

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELO MÉTODO DE CORREIA

ANDRÉ FILIPE PEREIRA DA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor José Manuel Mota Couto Marques

Co-Orientador: Professor Doutor Manuel António de Matos Fernandes

JULHO DE 2010

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, 2010.*

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.

A meus Pais

*As ideias têm de funcionar pelos cérebros e braços de homens, senão não serão mais que
sonhos*

Ralph Emerson

AGRADECIMENTOS

Desde logo gostaria de agradecer aos meus pais pois foi com esforço e sacrifício que me possibilitaram chegar onde cheguei.

Aos meus amigos por todo o apoio e bons momentos que me proporcionaram.

Ao Bruno Mendes por ter elaborado o logótipo do programa.

À GEO-SLOPE por gentilmente me ter cedido uma licença provisória da versão mais recente do GEOSTUDIO 2007.

Aos Professores Rui Correia e Barreiros Martins por terem facultado documentos com informação complementar muito útil.

Ao Raga Candradimuka que, apesar da distância (Indonésia) e sem sequer me conhecer, prontamente aceitou em fornecer-me o algoritmo Matlab do seu programa de estabilidade de taludes, contributo decisivo que possibilitou uma familiarização mais rápida com o tipo de questões com que teria de lidar durante a elaboração do Talude_MRC.

Ao Professor Matos Fernandes por me ter iniciado no fascinante mundo da Geotecnia.

E finalmente, ao meu orientador, Prof. José Couto Marques, pela sua inteira disponibilidade, competência e acompanhamento activo, tornando a fase de realização aliciante e a conclusão uma realidade.

RESUMO

A estabilidade de taludes é uma das áreas da Engenharia Civil em que a Geotecnia tem um importante papel a desempenhar. As graves consequências em termos humanos e materiais do escorregamento de taludes naturais são infelizmente tema frequente nos meios de comunicação, em geral como resultado de condições meteorológicas ou sísmicas particularmente adversas. Os cuidados com a estabilidade deste tipo de formações devem estar igualmente presentes no projecto e construção de barragens de aterro ou de escavações e aterros para vias de comunicação.

O objectivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de um programa de análise de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite de Correia, tendo em vista dar a merecida relevância a esta metodologia, afim da proposta por Morgenstern e Price para superfícies de deslizamento de forma não necessariamente circular, mas com vantagens específicas em termos de agilidade numérica. Neste desenvolvimento procurou-se tirar partido das capacidades oferecidas pelo Matlab no que concerne quer a álgebra matricial, quer a visualização de dados e resultados.

Depois de uma apresentação geral dos métodos de análise de estabilidade de taludes, em que se tecem algumas considerações sobre as vantagens e limitações dos métodos de equilíbrio limite face às do método dos elementos finitos, são apresentadas as principais características do programa desenvolvido, intitulado TALUDE_MRC, que é aplicado na solução de vários problemas sendo os resultados obtidos comparados com os de outras fontes.

Em anexo inclui-se informação pormenorizada sobre os dados e resultados dos exemplos numéricos em questão, bem como um tutorial do programa TALUDE_MRC e respectiva listagem.

PALAVRAS-CHAVE: equilíbrio limite, estabilidade de taludes, Matlab, método de Correia, programa de análise.

ABSTRACT

Slope stability is one of the areas of Civil Engineering where Geotechnics has an important role to play. The serious consequences of landslides in human and material terms are unfortunately a frequent topic in the media, in general as a result of particularly adverse meteorological or seismic conditions. The careful consideration of the stability of this type of formation must also be present in the design and construction of embankment dams and excavation or fill works for roads or railways.

The main objective of this thesis consists in the development of a program for the analysis of slope stability by the limit equilibrium method of Correia, in order to highlight the merits of this approach, akin to that proposed by Morgenstern and Price for slip surfaces not necessarily circular, but with specific advantages in terms of numerical agility. In this development good use has been made of the capabilities offered by Matlab in what concerns both matrix algebra and the visualization of input and output data.

After a general presentation of slope stability analysis methods, in which some attention is given to the pros and cons of limit equilibrium methods with regard to those of the finite element method, the main features are presented of the program developed, named TALUDE_MRC, which is then applied to the solution of several problems whose results are compared to those provided by various sources.

In annexe is included detailed information about input and output data of the numerical examples in question, as well as a tutorial of the program and listings of its modules.

KEYWORDS: computer code, limit equilibrium, Matlab, method of Correia, slope stability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	3
2.1. GENERALIDADES	3
2.2. MÉTODOS DAS FATIAS	4
2.2.1. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE PARA SUPERFÍCIES DE ROTURA CIRCULARES	6
2.2.1.1. MÉTODO DE FELLENIUS	6
2.2.1.2. MÉTODO DE BISHOP.....	7
2.2.1.3. MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO.....	9
2.2.1.4. MÉTODO DE SPENCER.....	10
2.3. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO PARA QUALQUER TIPO DE SUPERFÍCIES DE ROTURA	11
2.3.1. MÉTODO DE JANBU	11
2.3.2. MÉTODO DE MORGENSTERN E PRICE	14
2.3.3. MÉTODO DE CORREIA	15
2.4 LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	19
2.4.1. MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE GENERALIZADO (GLE).....	19
2.4.2. SUPERFÍCIES DE ROTURA CIRCULARES	22
2.4.3. SUPERFÍCIES DE ROTURA PLANAS	22
2.4.4. SUPERFÍCIES DE ROTURA COMPOSTAS (CIRCULAR + PLANA).....	23
2.4.5. SUPERFÍCIES DE ROTURA COMPOSTAS (PLANAS).....	23
2.4.6. SUPERFÍCIES DE ROTURA COM ESTRUTURAS DE SUPORTE (CