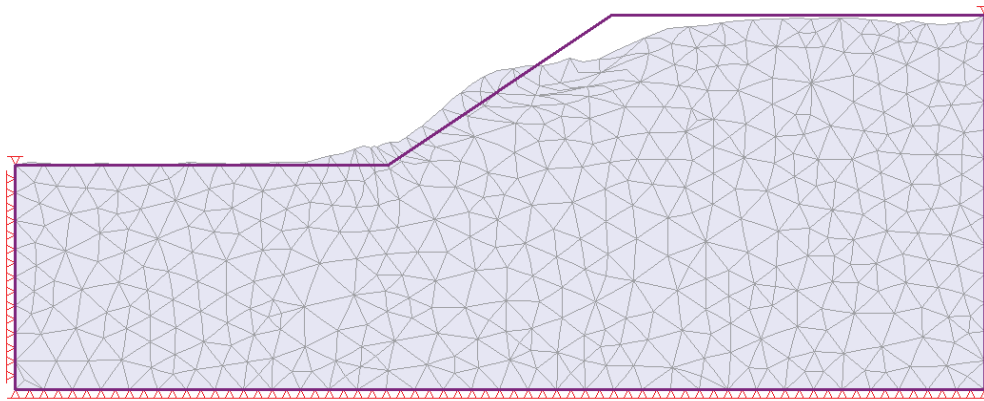


Fig. 6.47 – Deformação da malha (problema 5 – Phase2)

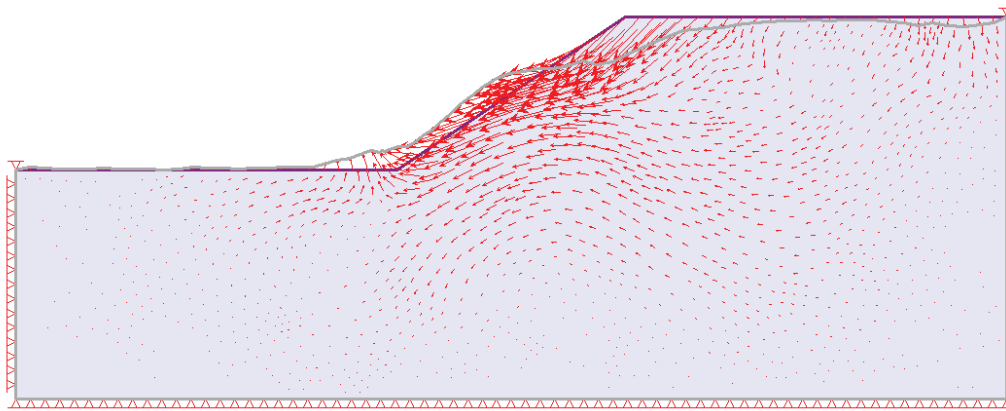


Fig. 6.48 – Vectors deslocamento e deformação da superfície (problema 5 – Phase2)

As figuras 6.47 e 6.48 apresentam a deformação da malha e os vectores deslocamento associados à massa instável. Verifica-se que a superfície crítica passa acima do pé do talude envolvendo, no plano, uma área de solo não muito significativa.

Introduzindo esta mesma geometria no TALUDES_Mv1, o programa reproduziu uma figura para o utilizador com a apresentação do maciço (figura 6.49).

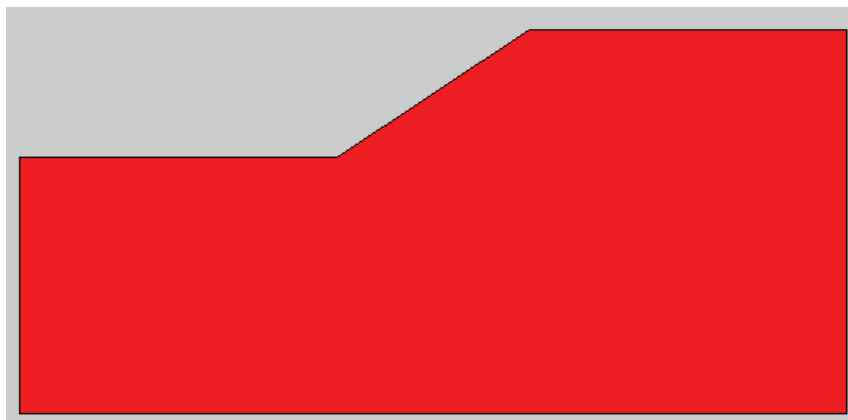


Fig. 6.49 – Geometria do talude (problema 5 – TALUDES_Mv1)

O processo de obtenção do factor de segurança mínimo foi o mesmo que se utilizou para a comparação dos resultados obtidos pelo Plaxis com os do TALUDES_Mv1, obrigando, por isso, a várias iterações, correspondentes a cada novo cálculo.

Uma vez que a superfície de rotura obtida no Phase2 passa acima do pé do talude, as tangentes que fornecem o raio mínimo e máximo podem ser definidas próximas dessa mesma cota. Por hipótese, as coordenadas da malha de centros foram as apresentadas na figura 6.50. Nesta primeira iteração, a largura máxima das fatias vale 1m.

As superfícies de deslizamento obtidas pelo TALUDES_Mv1 que conduzem ao menor valor de FS são as mesmas para o método de Correia e Morgenstern-Price (função meio seno). Na figura 6.51 apresenta-se a linha de rotura referida e a divisão em fatias efectuada.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
x _c	y _c	eixo x	eixo y
65	96	10	10
85	96		
85	76		
65	76		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
x _r	y _r	x _r	y _r	Δr
10	58	10	40	9
140	58	140	40	

Fig. 6.50 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 1 (problema 5 – TALUDES_Mv1)

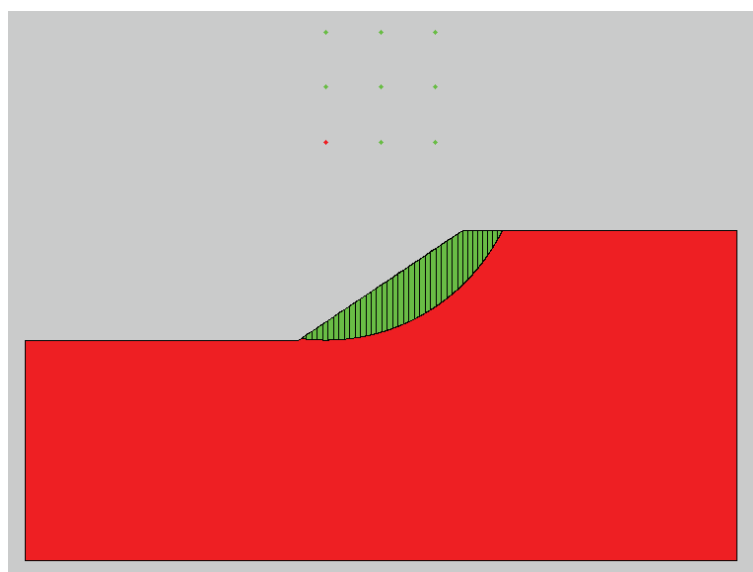


Fig. 6.51 – Superfície de deslizamento para a iteração 1 (problema 5 – TALUDES_Mv1)

O quadro 6.8 faz uma síntese dos factores de segurança calculados.

Quadro 6.8 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 1) e Phase2 – problema 5

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	27	1.341	307.570	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	27	1.340	-	0.587
Phase2	-	1.160	-	-

Face à acentuada diferença entre resultados provenientes de elementos finitos e métodos de equilíbrio, fez-se novo cálculo (iteração 2) com o TALUDES_Mv1, procurando estreitar as condições de busca.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
60	90	5	5
80	90		
80	70		
60	70		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	58	10	40	3
140	58	140	40	

Fig. 6.52 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 2 (problema 5 – TALUDES_Mv1)

Tendo em conta que o centro da superfície crítica obtida anteriormente se situa no vértice da malha de centros, deslocou-se o polígono que a circunscreve para baixo e para a esquerda. Os raios mínimo e máximo permanecem os mesmos mas o incremento passou de 9m para 3m. A figura 6.52 mostra as alterações introduzidas no ficheiro de dados.

Realizado o cálculo, o programa lançou a figura 6.53, definindo a superfície crítica encontrada, e que continua a ser a mesma para os dois métodos implementados.

O quadro 6.9 apresenta os novos factores de segurança calculados.

Quadro 6.9 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 2) e Phase2 – problema 5

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{\text{máx}}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	175	1.177	78.766	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	175	1.177	-	0.713
Phase2	-	1.160	-	-

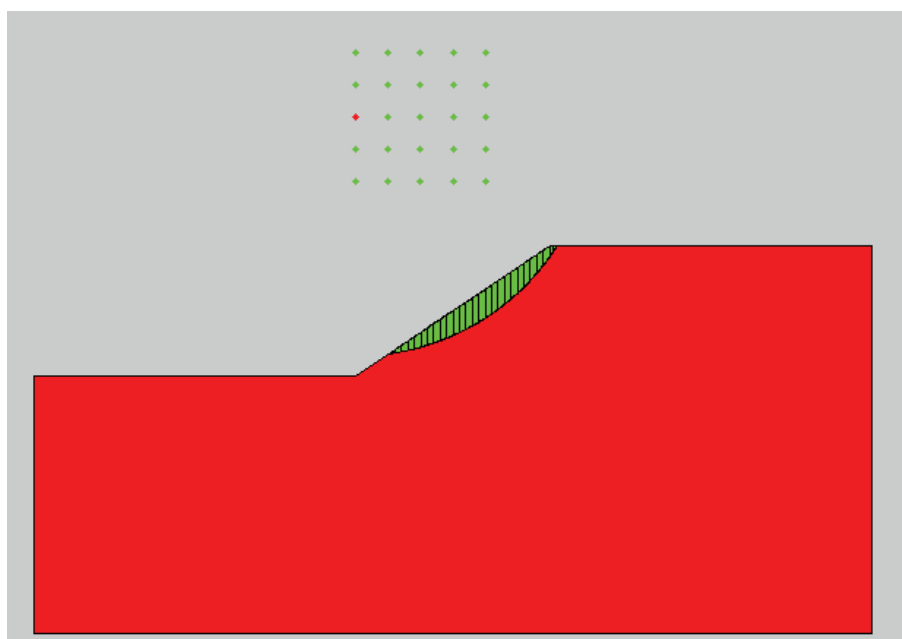


Fig. 6.53 – Superfície de deslizamento para a iteração 2 (problema 5 – TALUDES_Mv1)

Os factores de segurança obtidos são já bastante próximos do que resultou do cálculo no Phase2, e praticamente iguais entre si, diferenciando-se apenas na terceira casa decimal, o que, com o arredondamento efectuado, se torna imperceptível.

Uma vez que as alterações efectuadas em termos de “inputs” resultam num cálculo ainda muito abrangente, estreitaram-se as quadrículas da malha de centros e o incremento dos raios para, com a análise de mais superfícies, procurar obter uma outra que conduza a um valor de FS ainda menor que o apresentado para os dois métodos de equilíbrio limite. Assim, procedeu-se à entrada dos dados apresentados na figura 6.54 e iniciou-se um novo cálculo do factor de segurança.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
51	89	0,5	0,5
55	89		
55	85		
51	85		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	44	10	40	0,4
140	44	140	40	

Fig. 6.54 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1)

As linhas de rotura obtidas para cada método de equilíbrio limite são distintas e estão representadas nas figuras 6.55 e 6.56.

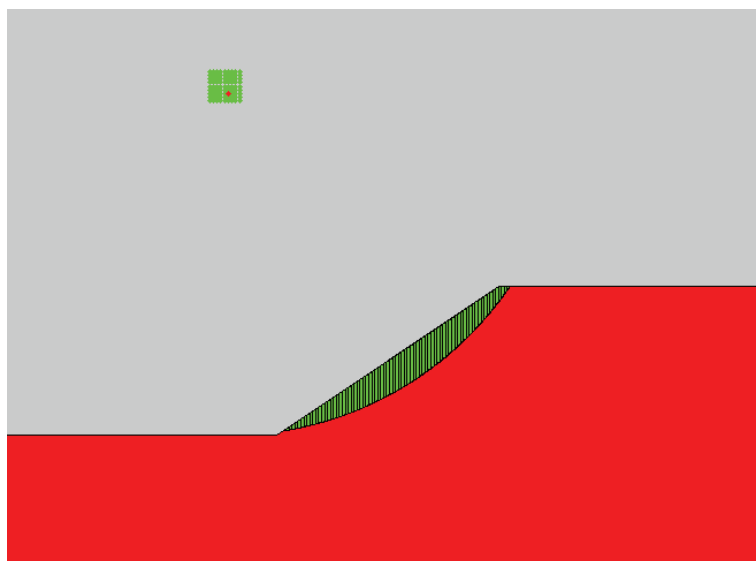


Fig. 6.55 – Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1 – método de Correia)

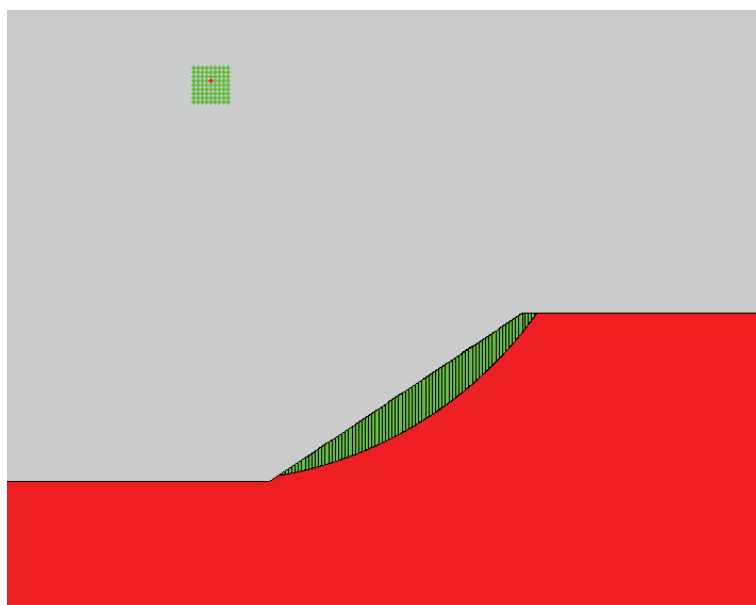


Fig. 6.56 - Superfície de deslizamento para a iteração 3 (problema 5 – TALUDES_Mv1 – método de Morgenstern-Price)

O programa analisou 891 superfícies e encontrou, de facto, um factor de segurança menor que os até esta parte calculados (1,145 para ambos os métodos). A diferença entre valores de FS obtidos por equilíbrio limite e MEF continua muito pequena. Repare-se como, para um solo homogéneo, a aproximação entre os mesmos se torna maior!

O cálculo anterior foi realizado considerando fatias com a largura máxima de 1m. No sentido de avaliar a influência dessa mesma largura no cálculo de FS, procedeu-se a uma nova iteração com os dados anteriormente utilizados, mas impondo divisões de 20cm em 20cm, no máximo.

Finalizado o cálculo, verificou-se que o factor de segurança não se alterou, continuando a valer 1,145 para os dois métodos, o que prova a pouca influência da largura das fatias na optimização dos resultados.

A observação das linhas de impulso correspondentes (figura 6.57 e 6.58) permitiu verificar a existência de tracções no topo do talude. Assim, procedeu-se à realização de um novo cálculo com introdução de uma fenda de tracção na coordenada $x=90,4$, para ambas as superfícies, utilizando a rotina relativa à análise de uma superfície circular específica.

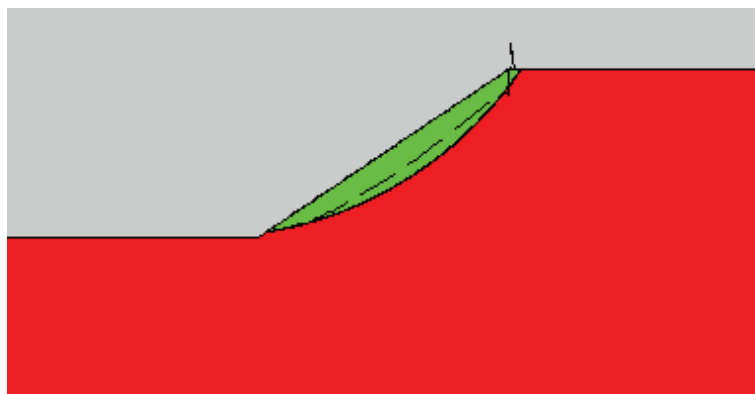


Fig. 6.57 – Linha de impulso pelo método de Correia (problema 5 – TALUDES_Mv1)

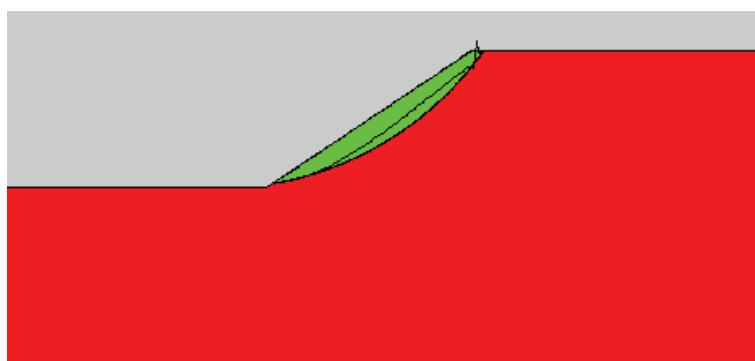


Fig. 6.58 - Linha de impulso pelo método de Morgenstern-Price (problema 5 – TALUDES_Mv1)

Os resultados obtidos são os indicados no quadro 6.10.

Quadro 6.10 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 (iteração 3) e Phase2 – problema 5

Programa	Nº de sup.	FS	$X_{máx}$	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	891	1.145	104.245	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	891	1.147	-	0.733
Phase2	-	1.160	-	-

Analisando as linhas de impulso resultantes e os respectivos ficheiros de dados, confirmou-se a anulação das tracções antes verificadas.

Ao contrário do que tem vindo a ser observado nas análises realizadas, os resultados de FS para este problema 5 são inferiores aos determinados por MEF, registando-se uma diferença de 1,1% em relação ao valor obtido pelo método de Correia. Por outro lado, essa mesma diferença é a menor de todas as aferidas até esta parte, o que era já esperado, uma vez que se trata de um talude homogéneo e sem água.

Tendo em conta que todos os casos estudados foram modelados com o Plaxis, introduziu-se esta geometria nesse programa para posterior comparação com o Phase2. A envolvente de rotura obtida é a representada na figura 6.59 e o factor de segurança vale 1,176.

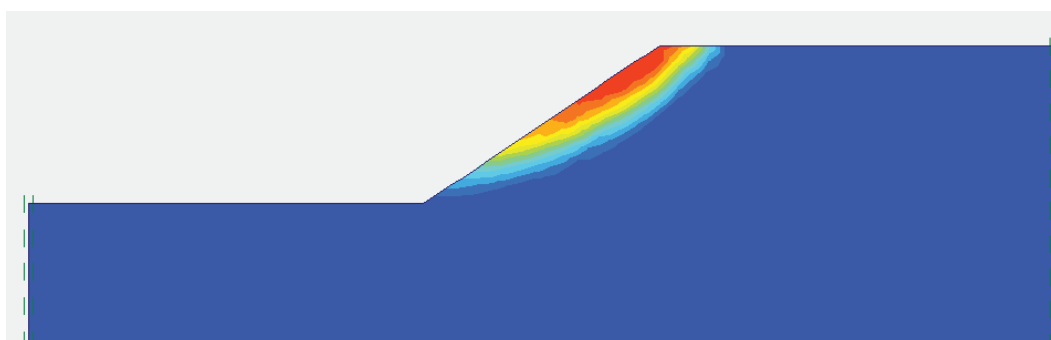


Fig. 6.59 - Superfície de deslizamento (problema 5 – Plaxis)

Confirma-se desta forma que, para este tipo de problemas, os factores de segurança obtidos pelos métodos de equilíbrio limite estão abaixo dos que resultam do cálculo por elementos finitos, ao contrário do até agora verificado. Por outro lado, a diferença entre o valor de FS calculado pelo Plaxis e o Phase2 (1,4%) é praticamente a mesma que existe entre o Phase2 e os métodos de equilíbrio limite (1,3%).

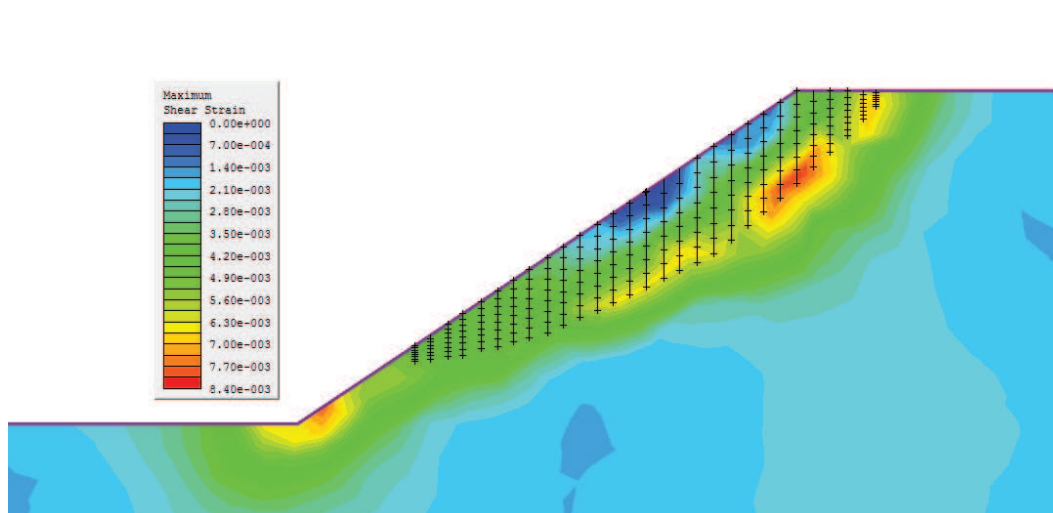


Fig. 6.60 – Divisão da massa deslizante em secções (problema 5 – Phase2)

No sentido de avaliar as forças resultantes normais e de corte ao longo da massa instável, dada pelos diferentes métodos de cálculo, construíram-se os gráficos das figuras 6.61 e 6.62 onde estão representadas as forças normais e tangenciais de interação. No Phase2, estas forças foram obtidas traçando as secções indicadas na figura 6.60 e posterior cálculo da resultante das forças distribuídas ao longo das mesmas. Como a superfície de deslizamento não se encontra rigorosamente definida, traçaram-se as secções tendo como referência a ilustração que fornece as máximas tensões de corte, prolongando cada divisão até à cor que representa a força máxima, tal como já havia sido feito na análise com o Plaxis para o problema 1.

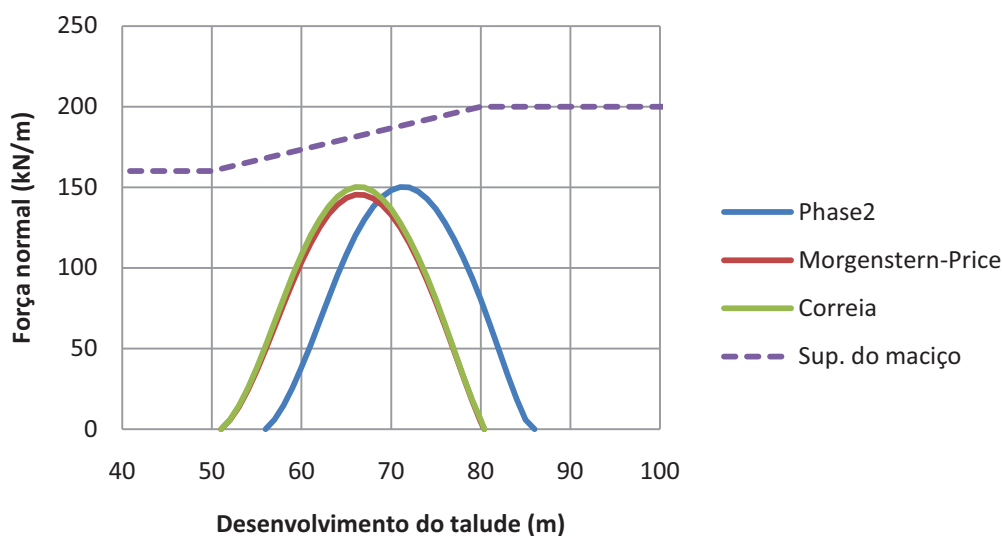


Fig. 6.61 – Distribuição da força normal E (problema 5)

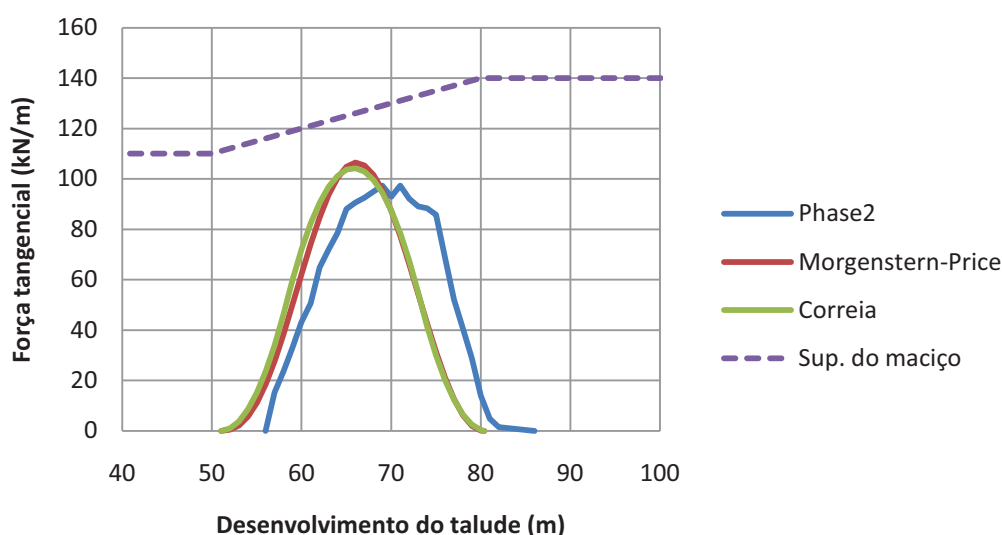


Fig. 6.62 – Distribuição da força tangencial X (problema 5)

As distribuições obtidas são muito próximas umas das outras, mesmo as que resultam do Phase2 com as provenientes dos métodos de equilíbrio limite. O desfasamento das curvas deve-se à consideração de diferentes linhas de rotura, em que os pontos iniciais e finais são distintos. Ao contrário do que se verificara com o Plaxis, a obtenção das forças de interacção com o Phase2 permite a construção de uma curva mais regular. Tal poderá ter a ver com o algoritmo de cálculo do programa, que, como se viu no capítulo 5, é relativamente diferente do implementado no Plaxis. Tal como os métodos de Correia e de Morgenstern-Price, também o Phase2 considera o factor de segurança como o rácio entre a resistência mobilizável e a resistência mobilizada.

Uma vez que a modelação também foi realizada no Plaxis, aplicou-se uma divisão da massa de solo idêntica à que foi introduzida no Phase2. Os resultados obtidos para as forças de interacção mostram o mesmo comportamento verificado na curva obtida para o problema 1, ou seja, muito irregular e com valores mais altos do que os de Correia e Morgenstern-Price no caso das forças tangenciais.

Pode-se concluir, assim, que, no caso de um talude homogéneo, as forças de interacção fornecidas pelo TALUDES_Mv1, com as funções “sino” e meio seno para o método de Correia e Morgenstern-Price, respectivamente, aproximam muito bem as que resultam do cálculo por elementos finitos.

6.3.3.2. Problema 6

A geometria e características constitutivas referentes ao problema 6 são as mesmas do problema 5 mas com inclusão de forças sísmicas. Para isso, introduziram-se no Phase2 os coeficientes sísmicos horizontal e vertical 0,1 e 0,05, respectivamente.

A massa potencialmente deslizante é a apresentada na figura 6.63 e o factor de segurança calculado vale 0,96. Nas figuras 6.64 e 6.65 apresentam-se a deformação da malha e os vectores deslocamento associados ao movimento da massa instável.

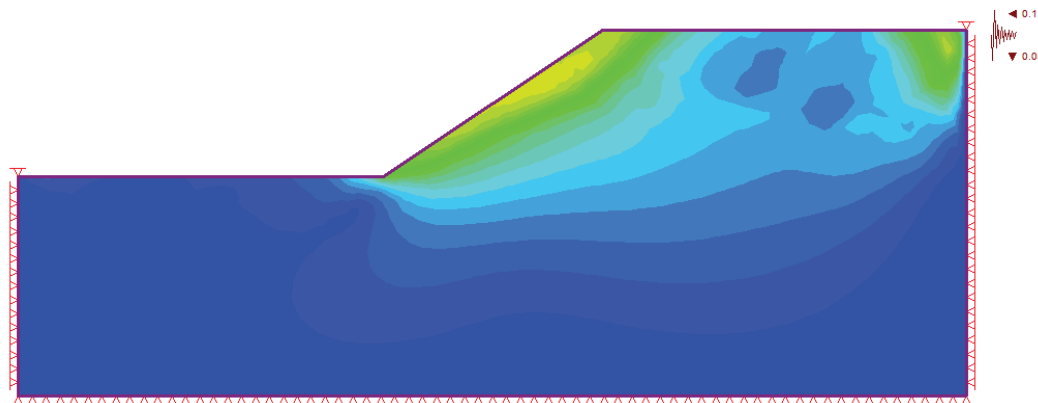


Fig. 6.63 - Superfície de deslizamento (problema 6 – Phase2)

Embora o factor de segurança obtido seja 0,96, o software apresenta também ilustrações para outros coeficientes de segurança próximos do crítico. A figura 6.63 mostra a massa deslizante formada mas apresenta já uma grande massa de solo com deslocamentos importantes. A linha de rotura formada é mais perceptível na coloração correspondente ao FS igual 0,97, ilustrada na figura 6.66.

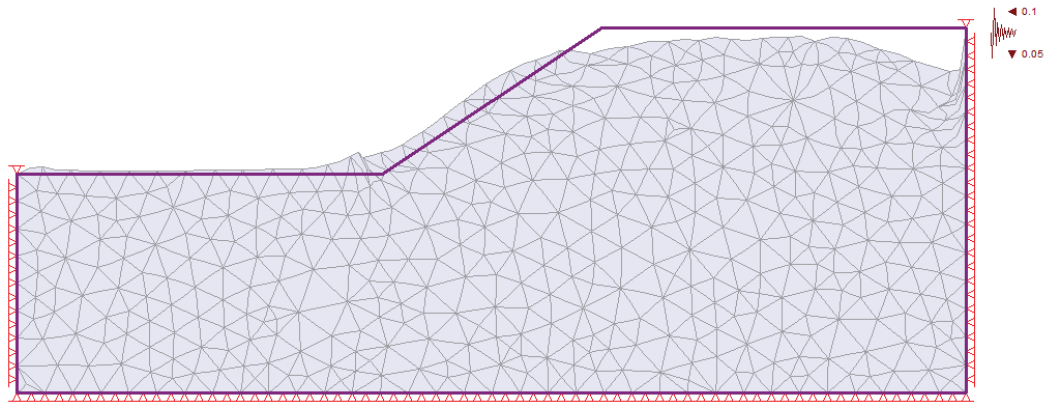


Fig. 6.64 – Deformação da malha (problema 6 – Phase2)

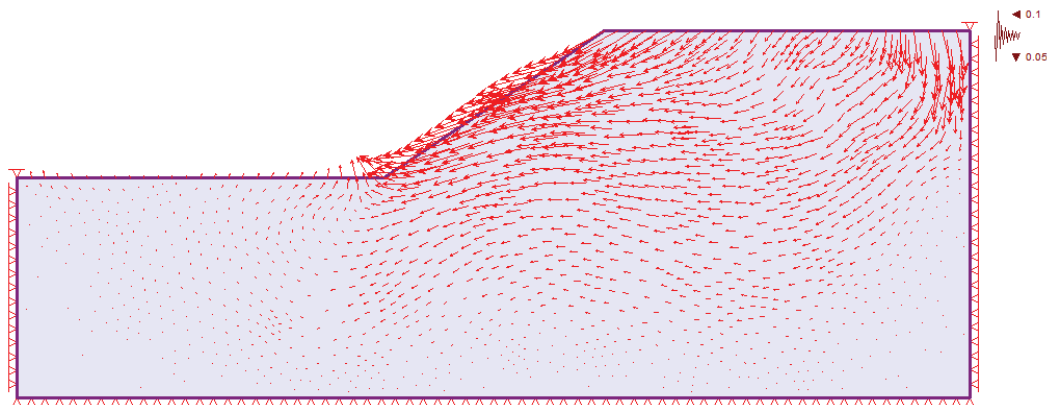


Fig. 6.65 – Vectors deslocamento e deformação da superfície (problema 6 – Phase2)

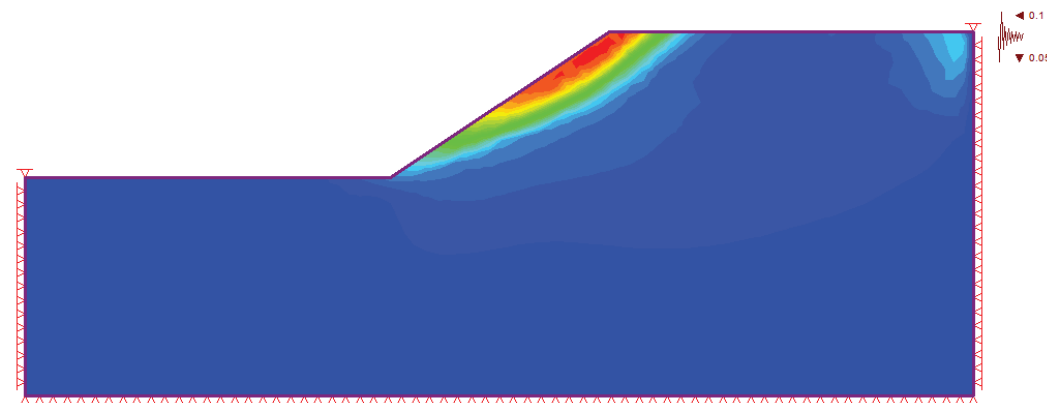


Fig. 6.66 – Superfície de deslizamento (problema 6 – Phase2) para FS=0,97

A mesma análise foi efectuada no TALUDES_Mv1 com o método de Correia e de Morgenstern-Price. Foram realizadas várias iterações, estreitando consecutivamente as condições de busca, até se obterem os factores de segurança críticos. Os dados que conduziram à obtenção dos mesmos são os indicados

na figura 6.67, resultando num FS igual a 0,944 para Correia e 0,945 para Morgenstern-Price. A superfície crítica é a mesma para os dois métodos.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
51	93	0,5	0,5
53	93		
53	88		
51	88		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies				
Coordenadas				
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos
xr	yr	xr	yr	Δr
10	42	10	38	0,5
140	42	140	38	

Fig. 6.67 – Malha de centros e rectas tangentes para a iteração 3 (problema 6 – TALUDES_Mv1)

Observando as figuras 6.68, onde estão representadas a linha de rotura e as linhas de impulso, verificam-se perturbações na configuração das últimas no topo do talude. Tal indicia a existência de tracções, confirmadas pela observação do ficheiro de resultados.

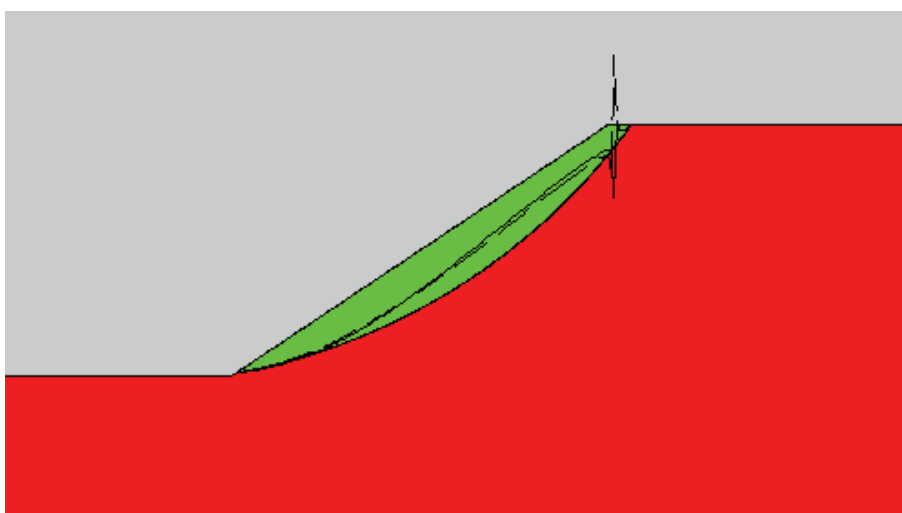


Fig. 6.68 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 6 – TALUDES_Mv1) – tracções no topo do talude

A superfície que resultou no factor de segurança crítico foi introduzida no TALUDES_Mv1 e analisada pela rotina própria para o estudo de uma superfície específica, com introdução de uma fenda de tracção na coordenada $x=90,6$. Efectuado o cálculo, verificou-se que as tracções foram eliminadas (figura 6.69). O modo como as linhas de impulso terminam junto da fenda introduzida precisa ainda de ser melhorado. No entanto, a visualização do ficheiro de resultados permitiu tirar qualquer dúvida quanto à anulação das tracções.

Os factores de segurança obtidos são os descritos no quadro 6.11, onde se faz uma síntese dos valores resultantes deste problema 6.

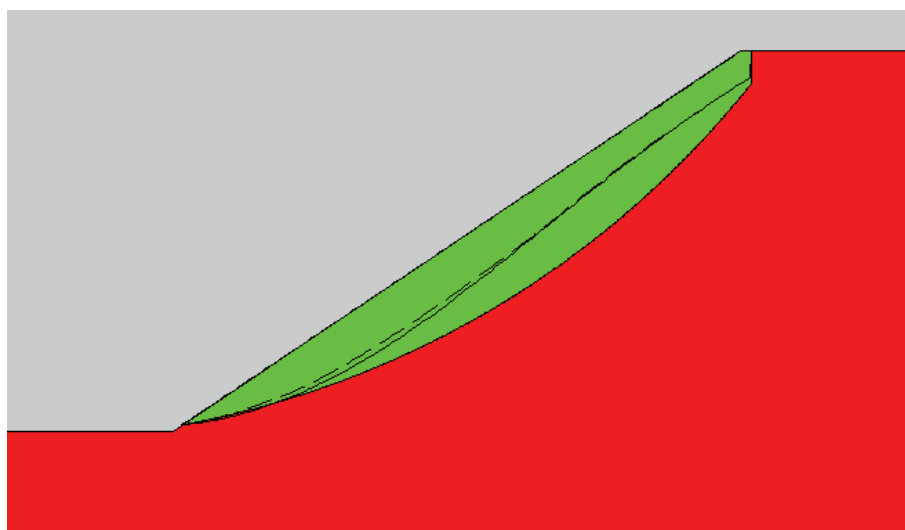


Fig. 6.69 - Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 6 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção

Quadro 6.11 – Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 6

Programa	Nº de sup.	FS	Xmáx	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	495	0.945	140.517	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	495	0.945	-	0.896
Phase2	-	0.960	-	-

Conforme se pode constatar pelo quadro 6.11, os factores de segurança obtidos pelos dois métodos de equilíbrio limite são praticamente coincidentes (apenas diferem na quarta casa decimal como até aqui tem sido regra) e muito próximos do obtido por elementos finitos via Phase2. A diferença situa-se nos 1,6%.

6.3.3.3. Problema 7

A presente análise incide sobre um talude com as mesmas características do problema 5, mas com inclusão do nível freático, que varia entre as cotas $y=30\text{m}$ e $y=34\text{m}$ conforme esquematizado na figura 6.70.

A modelação no Phase2 conduziu à envolvente de rotura mostrada na figura 6.71 com um factor de segurança igual a 1.02. As figuras 6.72 e 6.73 apresentam a deformação da malha e os vectores deslocamento associados ao movimento da massa instável. A sua configuração revela-se um pouco irregular uma vez que não assume a forma circular comum aos estudos até esta parte realizados.

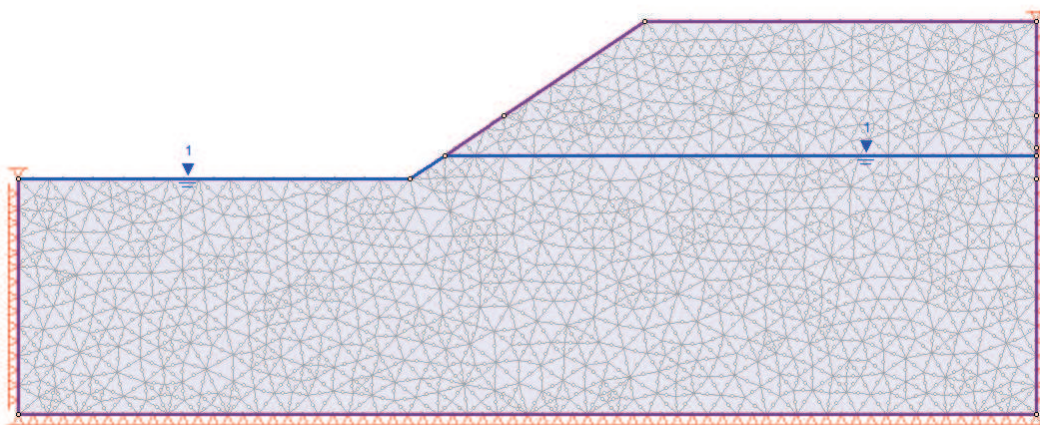


Fig. 6.70 - Geometria (problema 7 – Phase2)

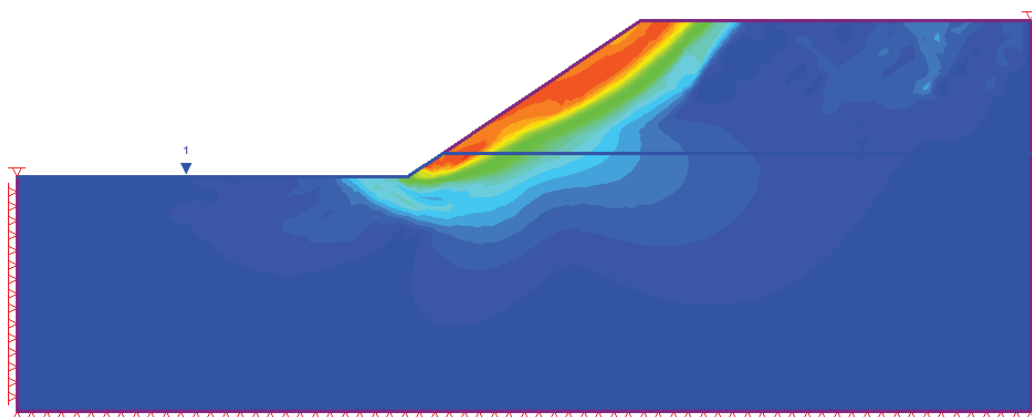


Fig. 6.71 - Superfície de deslizamento (problema 7 – Phase2)

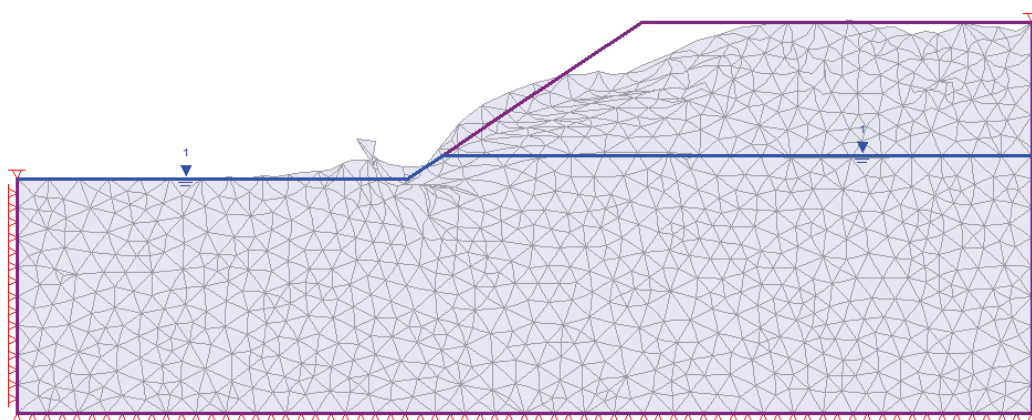


Fig. 6.72 - Deformação da malha (problema 7 – Phase2)

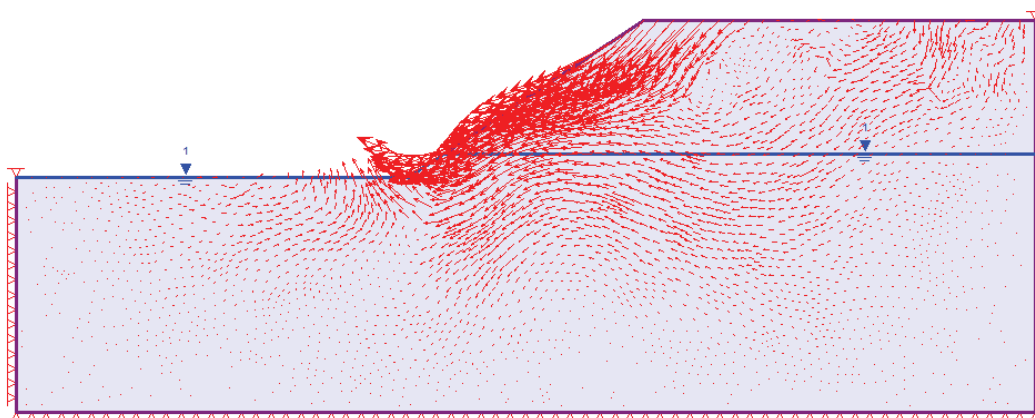


Fig. 6.73 - Vectors de deslocamento e deformação da superfície (problema 7 – Phase2)

A mesma geometria e características introduzidas no TALUDES_Mv1 conduziram à superfície de rotura apresentada na figura 6.74, com um factor de segurança igual a 1,115 para ambos os métodos.

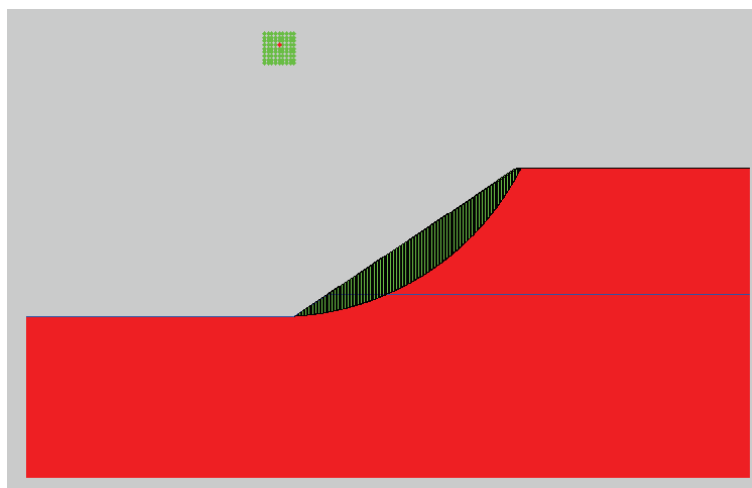


Fig. 6.74 – Superfície de deslizamento (problema 7 – TALUDES_Mv1)

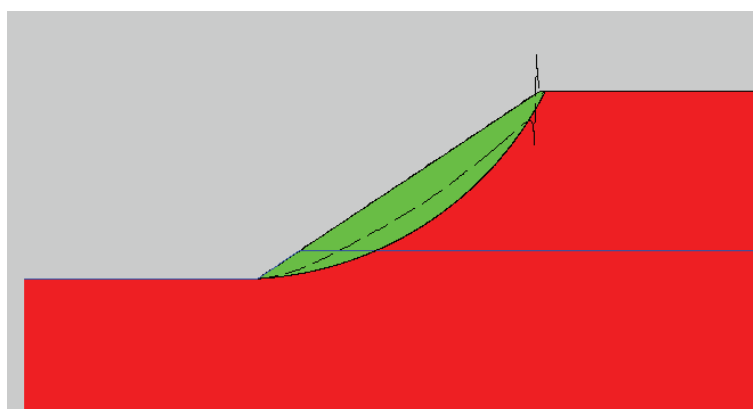


Fig. 6.75 – Linha de impulso de Correia (problema 7 – TALUDES_Mv1)

A figura 6.75 mostra a linha de impulso obtida para o método de Correia. As perturbações no topo do talude indicam a existência de tracções, também comuns aos resultados obtidos pelo método de Morgenstern-Price. Por serem mais elevadas, a linha não ficou devidamente desenhada para este último método.

Realizado novo cálculo com introdução de fenda de tracção na coordenada $x=90,20$, obtiveram-se as linhas de impulso desenhadas na figura 6.76, às quais correspondem os factores de segurança indicados no quadro 6.12.

Quadro 6.12 - Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 7

Programa	Nº de sup.	FS	Xmáx	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	729	1.072	125.604	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	729	1.071	-	0.761
Phase2	-	1.020	-	-

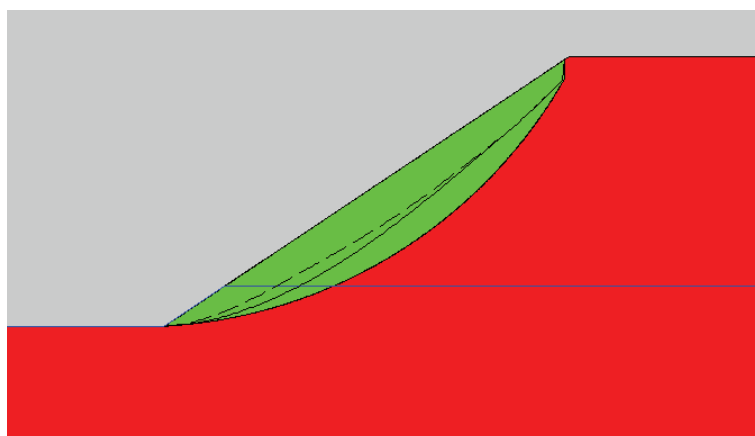


Fig. 6.76 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 7 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção

Os resultados obtidos para as duas metodologias utilizadas continuam próximos. No entanto, os provenientes dos métodos de equilíbrio limite sobrestimam a resistência do maciço. A diferença entre ambas é de 4,9%, revelando-se muito inferior à registada por comparação com o Plaxis quando o mesmo tipo de análise foi efectuada para o solo argiloso.

6.3.3.4. Problema 8

A figura 6.77 apresenta a modelação do talude correspondente ao problema 8: dois estratos com as características indicadas na figura 6.81, nível freático variável, e forças sísmicas com coeficientes horizontal e vertical iguais a 0.1 e 0.05, respectivamente.

Os dois materiais escolhidos partilham o mesmo ângulo de atrito mas têm coesões bastantes diferentes. Já se tinha verificado, pelos cálculos efectuados no Plaxis, que este tipo de constituição leva a que a superfície de rotura se desenvolva pelo solo menos coesivo.

Do cálculo no software Phase2 resultou a envolvente de rotura esquematizada na figura 6.78 com um factor de segurança de 0.94. A deformação da malha e os vectores deslocamento representativos da massa instável podem ser observados nas figuras 6.79 e 6.80.

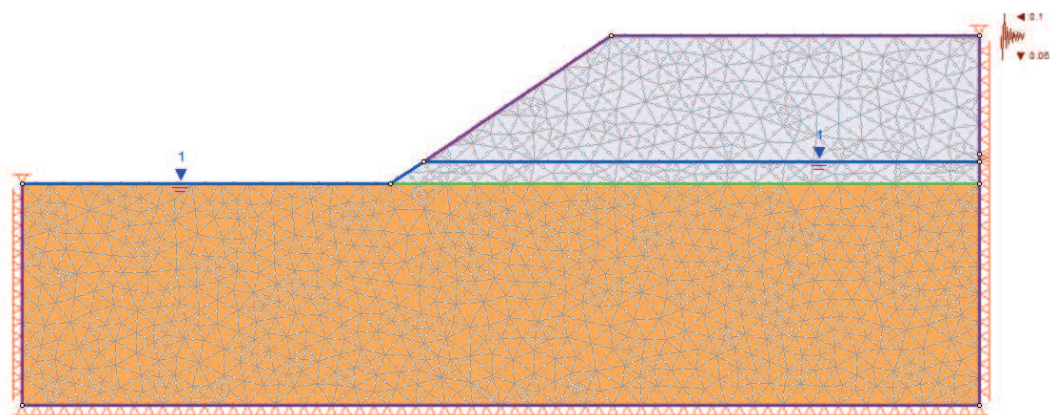


Fig. 6.77 – Geometria (problema 8 – Phase2)

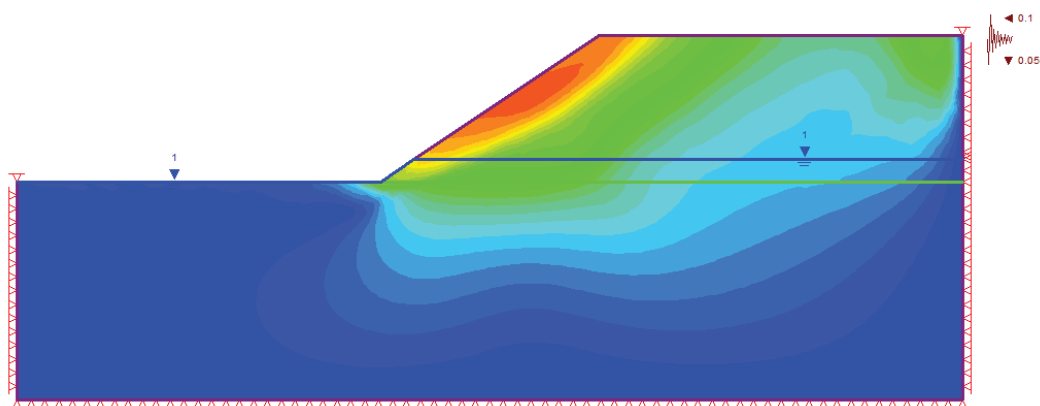


Fig. 6.78 – Superfície de deslizamento (problema 8 – Phase2)

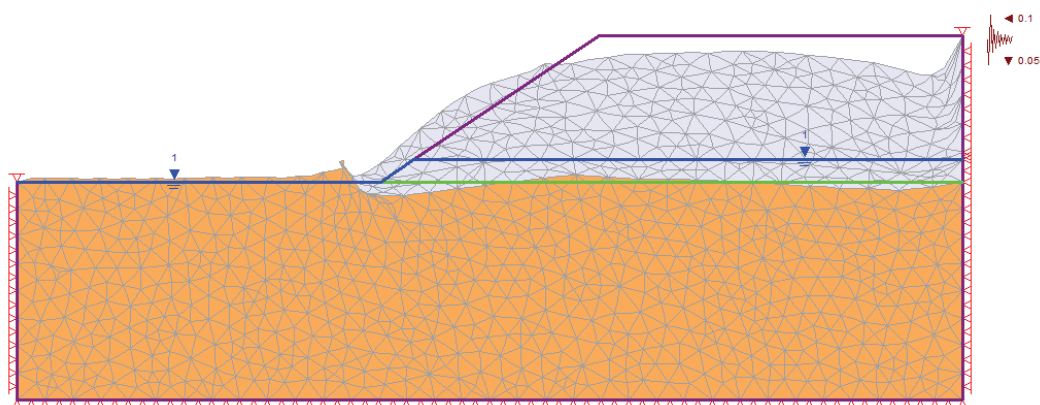


Fig. 6.79 – Deformação da malha (problema 8 – Phase2)

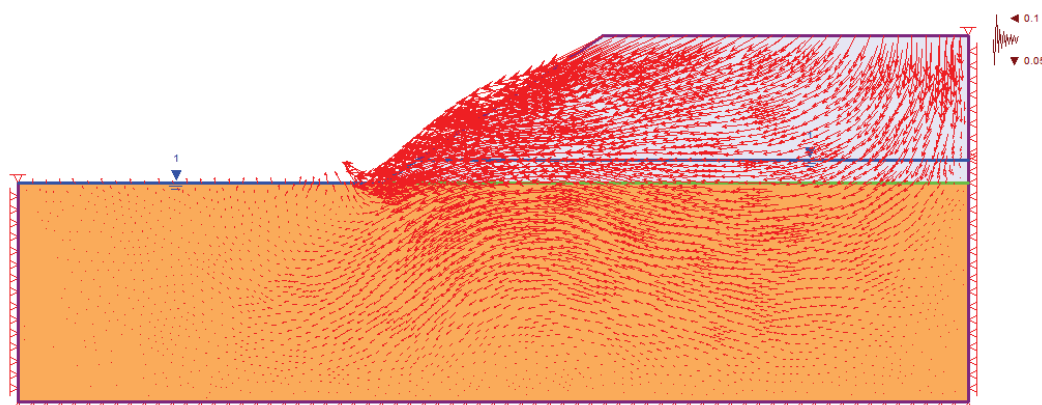


Fig. 6.80 – Vectors de deslocamento e deformação da superfície (problema 8 – Phase2)

2. Preencha o quadro amarelo:

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	19	16	0	0
$\Phi(^{\circ})$	30	30	0	0
$c'(\text{kPa})$	5	1	0	0

Fig. 6.81 – Características dos solos considerados na análise do problema 8

Neste caso, ao contrário do esperado, a superfície de rotura não se desenvolveu com grande significado ao longo do solo com menor coesão.

A mesma geometria foi introduzida no TALUDES_Mv1. A superfície crítica obtida revelou-se a mesma para os dois métodos, com um factor de segurança igual a 0,860 para Correia e 0,857 para Morgenstern-Price. No entanto, a observação das linhas de impulso obtidas permitiu verificar que essas mesmas superfícies não eram válidas, pois descreviam-se fora da massa instável, como se pode ver na figura 6.82.

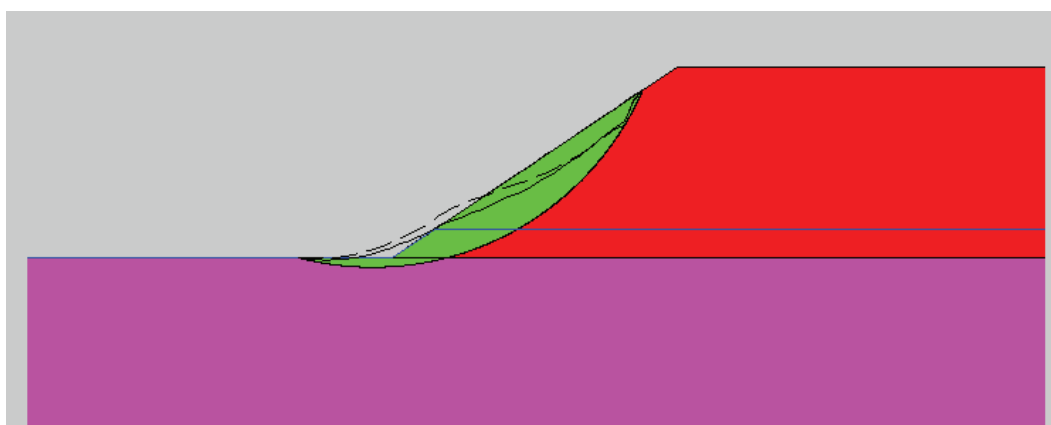


Fig. 6.82 – Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1)

Para evitar este tipo de superfícies, impôs-se a tangente que dá o raio máximo à cota $y=40\text{m}$, coincidente com a do pé do talude.

As condições de busca que permitiram a obtenção da superfície crítica são as indicadas na figura 6.83.

4. Preencha o quadro verde introduzindo as coordenadas de cada ponto, da esquerda para direita, de cima para baixo:

Malha de centros			
Coordenadas		Espaçamento da malha	
xc	yc	eixo x	eixo y
55	80	0,5	0,5
59	80		
59	75		
55	75		

5. Preencha o quadro laranja introduzindo as coordenadas de cada recta a partir do ponto mais à esquerda:

Definição dos raios das superfícies					
Coordenadas					
Tangente que define Rmin		Tangente que define Rmax		Incrementos	
xr	yr	xr	yr	Δr	
10	44	10	40	0,5	
140	44	140	40		

Fig. 6.83 – Malha de centros e rectas tangentes (problema 8 – TALUDES_Mv1)

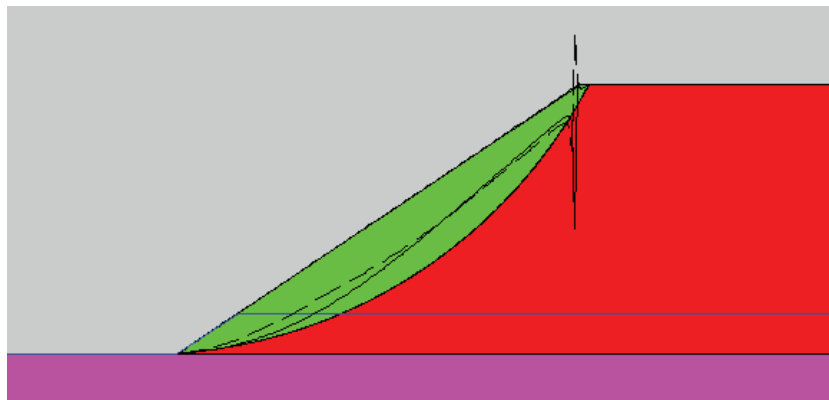


Fig. 6.84 - Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1)

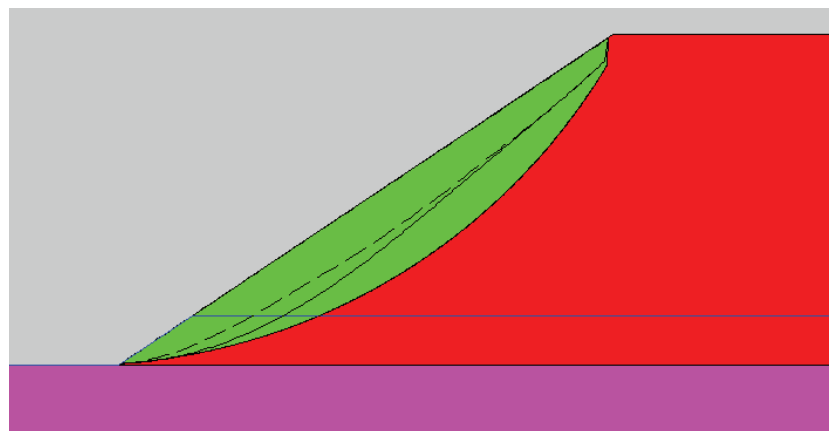


Fig. 6.85 - Linhas de Impulso para os métodos de Correia (a tracejado) e Morgenstern-Price (linha contínua) (problema 8 – TALUDES_Mv1) após introdução de fenda de tracção

A superfície que conduziu ao factor de segurança mínimo foi a mesma para os dois métodos e está representada na figura 6.84 juntamente com as linhas de impulso. Os valor de FS obtido para o método de Correia foi 0,891 e para o de Morgenstern-Price 0,890.

Dada a existência de tracções no topo do talude, voltou-se a realizar o cálculo para essa superfície introduzindo uma fenda de tracção na coordenada $x=89,7$. As linhas de impulso obtidas são as desenhadas na figura 6.85.

Aumentando o zoom várias vezes o autor verificou que a linha de impulso relativa ao método de Morgenstern-Price localiza-se fora da massa instável, junto ao pé do talude. Tal deve-se à dimensão das fatias nessa zona que poderá estar a provocar problemas numéricos, até porque este método tem maiores dificuldades de convergência que o de Correia. De facto, analisando a linha obtida a partir do método de Correia essa situação não se verifica.

O quadro 6.13 faz a síntese dos resultados obtidos para o problema 8.

Quadro 6.13 - Factores de segurança provenientes do TALUDES_Mv1 e Phase2 – problema 8

Programa	Nº de sup.	FS	Xmáx	λ
TALUDES_Mv1 (Correia)	891	0.892	168.649	-
TALUDES_Mv1 (Morgenstern-Price)	891	0.891	-	0.980
Phase2	-	0.940	-	-

Conforme se pode verificar, os factores de segurança obtidos são próximos e os obtidos pelo TALUDES_Mv1 continuam a ser os mais conservativos. A diferença entre as duas metodologias (MEF e equilíbrio limite, adoptando o maior resultado do TALUDES_Mv1) é de 5,1%.

6.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS

As figuras 6.86 e 6.87 fazem um pequeno resumo das diferenças percentuais verificadas entre factores de segurança obtidos pelos métodos de equilíbrio limite e Método dos Elementos Finitos, e que foram avaliadas através dos vários exemplos estudados nos subcapítulos anteriores.

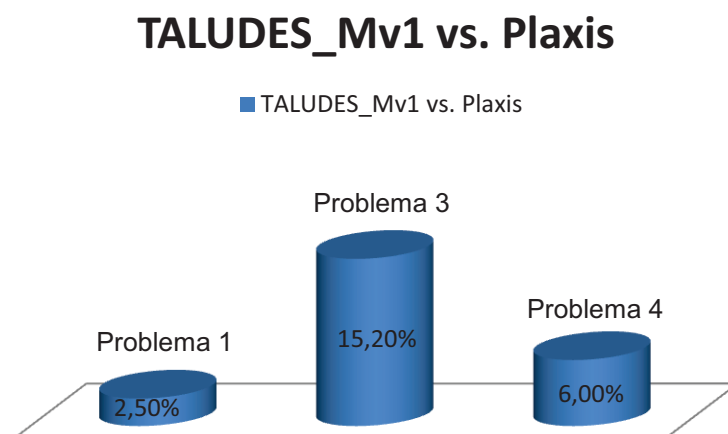


Fig. 6.86 – Diferenças entre factores de segurança calculados pelo Plaxis e pelo TALUDES_Mv1

TALUDES_Mv1 vs. Phase2

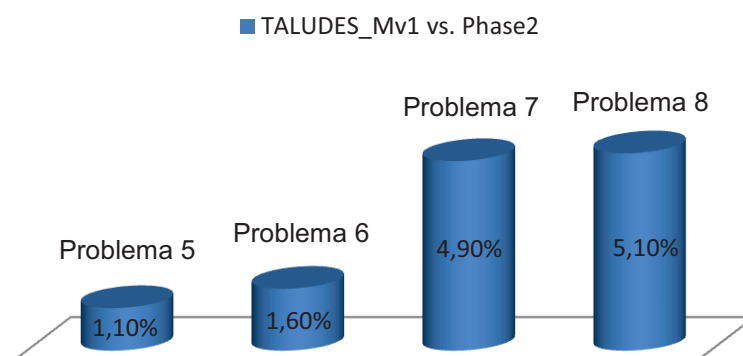


Fig. 6.87 – Diferenças entre factores de segurança calculados pelo Phase2 e pelo TALUDES_Mv1

Como se pode constatar, na maior parte dos problemas estudados os valores obtidos pelas duas metodologias distam menos de 10% uns dos outros. Apenas existe um caso em que essa percentagem foi ultrapassada, tratando-se de um problema mais complexo que envolveu estratificação e nível freático.

As diferenças avaliadas entre métodos de equilíbrio limite e Plaxis são, no entanto, mais elevadas do que as avaliadas nos exemplos corridos com o Phase2. O próprio problema 5, que foi calculado com os dois programas comerciais, registou factores de segurança mais elevados no Plaxis, corroborando as considerações tecidas.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos métodos de equilíbrio limite na análise da estabilidade de taludes revela-se muito satisfatória em comparação com o recurso ao método dos elementos finitos quando o maciço tem constituição homogénea. A diferença encontrada no problema assim caracterizado foi de apenas 1,10%, com os primeiros a registarem valores mais conservativos. No caso de o maciço ser formado por vários estratos os factores de segurança obtidos com os métodos de Correia e Morgenstern-Price são significativamente distintos dos obtidos por elementos finitos, e tendem a sobrestimar a resistência do talude.

Nos casos em que existe nível freático, as diferenças registadas entre o MEF e o programa TALUDES_Mv1 são mais elevadas, quer o maciço seja estratificado ou não, ultrapassando, em alguns casos, os 12% referidos por Duncan (1996). Os valores obtidos vão de encontro ao constatado por Aryal (2006) cujas análises conduziram a diferenças de FS entre uma e outra metodologia de 14,2%. No presente trabalho a maior diferença registada foi de 15,20%, para um talude constituído por uma argila, parte dela não drenada.

No caso de maciços homogéneos, a consideração de forças sísmicas pelo TALUDES_Mv1 conduz a resultados bastantes satisfatórios. A diferença registada em relação aos resultados do Phase2 foi de apenas 1,60%, revelando-se aqueles mais conservativos.

Estudos de maciços homogéneos com consideração do nível freático foram realizados nos dois programas comerciais e os resultados obtidos revelaram-se muito distintos. A diferença entre resultados obtidos pelo Plaxis e pelo TALUDES_Mv1 situa-se nos 15,2% enquanto que, no problema analisado com Phase2 atinge apenas os 4,9%. Em ambos os casos os valores do método de Correia e de Morgenstern-Price sobrestimam a resistência. Esta aparente contradição entre os dois programas comerciais poderá estar relacionada com o tipo de solo analisado em cada exemplo, uma vez que as suas características são significativamente diferentes.

No caso de um talude estratificado, com nível freático e actuação de forças sísmicas, o TALUDES_Mv1 conseguiu uma boa aproximação aos resultados do Phase2, com uma diferença de apenas 5,10%, com os métodos de equilíbrio limite a obterem resultados mais conservadores.

Embora os exemplos analisados com o Plaxis e com o Phase2 não tenham sido os mesmos, verificou-se que as diferenças entre aqueles e o TALUDES_Mv1 são maiores quando se utiliza o Plaxis do que quando se utiliza o Phase2, ou seja, a variação entre factores de segurança obtidos ora por métodos de equilíbrio limite ora pelo MEF é mais reduzida quando os problemas são analisados, no caso do MEF, pelo Phase2. Para o comprovar, o problema 5 foi modelado com as duas ferramentas e o que aqui

acabou de ser exposto confirmou-se: o FS calculado pelo Plaxis foi maior que o calculado pelo Phase2.

O método de Morgenstern-Price revela-se menos estável que o método de Correia e precisa sempre de mais iterações para conseguir a convergência. A utilização do método requer uma apreciação cuidada das condições de busca, principalmente, no que respeita à definição dos raios e da malha de centros.

Uma das causas que pode levar à não convergência do método de Morgenstern-Price está relacionado com os pesos volúmicos. Quando estes são muito reduzidos o método pode apresentar grande dificuldade de convergência. O mesmo não acontece com o método de Correia, que ao longo dos cálculos sempre revelou grande estabilidade.

No que respeita aos valores obtidos de factores de segurança, ambos os métodos (de equilíbrio limite) chegam ao mesmo valor de FS. A diferença acontece, geralmente, apenas na terceira casa decimal. Pelos comentários referidos, pode concluir-se que o método de Correia representa uma boa escolha em detrimento do de Morgenstern-Price, que exige maior esforço de cálculo.

A evolução das forças de interacção obtidas pelos métodos de equilíbrio limite estudados e pelos programas comerciais utilizados é muito semelhante, quer no que respeita ao comportamento das curvas, quer à magnitude dos valores. A aparente discrepância existente entre as curvas obtidas pelo TALUDES_Mv1 e pelo Plaxis, no caso das componentes tangenciais, dever-se-á ao facto de os algoritmos dos métodos de Correia e Morgenstern-Price dividirem os parâmetros de resistência ao corte do maciço pelo factor de segurança.

O programa TALUDES_Mv1 revela-se interactivo e eficiente. Nos vários casos testados, uns apresentados neste trabalho, outros apenas utilizados na fase de desenvolvimento, esta nova ferramenta de cálculo obteve valores idênticos aos obtidos num outro programa já testado e validado, desenvolvido em linguagem Fortran e designado por “Taludes”, provando a sua capacidade de cálculo. Existem no entanto vários melhoramentos que se poderão incluir, nomeadamente:

- Inclusão de um maior número de estratos;
- Inclusão de sobrecargas;
- Inclusão de ancoragens e pregagens;
- Busca de superfícies compostas em complemento das circulares;
- Introdução dos dados através de uma ferramenta de desenho tipo CAD;
- Criação de interface que permita dispensar a introdução de dados pelo ficheiro Excel.

BIBLIOGRAFIA

- Aryal, K. P., (2006). *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods*. Dissertação de Doutoramento, Norwegian University of Science and Technology.
- Clough, R.W. e Woodward, R.J. (1967). *Analysis of embankment stresses and deformations*. J. Soil Mech. e Found. Div., ASCE, 93(4), pp.529-549.
- Correia, R.M (1989). *Um método de equilíbrio limite para a análise de estabilidade de taludes*. Geotecnia, 57, pp.35-45.
- Delgado, R.(1987). *Método dos elementos finitos*. Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, pp.1-85.
- Duncan, J. M., (1996). *State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 7/July/1996, 577-596.
- Faustino, A.M. (2009), *Linguagem Matlab - Apontamentos*, FEUP.
- Ferreira, A.J.M (2009), *Matlab codes for Finite Elements analysis*, Springer, Porto.
- Phase2, Rocscience inc., manual.
- Fredlund, D.G., Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, Vol 14, pp.429-439.
- Freitas, M.A.C. (2011). *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Gerscovich, D. (2009). *Estabilidade de taludes*. <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/estabilidade.pdf>. (acedido em 04/04/2011).
- Gomes, R.. *Aula 1 – Taludes e movimentos de massa*. <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/estabilidade.pdf>. (acedido em 04/04/2011).
- Krahn, J. (2003). *The 2001 R.M. Hardy lecture: The limits of limit equilibrium analyses*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.40, pp. 643-660.
- Matos Fernandes, M. (2006), *Mecânica dos solos*, Volume 2. FEUP Edições, Porto.
- Matos, A. C., (1980). *Um programa de cálculo automático da estabilidade de taludes*. Boletim do Gabinete de Estruturas, Setembro/1980, 1-9, FEUP, Porto.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, Vol 15(1): pp 79-93.
- Nash, D. (1987). *Comprehensive review of limit equilibrium methods of stability analysis*. Slope Stability, Chapter 2. M. G. Andersen and K. S. Richards, Eds. New York: Wiley, pp. 11-75.
- Onâte, E.(2009). *Structural analysis with the finite element method*. CIMNE, School of Civil Engineering, UPC, Barcelona.
- Plaxis b.v., manual.
- Silva, A.F.P. (2010). *Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo método de Correia*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Terzaghi, K., e Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.

Varnes, D.J., (1978). *Slope movement types and processes*. Landslides: Analysis and Control. Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, pp. 11-33.

Whitman, R.V., e Bailey, W. A. (1967). *Use of computers for slope stability analysis*. J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE, 93(4), 475-498.

Zhu, D.Y. (2008). *Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method*. Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds.), pp. 1055-1057, Taylor & Francis Group, London.

Zhu, D.Y., Lee, C.F, Qian, Q.H., Chen, G.R. (2005). *A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.42, pp.272-278.

ANEXO A – FICHEIRO DE RESULTADOS FORNECIDO PELO TALUDES_Mv1

Cálculo com introdução do nível freático!

O maciço sofre deslocamento da esquerda para a direita!

Não foi introduzida fenda de tracção!

Constituição do maciço: três estratos!

Leitura dos estratos bem sucedida!

Coordenadas da malha de centros:

xx	yy
22.00	30.00
32.00	30.00
32.00	20.00
22.00	20.00

Tangentes horizontais aos círculos:

Yrmin	Yrmax	nº rectas tang.
16.00	6.00	3.00

A altura mínima das fatias não foi atingida na superfície

sup.	xcirc	ycirc	raio
10.00	22.00	25.00	9.00

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE CORREIA EXECUTADO COM SUCESSO

!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE EXECUTADO COM SUCESSO

Tempo de cálculo (em segundos): 1.4226

MÉTODO DE CORREIA:

Factor de Segurança mínimo obtido: 1.6153

Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança mínimo obtido: 18.0043

Número de iterações realizadas: 6

INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR OBTIDA PELO MÉTODO DE CORREIA

A superfície que conduziu ao Factor de Segurança mínimo foi a nº 5;

Sup nº	Xc	Yc	R	Psi	DeltaFS	FS	Xmax
1	22.00	20.00	4.00	0	0	0	0
2	22.00	20.00	9.00	-0.00	0.00	2.30	27.52
3	22.00	20.00	14.00	0	0	0	0
4	27.00	20.00	4.00	0	0	0	0
5	27.00	20.00	9.00	-0.00	0.00	1.62	18.00
6	27.00	20.00	14.00	-0.00	0.00	1.92	68.83
7	32.00	20.00	4.00	0	0	0	0
8	32.00	20.00	9.00	0.00	-0.00	3.18	4.75
9	32.00	20.00	14.00	0.00	-0.00	2.37	57.58
10	22.00	25.00	9.00	0	0	0	0
11	22.00	25.00	14.00	-0.00	0.00	2.23	22.91
12	22.00	25.00	19.00	0	0	0	0
13	27.00	25.00	9.00	0	0	0	0
14	27.00	25.00	14.00	-0.00	0.00	1.62	17.20
15	27.00	25.00	19.00	0	0	0	0
16	32.00	25.00	9.00	0	0	0	0
17	32.00	25.00	14.00	0.00	-0.00	2.40	7.03
18	32.00	25.00	19.00	-0.00	0.00	2.05	58.19
19	22.00	30.00	14.00	0.00	-0.00	3.49	0.12
20	22.00	30.00	19.00	0	0	0	0
21	22.00	30.00	24.00	0	0	0	0
22	27.00	30.00	14.00	0	0	0	0
23	27.00	30.00	19.00	-0.00	0.00	1.77	14.63

24	27.00	30.00	24.00	0	0	0	0
25	32.00	30.00	14.00	0	0	0	0
26	32.00	30.00	19.00	-0.00	0.00	2.11	9.25
27	32.00	30.00	24.00	-0.00	0.00	2.04	52.65

Resultados das forças para o Método de Correia

Fatia	X1	E1	X2	E2	N	U	S	xx1
1	0	0	0.61	8.02	11.83	0	5.47	18.59
2	0.61	8.02	2.46	23.38	28.32	0	11.04	19.51
3	2.46	23.38	5.53	37.78	35.66	0	13.52	20.42
4	5.53	37.78	10.00	51.88	37.69	3.99	12.14	21.34
5	10.00	51.88	13.97	62.51	32.72	10.17	10.74	22.31
6	13.97	62.51	16.59	69.11	29.22	14.20	9.78	23.27
7	16.59	69.11	17.87	71.38	26.07	16.81	8.95	24.23
8	17.87	71.38	17.80	69.38	23.13	18.36	8.22	25.19
9	17.80	69.38	16.38	63.44	20.30	19.06	7.55	26.15
10	16.38	63.44	13.62	54.11	17.49	18.97	6.92	27.11
11	13.62	54.11	9.51	42.23	14.61	18.08	6.31	28.08
12	9.51	42.23	5.14	29.55	10.35	16.29	5.43	29.04
13	5.14	29.55	2.28	18.40	6.14	12.48	4.35	30.00
14	2.28	18.40	0.57	7.87	5.20	8.84	4.30	30.89
15	0.57	7.87	0.00	0.00	4.10	3.43	4.29	31.77

yy1	xx2	yy2
16.80	19.51	15.88
15.88	20.42	14.87
14.87	21.34	14.22
14.22	22.31	13.65
13.65	23.27	13.20
13.20	24.23	12.84
12.84	25.19	12.56
12.56	26.15	12.35
12.35	27.11	12.22
12.22	28.08	12.15
12.15	29.04	12.17
12.17	30.00	12.28
12.28	30.89	12.45
12.45	31.77	12.72
12.72	32.66	13.00

INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR RELATIVA À SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO, OBTIDA PELO MÉTODO DE CORREIA

Coordenadas que definem as fatias:

Fatia	X1	X2	Y1base	Y2base	Y1topo	Y2topo	Xm	Ymbase
1	18.59	19.51	16.80	15.02	16.80	16.50	19.05	15.91
2	19.51	20.42	15.02	13.86	16.50	16.19	19.96	14.44
3	20.42	21.34	13.86	13.00	16.19	15.89	20.88	13.43
4	21.34	22.31	13.00	12.32	15.89	15.56	21.82	12.66
5	22.31	23.27	12.32	11.81	15.56	15.24	22.79	12.07
6	23.27	24.23	11.81	11.44	15.24	14.92	23.75	11.62
7	24.23	25.19	11.44	11.18	14.92	14.60	24.71	11.31

8	25.19	26.15	11.18	11.04	14.60	14.28	25.67	11.11
9	26.15	27.11	11.04	11.00	14.28	13.96	26.63	11.02
10	27.11	28.08	11.00	11.06	13.96	13.64	27.60	11.03
11	28.08	29.04	11.06	11.23	13.64	13.32	28.56	11.15
12	29.04	30.00	11.23	11.51	13.32	13.00	29.52	11.37
13	30.00	30.89	11.51	11.88	13.00	13.00	30.44	11.70
14	30.89	31.77	11.88	12.37	13.00	13.00	31.33	12.13
15	31.77	32.66	12.37	13.00	13.00	13.00	32.21	12.68

Dados Sobre as fatias:

Fatia	Dx (m)	sen alf.	cos alf.	tg phi	Coesao (KPa)	Pesofat. (Kn)	U (KPa)	H.fatia (m)
1	0.92	-0.89	0.46	0.58	1.00	10.89	0	0.74
2	0.92	-0.78	0.62	0.58	1.00	28.07	0	1.91
3	0.92	-0.68	0.73	0.58	1.00	38.39	0	2.61
4	0.96	-0.58	0.82	0.36	5.00	45.53	3.39	3.06
5	0.96	-0.47	0.88	0.36	5.00	46.89	9.34	3.34
6	0.96	-0.36	0.93	0.36	5.00	46.63	13.76	3.46
7	0.96	-0.25	0.97	0.36	5.00	45.01	16.89	3.45
8	0.96	-0.15	0.99	0.36	5.00	42.18	18.88	3.33
9	0.96	-0.04	1.00	0.36	5.00	38.22	19.80	3.10
10	0.96	0.07	1.00	0.36	5.00	33.15	19.67	2.77
11	0.96	0.17	0.98	0.36	5.00	26.98	18.51	2.33
12	0.96	0.28	0.96	0.36	5.00	19.67	16.26	1.79
13	0.89	0.38	0.92	0.36	5.00	12.68	13.02	1.30
14	0.89	0.48	0.88	0.36	5.00	8.52	8.75	0.87
15	0.89	0.58	0.81	0.36	5.00	3.07	3.16	0.32

ANEXO B – ROTINA “SUP_VAR_CIR” DO PROGRAMA TALUDES_MV1

```

% MATLAB
% FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

format bank

diary('C:\TALUDES_Mv1\Resultados\Sup_circ_var');

clear all

z=xlsread('C:\TALUDES_Mv1\ ficheiros_TALUDES_Mv1\Caracterização do talude
e.xlsx'); % local onde está guardado ficheiro excel

Nestratos=z(1,2); % leitura e definição do número de estratos
INFdet=z(2,2); % informação detalhada (1) ou não (-1)
NF=z(3,2);
EDouDE=z(1,6); % sentido do escorregamento da esquerda para a direita ou o
inverso;
Ftrac=z(2,6);
xFtrac=z(3,6);
LMFat=z(2,4);
NMFat=z(1,4);
AltMinFat=z(3,4);
kv=z(1,8);
kh=z(2,8);
MCorreia=z(81,6);
MMorgenstern=z(82,6);
nMorg=z(82,7);

if NF==0;
    fprintf('Cálculo sem introdução do nível freático!\n\n')
else
    fprintf('Cálculo com introdução do nível freático!\n\n')
end

if EDouDE==1;
    disp('O maciço sofre deslocamento da esquerda para a direita!')
    fprintf('\n')
else
    disp('O maciço sofre deslocamento da direita para a esquerda!')
    fprintf('\n')
end

if Ftrac==1;
    disp(['O cálculo vai considerar a existência de uma fenda de tracção
para x=', num2str(xFtrac)])
    fprintf('\n')
else
    disp('Não foi introduzida fenda de tracção!')
    fprintf('\n')
end

% % % leitura e definição da geometria do talude

```

```
% [xx1,yy1] - coordenadas da superfície do estrato 1 (=superfície do
maciço)
xx1=z(27:38,1);
xx1=xx1(xx1>=0);
yy1=z(27:38,2);
yy1=yy1(yy1>=0);
estrato1=[xx1 yy1];

% [xx2,yy2] - coordenadas da superfície do estrato 2

xx2=z(27:38,3);
xx2=xx2(xx2>=0);
yy2=z(27:38,4);
yy2=yy2(yy2>=0);
estrato2=[xx2 yy2];

% [xx3,yy3] - coordenadas da superfície do estrato 3
xx3=z(27:38,5);
xx3=xx3(xx3>=0);
yy3=z(27:38,6);
yy3=yy3(yy3>=0);
estrato3=[xx3 yy3];

% [xx4,yy4] - coordenadas da superfície do estrato 4

xx4=z(27:38,7);
xx4=xx4(xx4>=0);
yy4=z(27:38,8);
yy4=yy4(yy4>=0);
estrato4=[xx4 yy4];

% [xxw,yyw] - coordenadas do nível freático

xxw=z(27:38,9);
xxw=xxw(xxw>=0);
yyw=z(27:38,10);
yyw=yyw(yyw>=0);
nivfre=[xxw yyw];

if Nestratos<1 || Nestratos>4;
    fprintf('Introduza as coordenadas do maciço!\n\n')
    return
elseif Nestratos==1;
    fprintf('Constituição do maciço: homogéneo (constituído apenas por um
    estrato!\n\n')
elseif Nestratos==2;
    fprintf('Constituição do maciço: dois estratos!\n\n')
elseif Nestratos==3;
    fprintf('Constituição do maciço: três estratos!\n\n')
else
    fprintf('Constituição do maciço: quatro estratos!\n\n')
end

check1=any(estrato1>0);
check2=any(estrato2>0);
check3=any(estrato3>0);
check4=any(estrato4>0);
```

```

check5=any(nivfre>0);

if (Nestratos==4 & check4>0) | (Nestratos==3 & check3>0) | (Nestratos==2 &
check2>0) | (Nestratos==1 & check1>0);
    fprintf('Leitura dos estratos bem sucedida!\n\n')
else
    disp('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa aos estratos')
    return
end

if (check4>0 & (Nestratos==3 | Nestratos==2 | Nestratos==1));
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa aos
estratos\n\n')
    return
elseif (check4==0 & check3>0) & (Nestratos==4 | Nestratos==2 |
Nestratos==1);
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa aos
estratos\n\n')
    return
elseif (check4==0 & check3==0 & check2>0) & (Nestratos==4 | Nestratos==3 |
Nestratos==1);
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa aos
estratos\n\n')
    return
elseif (check4==0 & check3==0 & check2==0) & (Nestratos~=1);
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa aos
estratos\n\n')
    return
end

if NF==0 & check5>0;
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa ao nível
freático\n\n')
    return
elseif check5==0 & NF==1;
    fprintf('ATENÇÃO: Erro na informação de entrada relativa ao nível
freático\n\n')
    return
end

% Definição dos polígonos para o PLOT

if Nestratos==1;
    nxx1=[xx1;xx1(end);xx1(1)];
    nyy1=[yy1;0;0];
    nxx2=[];
    nyy2=[];
    nxx3=[];
    nyy3=[];
    nxx4=[];
    nyy4=[];
elseif Nestratos==2;
    nestrato2=flipud(estrato2);
    nxx1=[xx1;nestrato2(:,1)];
    nyy1=[yy1;nestrato2(:,2)];
    nxx2=[xx2;xx1(end);xx1(1)];
    nyy2=[yy2;0;0];
    nxx3=[];

```

```
nyy3=[];
nxx4=[];
nyy4=[];
elseif Nestratos==3;
    nestrato2=flipud(estrato2);
    nestrato3=flipud(estrato3);
    nxx1=[xx1;nestrato2(:,1)];
    nyy1=[yy1;nestrato2(:,2)];
    nxx2=[xx2;nestrato3(:,1)];
    nyy2=[yy2;nestrato3(:,2)];
    nxx3=[xx3;xx1(end);xx1(1)];
    nyy3=[yy3;0;0];
    nxx4=[];
    nyy4=[];
else
    nestrato2=flipud(estrato2);
    nestrato3=flipud(estrato3);
    nestrato4=flipud(estrato4);
    nxx1=[xx1;nestrato2(:,1)];
    nyy1=[yy1;nestrato2(:,2)];
    nxx2=[xx2;nestrato3(:,1)];
    nyy2=[yy2;nestrato3(:,2)];
    nxx3=[xx3;nestrato4(:,1)];
    nyy3=[yy3;nestrato4(:,2)];
    nxx4=[xx4;xx1(end);xx1(1)];
    nyy4=[yy4;0;0];
end

% % % leitura e definição das características dos estratos

% estrato 1
UW1=z(18,5);% peso volúmico
phi1=z(19,5);% ângulo de atrito em graus
ch1=z(20,5);% coesão

% estrato 2

UW2=z(18,6);
phi2=z(19,6);
ch2=z(20,6);

% estrato 3

UW3=z(18,7);
phi3=z(19,7);
ch3=z(20,7);

% estrato 4

UW4=z(18,8);
phi4=z(19,8);
ch4=z(20,8);

% % % ciclo sobre todas as superfícies
% leitura e definição das coordenadas da malha de centros

centros=z(64:67,4:5);
```

```

xcmin=min(centros(:,1));
ycmin=min(centros(:,2));
xcmax=max(centros(:,1));
ycmax=max(centros(:,2));

if INFdet==1;
    disp('Coordenadas da malha de centros: ')
    fprintf('\n')
    disp(['    xx', '    yy']);
    fprintf('\n')
    disp([centros(:,1),centros(:,2)])
    fprintf('\n')
end

% leitura e definição das coordenadas da tangente que dá raio mínimo (tang.
superior)

x1min=z(75,3);
y1min=z(75,4);
x2min=z(76,3);
y2min=z(76,4);

% leitura e definição das coordenadas da tangente que dá raio máximo (tang.
inferior)

x1max=z(75,5);
y1max=z(75,6);
x2max=z(76,5);
y2max=z(76,6);

% leitura e definição das coordenadas de cada ponto da malha de centros

deltaxc=z(64,6);
deltayc=z(64,7);
xc=(xcmin:deltaxc:xcmax);
nxc=length(xc);
yc=(ycmin:deltayc:ycmax);
nyc=length(yc);
[xxc,yycc]=meshgrid(xc,yc);
yycc=yc';
xxc=xxc(:);
yycc=yycc(:);

% leitura e definição do incremento dos raios

deltar=z(75,7);
yr=y1max:deltar:y1min;
nyr=length(yr);

if INFdet==1;
    disp('Tangentes horizontais aos círculos: ')
    fprintf('\n')
    disp(['    Yrmin', '    Yrmax', '    n° rectas tang.']);
    fprintf('\n')
    disp([y1min,y1max,nyr])
    fprintf('\n')
end

```

```

% início do ciclo de definição da geometria das superfícies e cálculo de FS

nsupf=nxc*nyc*nyr;
icent=0; %contador de centros
isupf_C=0; %contador de superfícies
isupf_M=0; %contador de superfícies
resparcCorreia=zeros(nsupf,8); % para efeitos de plot
resparcMorg=zeros(nsupf,8);
FSmin_C=1000; % para efeitos de plot
FSmin_M=1000;
niter_C=[];
niter_M=[];

tic
for y=1:nyc;
    ycirc=yc(y);
    for x=1:nxc;
        xcirc=xc(x);
        icent=icent+1;
        raio=ycirc-ylmin;
        while raio<=ycirc-ylmax;
            isupf_C=isupf_C+1;
            isupf_M=isupf_M+1;
            P=circleAsPolygon([xcirc ycirc raio],5000);
            Px=P(:,1); % P first column
            Py=P(:,2); % P second column

% % % Fase 0 - Determinação dos pontos de intersecção da superfície
%                circular de deslizamento com a superfície do maciço,
%                estratos e nível freático

            [a1 b1]=curveintersect(xx1,yy1,Px,Py); % intersecção com o
%estrato 1 (=superfície do maciço)

            if EDouDE==0 && length(a1)>2;
                a1=[a1(end-1);a1(end)];
                b1=[b1(end-1);b1(end)];
            end

            if length(a1)<2; % condição para que a superfície seja válida
                resparcCorreia(isupf_C,1:8)=[isupf_C xcirc ycirc raio 0 0 0
                0];
                resparcMorg(isupf_M,1:8)=[isupf_M xcirc ycirc raio 0 0 0 0];
                raio=raio+deltar;

            else % eliminação dos segmentos da superfície circular que não
interessam (definição da superfície de deslizamento)
                t=find(Px>=min(a1) & Px<=max(a1) & Py<=max(yy1));
                Px=Px(Px>=min(a1) & Px<=max(a1) & Py<=max(yy1));
                Py=Py(t);

                % intersecção da superfície de deslizamento com o nível
freático e deste com os estratos

                if NF==1;
                    [aw bw]=curveintersect(xxw,yyw,Px,Py);

```

```

if aw>0;
    if Nestratos==1;
        [aw1 bw1]=curveintersect(xxw,yyw,xx1,yy1);
        aw1=aw1(aw1>min(aw) & aw1<max(aw));
    elseif Nestratos==2;
        [aw1 bw1]=curveintersect(xxw,yyw,xx1,yy1);
        aw1=aw1(aw1>min(aw) & aw1<max(aw));
        [aw2 bw2]=curveintersect(xxw,yyw,xx2,yy2);
        aw2=aw2(aw2>min(aw) & aw2<max(aw));

    elseif Nestratos==3;
        [aw1 bw1]=curveintersect(xxw,yyw,xx1,yy1);
        aw1=aw1(aw1>min(aw) & aw1<max(aw));
        [aw2 bw2]=curveintersect(xxw,yyw,xx2,yy2);
        aw2=aw2(aw2>min(aw) & aw2<max(aw));
        [aw3 bw3]=curveintersect(xxw,yyw,xx3,yy3);
        aw3=aw3(aw3>min(aw) & aw3<max(aw));

    else
        [aw1 bw1]=curveintersect(xxw,yyw,xx1,yy1);
        aw1=aw1(aw1>min(aw) & aw1<max(aw));
        [aw2 bw2]=curveintersect(xxw,yyw,xx2,yy2);
        aw2=aw2(aw2>min(aw) & aw2<max(aw));
        [aw3 bw3]=curveintersect(xxw,yyw,xx3,yy3);
        aw3=aw3(aw3>min(aw) & aw3<max(aw));
        [aw4 bw4]=curveintersect(xxw,yyw,xx4,yy4);
        aw4=aw4(aw4>min(aw) & aw4<max(aw));
    end
else
    aw=[];aw1=[];aw2=[];aw3=[];aw4=[]; % definição
destas variáveis caso não fiquem definidas na instrução anterior
    bw=[];bw1=[];bw2=[];bw3=[];bw4=[];
end
else
    aw=[];aw1=[];aw2=[];aw3=[];aw4=[]; % definição destas
variáveis caso não fiquem definidas na instrução anterior
    bw=[];bw1=[];bw2=[];bw3=[];bw4=[];
end

% intersecção da superfície de deslizamento com os restantes
estratos

a2=0;b2=0;a3=0;b3=0;a4=0;b4=0; % definição das variáveis
para o caso de não ficarem definidas na instrução seguinte

if Nestratos==1;
    INTERS=[a1;aw;aw1];
elseif Nestratos==2;
    [a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);% intersecção com
o estrato 2
    INTERS=[a1;a2;aw;aw1;aw2];
elseif Nestratos==3;
    [a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);% intersecção com
o estrato 2
    [a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,Px,Py);% intersecção com
o estrato 3
    INTERS=[a1;a2;a3;aw;aw1;aw2;aw3];
else

```

```

    [a2 b2]=curveintersect (xx2,yy2,Px,Py);% intersecção com
o estrato 2
    [a3 b3]=curveintersect (xx3,yy3,Px,Py);% intersecção com
o estrato 3
    [a4 b4]=curveintersect (xx4,yy4,Px,Py);% intersecção com
o estrato 4
    INTERS=[a1;a2;a3;a4;aw;aw1;aw2;aw3;aw4];
end

% % % Fase 1 - Determinação dos pontos notáveis da superfície de cada
estrato

    if aw>0;
        pintermxxw=xxw (xxw>min (aw) & xxw<max (aw));
    else
        pintermxxw=[];
    end

    if a4>0;
        pintermxx1=xx1 (xx1>min (a1) & xx1<max (a1));
        pintermxx2=xx2 (xx2>min (a2) & xx2<max (a2));
        pintermxx3=xx3 (xx3>min (a3) & xx3<max (a3));
        pintermxx4=xx4 (xx4>min (a4) & xx4<max (a4));

        pintermxx=[pintermxx1;pintermxx2;pintermxx3;pintermxx4;p
intermxxw];
    elseif a3>0;
        pintermxx1=xx1 (xx1>min (a1) & xx1<max (a1));
        pintermxx2=xx2 (xx2>min (a2) & xx2<max (a2));
        pintermxx3=xx3 (xx3>min (a3) & xx3<max (a3));
        pintermxx=[pintermxx1;pintermxx2;pintermxx3;pintermxxw];
    elseif a2>0;
        pintermxx1=xx1 (xx1>min (a1) & xx1<max (a1));
        pintermxx2=xx2 (xx2>min (a2) & xx2<max (a2));
        pintermxx=[pintermxx1;pintermxx2;pintermxxw];
    else
        pintermxx1=xx1 (xx1>min (a1) & xx1<max (a1));
        pintermxx=[pintermxx1;pintermxxw];
    end

    xxfati=[INTERS;pintermxx];

% % % Fase 2 - Reordenação dos elementos do vector

    xxfati=sort (xxfati);

% % % Fase 3 - Consideração de uma fenda de tracção

    if Ftrac~=0;
        if EDouDE==0;
            for ifatias=1:length (xxfati);
                xfati=xxfati (ifatias);
                if xfati>=xFtrac;
                    xxfati (ifatias)=xFtrac;
                    Px=Px (Px<=xFtrac);
                    Py=Py (1:length (Px));
                    Px (end)=xFtrac;
                end
            end
        end
    end

```

```

        yFtrac=interp1(xx1,yy1,xFtrac);
        Py(end)=yFtrac;
    end
end
else
    for ifatias=1:length(xxfat1);
        xfati=xxfat1(ifatias);
        if xfati<=xFtrac;
            xxfat1(ifatias)=xFtrac;
            yFtrac=interp1(xx1,yy1,xFtrac);
            Paux=find(Px<=xFtrac);
            Px=Px(Paux(end):end);
            Py=Py(Paux(end):end);
            Px(1)=xFtrac;
            Py(1)=yFtrac;
        end
    end
end
end
end

%%% Fase 4 - Eliminação de valores iguais

nfati=length(xxfat1);
for ifati=1:(nfati-1);
    x1=xxfat1(ifati);
    x2=xxfat1(ifati+1);
    if abs(x1-x2)<=1e-5;
        xxfat1(ifati)=xxfat1(ifati+1);
    end
end

xxfat1=unique(xxfat1);

%%% Fase 5 - Introdução de mais pontos atendendo às dimensões das fatias

nfati=length(xxfat1);
ifati=1;
while ifati<=(nfati-1);
    dx=xxfat1(ifati+1)-xxfat1(ifati);
    if dx>LMFat;
        kfati=dx/LMFat;
        kfati=ceil(kfati); % numero de novas divisões
        kkfati=kfati-1; % numero de coordenadas a
adicionar(duas extremas que já existem mais as novas)
        if (nfati+kkfati-1)>NMFat; % (nfati+kkfati) é o
número de fatias; menos 1 fica o número de divisões;
            disp('O número de fatias excede o máximo
definido pelo utilizador! Defina no ficheiro
Excel uma nova largura para as fatias ou aumente
o número máximo permitido de fatias');
            return
        end

        xxfat1=[xxfat1(1:ifati);zeros(kkfati,1);xxfat1((ifa
ti+1):end)];
        deltaxx=dx/kfati;
        for jfati=1:kkfati;
            rj=jfati;

```

```

        xxfati(ifati+jfati)=xxfati(ifati)+rj*deltaxx;
    end
    nfati=nfati+kkfati;
    ifati=ifati+1;
else
    ifati=ifati+1;
end
end

% % % Determinação das características das fatias

nfati=length(xxfati);
yyfati=zeros(nfati,1);
basex=zeros(nfati-1,1);
basey=zeros(nfati-1,1);
deltax=zeros(nfati-1,1);
senalfa=zeros(nfati-1,1);
cosalfa=zeros(nfati-1,1);

% ciclo sobre as fatias

for ifati=1:nfati-1;
    xesq=xxfati(ifati);
    xdir=xxfati(ifati+1);
    yesqbase=ycirc-sqrt(abs(raio*raio-(xesq-xcirc)*(xesq-xcirc)));
    ydirbase=ycirc-sqrt(abs(raio*raio-(xdir-xcirc)*(xdir-xcirc)));
    yyfati(ifati)=yesqbase;
    yyfati(ifati+1)=ydirbase;

    % Coordenadas xx e yy do ponto médio da base

    xxm=(xesq+xdir)/2;
    yym=(yesqbase+ydirbase)/2;
    basex(ifati)=xxm;
    basey(ifati)=yy;

    % Largura e inclinação

    dx1=xdir-xesq;
    deltax(ifati)=dx1; % largura das fatias
    dyl=ydirbase-yesqbase;
    dl=sqrt(dx1*dx1+dyl*dyl);
    senalfa(ifati)=dyl/dl;
    cosalfa(ifati)=dx1/dl;
end

% Faces laterais e topos das fatias

yylfati=interp1q(xx1,yy1,xxfati); % para efeitos de plot
yylmfati=interp1q(xx1,yy1,basex);
hlfati=yylmfati-basey;
hfati=hlfati;
h2fati=zeros(nfati-1,1);
h3fati=zeros(nfati-1,1);
h4fati=zeros(nfati-1,1);

```

```

hwfati=zeros(nfati-1,1);

if a4>0;
    yy2fati=interp1q(xx2,yy2,xxfati); % para efeitos de plot
    yy2mfati=interp1q(xx2,yy2,basex);
    h2fatiaux=yy2mfati-basey;
    h2neg=h2fatiaux>=0;
    h2fati=h2fatiaux.*h2neg;

    yy3fati=interp1q(xx3,yy3,xxfati); % para efeitos de plot
    yy3mfati=interp1q(xx3,yy3,basex);
    h3fatiaux=yy3mfati-basey;
    h3neg=h3fatiaux>=0;
    h3fati=h3fatiaux.*h3neg;

    yy4fati=interp1q(xx4,yy4,xxfati); % para efeitos de plot
    yy4mfati=interp1q(xx4,yy4,basex);
    h4fatiaux=yy4mfati-basey;
    h4neg=h4fatiaux>=0;
    h4fati=h4fatiaux.*h4neg;

elseif a3>0;
    yy2fati=interp1q(xx2,yy2,xxfati); % para efeitos de plot
    yy2mfati=interp1q(xx2,yy2,basex);
    h2fatiaux=yy2mfati-basey;
    h2neg=h2fatiaux>=0;
    h2fati=h2fatiaux.*h2neg;

    yy3fati=interp1q(xx3,yy3,xxfati); % para efeitos de plot
    yy3mfati=interp1q(xx3,yy3,basex);
    h3fatiaux=yy3mfati-basey;
    h3neg=h3fatiaux>=0;
    h3fati=h3fatiaux.*h3neg;

elseif a2>0;
    yy2fati=interp1q(xx2,yy2,xxfati); % para efeitos de plot
    yy2mfati=interp1q(xx2,yy2,basex);
    h2fatiaux=yy2mfati-basey;
    h2neg=h2fatiaux>=0;
    h2fati=h2fatiaux.*h2neg;

end

if max(hfati)<AltMinFat;
    resparcCorreia(isupf_C,1:8)=[isupf_C xcirc ycirc raio 0
    0 0 0];
    resparcMorg(isupf_M,1:8)=[isupf_M xcirc ycirc raio 0 0 0
    0];
    disp('A altura mínima das fatias não foi atingida na
    superfície')
    fprintf('\n')
    disp('          sup.          xcirc          ycirc
    raio')
    fprintf('\n')
    disp([isupf_C,xcirc,ycirc,raio])
    raio=raio+deltar;

```

```
else
    if aw>0;
        yywfati=interp1q(xxw,yyw,xxfati); % para efeitos de
plot
        yywmfati=interp1q(xxw,yyw,basex);
        hwfatiaux=yywmfati-basey;
        hwneg=hwfatiaux>=0;
        hwfati=hwfatiaux.*hwneg;
    end

    % Avaliação do peso das fatias

    pesof=(h1fati-h2fati).*deltax*UW1+(h2fati-
    h3fati).*deltax*UW2+(h3fati-
    h4fati).*deltax*UW3+(h4fati).*deltax*UW4;

    % Avaliação da coesão na base das fatias

    if a4>0;
        ch4fatiaux=h4fati>0;
        chfat4=ch4*ch4fatiaux;
        maior=find(chfat4>0);

        ch3fatiaux=h3fati>0;
        chfat3=ch3*ch3fatiaux;
        chfat3(maior)=chfat4(maior);
        maior=find(chfat3>0);

        ch2fatiaux=h2fati>0;
        chfat2=ch2*ch2fatiaux;
        chfat2(maior)=chfat3(maior);
        maior=find(chfat2>0);

        ch1fatiaux=h1fati>0;
        chfat1=ch1*ch1fatiaux;
        chfat1(maior)=chfat2(maior);
    elseif a3>0;
        ch3fatiaux=h3fati>0;
        chfat3=ch3*ch3fatiaux;
        maior=find(chfat3>0);

        ch2fatiaux=h2fati>0;
        chfat2=ch2*ch2fatiaux;
        chfat2(maior)=chfat3(maior);
        maior=find(chfat2>0);

        ch1fatiaux=h1fati>0;
        chfat1=ch1*ch1fatiaux;
        chfat1(maior)=chfat2(maior);
    elseif a2>0;
        ch2fatiaux=h2fati>0;
        chfat2=ch2*ch2fatiaux;
        maior=find(chfat2>0);

        ch1fatiaux=h1fati>0;
        chfat1=ch1*ch1fatiaux;
```

```

        chfat1(maior)=chfat2(maior);
else
    chlfatiaux=hlfati>0;
    chfat1=chl*chlfatiaux;
end

% Avaliação do ângulo de atrito na base das fatias

if a4>0;
    phi4fatiaux=h4fati>0;
    phifat4=phi4*phi4fatiaux;
    maior=find(phifat4>0);

    phi3fatiaux=h3fati>0;
    phifat3=phi3*phi3fatiaux;
    phifat3(maior)=phifat4(maior);
    maior=find(phifat3>0);

    phi2fatiaux=h2fati>0;
    phifat2=phi2*phi2fatiaux;
    phifat2(maior)=phifat3(maior);
    maior=find(phifat2>0);

    philfatiaux=h1fati>0;
    phifat1=phil*philfatiaux;
    phifat1(maior)=phifat2(maior);
elseif a3>0;
    phi3fatiaux=h3fati>0;
    phifat3=phi3*phi3fatiaux;
    maior=find(phifat3>0);

    phi2fatiaux=h2fati>0;
    phifat2=phi2*phi2fatiaux;
    phifat2(maior)=phifat3(maior);
    maior=find(phifat2>0);

    philfatiaux=h1fati>0;
    phifat1=phil*philfatiaux;
    phifat1(maior)=phifat2(maior);
elseif a2>0;
    phi2fatiaux=h2fati>0;
    phifat2=phi2*phi2fatiaux;
    maior=find(phifat2>0);

    philfatiaux=h1fati>0;
    phifat1=phil*philfatiaux;
    phifat1(maior)=phifat2(maior);
else
    philfatiaux=h1fati>0;
    phifat1=phil*philfatiaux;
end

% Avaliação da pressão neutra na base das fatias

pneut=hwfati*10;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % % Determinação do Factor de Segurança pelo Método de Correia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        if MCorreia==1;
            Correia
        end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % % Determinação do Factor de Segurança pelo Método de Morgenstern-Price
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        if MMorgenstern==1;
            Morgenstern_Price
        end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        % Incrementação
        raio=raio+deltar;
    end
end
end
end
end

if MCorreia==1;
    if niter_C>0;
        fprintf('!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE CORREIA EXECUTADO COM
        SUCESSO\n\n')
    else
        fprintf('Nenhum factor de segurança encontrado! \nVerifique se
        todas as células do ficheiro de dados estão preenchidas e inicie
        novamente o cálculo!')
        return
    end
end

if MMorgenstern==1;
    if niter_M>0;
        fprintf('!!!!CÁLCULO COM O MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE EXECUTADO
        COM SUCESSO\n\n')
    else
        fprintf('Nenhum factor de segurança encontrado! \nVerifique se
        todas as células do ficheiro de dados estão preenchidas e inicie
        novamente o cálculo!')
        return
    end
end

tempo=toc;
disp(['Tempo de cálculo (em segundos): ',num2str(tempo)])
fprintf('\n')
```

```

% _____ PLOT\PLOT/PLOT _____ %

% visualização da geometria do talude
figure
hold on
title ('Geometria do Talude');
fill(nxx1,nyy1,'r');
fill(nxx2,nyy2,'m');
fill(nxx3,nyy3,'c');
fill(nxx4,nyy4,'y');
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b')
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom

if MCorreia==1
    figure
    hold on
    title ('Superfície de Deslizamento (Método de Correia)');
    fill(nxx1,nyy1,'r');
    fill(nxx2,nyy2,'m');
    fill(nxx3,nyy3,'c');
    fill(nxx4,nyy4,'y');
    plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',
        nPx_C,nPy_C,'k')
    scatter(xxc,yyC,10,'filled','g')
    scatter(nxcirc_C,nycirc_C,10,'filled','r');
    axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
    axis equal
    axis off
    zoom

    figure
    hold on
    title ('Geometria das Fatias (Método de Correia)');
    fill(nxx1,nyy1,'r');
    fill(nxx2,nyy2,'m');
    fill(nxx3,nyy3,'c');
    fill(nxx4,nyy4,'y');
    fill(mdesl_C(:,1),mdesl_C(:,2),'g');
    plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',nPx_C,
        nPy_C,'k')
    scatter(xxc,yyC,10,'filled','g')
    scatter(nxcirc_C,nycirc_C,10,'filled','r');
    plot(desfati_C(:,1),desfati_C(:,2),'k')
    axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
    axis equal
    axis off
    zoom

    figure
    hold on
    title ('Linha de Impulso (Método de Correia)');
    fill(nxx1,nyy1,'r');
    fill(nxx2,nyy2,'m');
    fill(nxx3,nyy3,'c');

```

```

fill(nxx4,nyy4,'y');
fill(mdesl_C(:,1),mdesl_C(:,2),'g')
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',nPx_,
nPy_C,'k:',xdivisoes_C,nyforca_C,'k--')
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom

figure
hold on
subplot(1,3,1)
stairs([rX1_C rX2_C])
title('Força X (Método de Correia)');
subplot(1,3,2)
stairs([rE1_C rE2_C])
title('Força E (Método de Correia)');
subplot(1,3,3)
stairs([rN_C rS_C])
title('Força N e S (Método de Correia)');
end

if MMorgenstern==1;
figure
hold on
title('Superfície de Deslizamento (Método de Morgenstern-Price)');
fill(nxx1,nyy1,'r');
fill(nxx2,nyy2,'m');
fill(nxx3,nyy3,'c');
fill(nxx4,nyy4,'y');
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',nPx_M,
nPy_M,'k--')
scatter(xxc,yye,10,'filled','g');
scatter(nxcirc_M,nycirc_M,10,'filled','r');
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom

figure
hold on
title('Geometria das Fatias (Método de Morgenstern-Price)');
fill(nxx1,nyy1,'r');
fill(nxx2,nyy2,'m');
fill(nxx3,nyy3,'c');
fill(nxx4,nyy4,'y');
fill(mdesl_M(:,1),mdesl_M(:,2),'g');
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',nPx_M,
nPy_M,'k')
scatter(xxc,yye,10,'filled','g');
scatter(nxcirc_M,nycirc_M,10,'filled','r');
plot(desfati_M(:,1),desfati_M(:,2),'k')
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom

figure

```

```

hold on
title ('Linha de Impulso (Método de Morgenstern-Price)');
fill(nxx1,nyy1,'r');
fill(nxx2,nyy2,'m');
fill(nxx3,nyy3,'c');
fill(nxx4,nyy4,'y');
fill(mdesl_M(:,1),mdesl_M(:,2),'g')
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',
xdivisoes_M,nyforca_M,'k')
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom

figure
hold on
subplot(1,3,1)
stairs([rX1_M rX2_M])
title ('Força X (Método de Morgenstern-Price)');
subplot(1,3,2)
stairs([rE1_M rE2_M])
title ('Força E (Método de Morgenstern-Price)');
subplot(1,3,3)
stairs([rN_M rS_M])
title ('Força N e S (Método de Morgenstern-Price)');
end

if MMorgenstern==1 && MCorreia==1 && supFSmin_M==supFSmin_C;
figure
hold on
title ('Linha de Impulso (Método de Morgenstern-Price e Correia)');
fill(nxx1,nyy1,'r');
fill(nxx2,nyy2,'m');
fill(nxx3,nyy3,'c');
fill(nxx4,nyy4,'y');
fill(mdesl_C(:,1),mdesl_C(:,2),'g')
plot(xx1,yy1,'k',xx2,yy2,'k',xx3,yy3,'k',xx4,yy4,'k',xxw,yyw,'b',nPx_C,
nPy_C,'k:',xdivisoes_C,nyforca_C,'k--',xdivisoes_M,nyforca_M,'k')
axis([xx1(1)-20,xx1(end)+20,0,yy1(end)+20]);
axis equal
axis off
zoom
end

if MCorreia==1;
fprintf('MÉTODO DE CORREIA:\n\n')
disp(['          Factor de Segurança mínimo obtido: ',num2str(FSmin_C)])
fprintf('\n')
disp(['          Valor de Xmax correspondente ao Factor de Segurança mínimo
obtido: ',num2str(nXmax)])
fprintf('\n')
disp(['          Número de iterações realizadas: ',num2str(niter_C)])
fprintf('\n')

if INFdet==1
disp('-----')
disp('INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR OBTIDA PELO MÉTODO DE CORREIA')
disp('-----')

```

```

        fprintf('\n')
        fprintf('A superfície que conduziu ao Factor de Segurança mínimo foi
a n° %g;\n\n',supFSmin_C)
        fprintf('\n')
        disp(['      Sup n°      ', '      Xc      ', '      Yc      ', '      R      ', '      Psi
      ', '      DeltaFS      ', '      FS      ', '      Xmax'])];
        disp(resparcCorreia)
        fprintf('\n')
        disp('Resultados das forças para o Método de Correia')
        fprintf('\n')
        disp('      Fatia      X1      E1      X2      E2      N
      U      S      xx1      yy1      xx2      yy2 ')
        fprintf('\n')
        disp([nfatias_C, rX1_C, rE1_C, rX2_C, rE2_C, rN_C, rU_C, rS_C, rx1FI_C,
      ry1FI_C,
      rx2FI_C, ry2FI_C])
        fprintf('\n')

        disp('-----')
        disp('INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR RELATIVA À SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO,
OBTIDA PELO MÉTODO DE CORREIA')
        disp('-----')
        fprintf('\n')
        fprintf('Coordenadas que definem as fatias:\n\n')
        disp('      Fatia      X1      X2      Y1base      Y2base
      Y1topo      Y2topo      Xm      Ymbase')
        fprintf('\n')
        disp([nfatias_C, xdivisoes_C(1:end-1),
      xdivisoes_C(2:end), nyyfati_C(1:end-1), nyyfati_C(2:end),
      nyylfati_C(1:end-1), nyylfati_C(2:end), xmbase_C, ymbase_C])
        fprintf('\n')
        fprintf('Dados Sobre as fatias:\n\n')
        disp('      Fatia      Dx      sen alf.      cos alf.      tg phi      Coesao
      Pesofat.      U      H.fatia')
        disp('      (m)
      (Kn)      (KPa)      (m) ')
        fprintf('\n')
        disp([nfatias_C, deltxx_C, salfa_C, calfa_C, tgfi_C, coesao_C, pesofati_C,
      pressneut_C, altfati_C])
        fprintf('\n')
    end
end

if MMorgenstern==1;
    fprintf('MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE:\n\n')
    disp(['      Factor de Segurança mínimo obtido: ', num2str(FSmin_M)])
    fprintf('\n')
    disp(['      Valor de Lambda correspondente ao Factor de Segurança
mínimo obtido: ', num2str(nlamb)])
    fprintf('\n')
    disp(['      Número de iterações realizadas: ', num2str(niter_M)])
    fprintf('\n')

    if INFdet==1;
        disp('-----')
        disp('INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR OBTIDA PELO MÉTODO DE MORGENSTERN-
PRICE')
        disp('-----')
    end
end

```

```

fprintf('\n')
fprintf('A superfície que conduziu ao Factor de Segurança mínimo
foi a nº %g;\n\n',supFSmin_M)
fprintf('\n')
disp(['      Sup nº      ' Xc      ' Yc      ' R      '
      D.Lambda      ' DeltaFS      ' FS      ' Lambda']);
disp(resparcMorg)
fprintf('\n')
disp('Resultados das forças para o Método de Morgenstern-Price')
fprintf('\n')
disp('      Fatia      X1      E1      X2      E2      N
      S      xx1      yy1      xx2      yy2 ')
fprintf('\n')
disp([nfatias_M, rX1_M, rE1_M, rX2_M, rE2_M, rN_M, rU_M, rS_M, rx1FI_M,
      ry1FI_M,
      rx2FI_M, ry2FI_M])
fprintf('\n')

disp('-----')
disp('INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR RELATIVA À SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO,
OBTIDA PELO MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE')
disp('-----')
fprintf('\n')
fprintf('Coordenadas que definem as fatias:\n\n')
disp('      Fatia      X1      X2      Ylbase      Y2base      Yltopo
      Y2topo      Xm      Ymbase')
fprintf('\n')
disp([nfatias_M, xdivisoes_M(1:end-1), xdivisoes_M(2:end),
      nyfatia_M(1:end-1), nyfatia_M(2:end), nyylfatia_M(1:end-1),
      nyylfatia_M(2:end), xmbase_M, ymbase_M])
fprintf('\n')
fprintf('Dados Sobre as fatias:\n\n')
disp('      Fatia      Dx      sen alf.      cos alf.      tg phi      Coesao
      Pesofat.      U      H.fatia')
disp('      (m)
      (Kn)      (KPa)      (m)')
fprintf('\n')
disp([nfatias_M, deltxx_M, salfa_M, calfa_M, tgfi_M, coesao_M,
      pesofati_M,
      pressneut_M, altfati_M])
fprintf('\n')
end
end

```


ANEXO C – ROTINA PARA O MÉTODO DE CORREIA (PROGRAMA TALUDES_Mv1)

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % % Determinação do FSegurança pelo Método de Correia

% Script para cálculo com o Método de Correia

%Calcula o factor de segurança pelo Método de Correia (rotação da massa
%deslizante no sentido dos ponteiros do relógio)

% % % Cálculo de deltaf(csi)

Dxesqxdir=xxfati(end)-xxfati(1);
difrelxx=xxfati-xxfati(1);
csirt=difrelxx/Dxesqxdir;
csirt=csirt';

% Função seno

xxpartel=csirt(csirt>=0 & csirt<=0.25);
yypartel=8*xxpartel.^2;
xxparte2=csirt(csirt>0.25 & csirt<0.75);
yyparte2=-8*(xxparte2-0.5).^2+1;
xxparte3=csirt(csirt>=0.750 & csirt<=1);
yyparte3=8*(xxparte3-1).^2;

%para cada valor de "csirt" vamos ver quanto vale a função seno;
%cada valor de "csirt" corresponde a cada divisão das fatias;

xfunf=[xxpartel xxparte2 xxparte3]; % N.B VECTOR LINHA
yfunf=[yypartel yyparte2 yyparte3]; %Função seno=f(x); N.B VECTOR LINHA

nfati=length(yfunf);
deltaf=zeros(1,nfati-1);
for ifati=1:nfati-1;
    deltaf(ifati)=yfunf(ifati+1)-yfunf(ifati);
end

% Inicialização

FSval=1;
deltaFS=1;
psif=1;
toler=1.0e-5;
iter=0;
itermax=z(1,10);

% factores auxiliares

pesofkv=pesof*(1+kv);
pesofkh=pesof*kh;
tgalfa=senalfa./cosalfa;
if EDouDE==1;
    pesofkh=-pesofkh;
    tgalfa=-tgalfa;
end

```

```
deltafx=deltaf';
tgphi=tan(phiatl*pi/180);

% Cálculo de FS

while abs(deltaFS)>toler || abs(psif)>toler;
    iter=iter+1;
    if iter==itermax;
        disp(['Método de Correia: o número máximo de iterações foi atingido
na superfície número ',num2str(isupf_C)])
        break
    end

% factores auxiliares (continuação)

fact1=tgphi-FSval*tgalfa;
fact2=FSval+tgphi.*tgalfa;
fact3=(chfatl-pneut.*tgphi).*deltax./cosalfa./cosalfa;

% cálculo de a1, a2, a3 e a4 para todas as fatias, simultaneamente

a1=deltafx.*fact1./fact2;
a2aux=(pesofkv.*fact1+fact3)./fact2;
a3=a1.*basey-deltafx.*basex;
if EDouDE==1;
    a2aux=-a2aux;
    a3=a1.*basey+deltafx.*basex;
end
a2=a2aux-pesofkh;
a4=a2.*basey;
A1=sum(a1);
A2=sum(a2);
A3=sum(a3);
A4=sum(a4);

% Cálculo de d(psi)/d(f)

daldf=(-deltafx.*tgalfa-a1)./fact2;
da2df=(-pesofkv.*tgalfa-a2aux)./fact2;
dA1dF=sum(daldf);
dA3dF=sum(daldf.*basey);
if EDouDE==1;
    daldf=-daldf;
    da2df=(pesofkv.*tgalfa-a2aux)./fact2;
    dA1dF=-dA1dF;
    dA3dF=-dA3dF;
end
dA2dF=sum(da2df);
dA4dF=sum(da2df.*basey);

% Cálculo de psi(f)

A4aux=kh*pesof.*hfati*0.5;
if EDouDE==1;
    A4aux=-A4aux;
end
A4=A4-sum(A4aux);
```

```

psif=A1*A4-A2*A3;
dPSIdF=dA1dF*A4+dA4dF*A1-dA2dF*A3-dA3dF*A2;
deltaFS=-psif/dPSIdF;
FSval=FSval+deltaFS;

% Determinação de Xmáx

Xmax=-A2/A1;
end

% Ciclo sobre as fatias para o cálculo da linha de impulso

xinic=xxfati(1);
yyesq=yy1fati(1);
FXesq=0;
FEesq=0;
yforca=zeros(1,nfati);
yforca(1)=yyesq;
X1=zeros(nfati-1,1);
E1=zeros(nfati-1,1);
X2=zeros(nfati-1,1);
E2=zeros(nfati-1,1);
N=zeros(nfati-1,1);
U=zeros(nfati-1,1);
S=zeros(nfati-1,1);
x1FI=zeros(nfati-1,1);
x2FI=zeros(nfati-1,1);

for ifati=1:nfati-1;
    % factores auxiliares

    ndeltax=ndeltax(ifati); % a letra "n" serve apenas para distinguir estas
    % novas variáveis das já existentes com o mesmo significado
    x1FI(ifati)=xinic;
    xfimfat=xinic+ndeltax;
    x2FI(ifati)=xfimfat;
    ndeltafx=ndeltafx(ifati);
    nsenalfa=nsenalfa(ifati);
    if EDouDE==1
        nsenalfa=-nsenalfa;
    end
    ncosalfa=ncosalfa(ifati);
    ntgalfa=nsenalfa/ncosalfa;
    nchfat1=chfat1(ifati);
    ntgphi=tgphi(ifati);
    fact1=ntgphi-FSval*ntgalfa;
    fact2=FSval+ntgphi*ntgalfa;
    fact3=(nchfat1-pneut(ifati)*ntgphi)*ndeltax/ncosalfa/ncosalfa;
    nbasey=basey(ifati);
    npesof=pesof(ifati);
    npesofkv=pesofkv(ifati);
    npesofkh=pesofkh(ifati);

    % Cálculo de delta X, delta E, N' e S

    deltaX=Xmax*ndeltafx;
    X1(ifati)=FXesq;

```

```

FXdir=FXesq+deltaX;
X2(ifat1)=FXdir;
deltaE=((npesofkv+deltaX)*fact1+fact3)/fact2-npesofkh;
if EDouDE==1;
    deltaE=(-npesofkv+deltaX)*fact1-fact3)/fact2-npesofkh;
end
E1(ifat1)=FEesq;
FEdir=FEesq+deltaE;
E2(ifat1)=FEdir;
forcaU=pneut(ifat1)*ndeltax/ncosalfa;
U(ifat1)=forcaU;
forcaN=(npesofkv+deltaX)*ncosalfa-(deltaE+npesofkh)*nsenalfa-forcaU;
forcaS=(npesofkv+deltaX)*nsenalfa+(deltaE+npesofkh)*ncosalfa;
yyFIdir=((FXesq+FXdir)*ndeltax*0.5+FEesq*(yyesq-nbasey)+FEdir*
nbasey-npesofkh*hfati(ifat1)*0.5)/FEdir;
if EDouDE==1;
    forcaN=(npesofkv-deltaX)*ncosalfa+(deltaE+npesofkh)*
    nsenalfa-forcaU;
    forcaS=(npesofkv-deltaX)*nsenalfa-(deltaE+npesofkh)*ncosalfa;
    yyFIdir=(-(FXesq+FXdir)*ndeltax*0.5+FEesq*
    (yyesq-nbasey)+FEdir*nbasey-npesofkh*hfati(ifat1)*0.5)/FEdir;
end
N(ifat1)=forcaN;
S(ifat1)=forcaS;

if ifati==nfati-1;
    yyFIdir=yylfati(end);
end

yforca(ifat1+1)=yyFIdir;
xinic=xfimfat;
FXesq=FXdir;
FEesq=FEdir;
yyesq=yyFIdir;
end

%%% fim do cálculo pelo Método de Correia

% Para visualização de resultados, com o ciclo seguinte vai ser guardada a
informação
% relativa à superfície que conduz a um factor de segurança menor

if FSval<FSmin_C;
    FSmin_C=FSval;
    nXmax=Xmax;
    niter_C=iter;
    nxcirc_C=xcirc;
    nycirc_C=ycirc;
    xdivisoes_C=xxfati;
    nyylfati_C=yylfati;
    nyyfati_C=yyfati;
    nPx_C=Px;
    nPy_C=Py;
    supFSmin_C=isupf_C;
    xbaseesq_C=xxfati(1:end-1);
    xbasedir_C=xxfati(2:end);
    ybaseesq_C=yyfati(1:end-1);
    ybasedir_C=yyfati(2:end);

```

```

xmbase_C=basex;
ymbase_C=basey;
nfatias_C=(1:nfati-1)';
ytopoesq_C=yylfati(1:end-1);
ytopodir_C=yylfati(2:end);
deltxx_C=deltax;
salfa_C=senalfa;
calfa_C=cosalfa;
tgfi_C=tgphi;
coesao_C=chfat1;
pesofati_C=pesof;
pressneut_C=pneut;
altfati_C=hfati;
rX1_C=X1;
rE1_C=E1;
rX2_C=X2;
rE2_C=E2;
rN_C=N;
rU_C=U;
rS_C=S;
rx1FI_C=x1FI;
rx2FI_C=x2FI;
ry1FI_C=yforca(1:end-1)';
ry2FI_C=yforca(2:end)';

nyforca_C=yforca; % para efeitos de plot
nnPx_C=flipud(nPx_C); % para definição do polígono da massa deslizando
nnPy_C=flipud(nPy_C);
mdesl_C=[xdivisoes_C nyylfati_C;nnPx_C nnPy_C];
desfati_C=[]; % para o desenho das fatias
for i=1:length(xdivisoes_C)-1;
    desfati_C=[desfati_C;xdivisoes_C(i) nyylfati_C(i);
        xdivisoes_C(i+1) nyylfati_C(i+1);
        xdivisoes_C(i+1) nyylfati_C(i+1);xdivisoes_C(i+1) nyylfati_C(i+1)];
end
end

% Impressão de resultados parciais
resparcCorreia(isupf_C,1:8)=[isupf_C xcirc ycirc raio psif deltaFS FSval
Xmax];

```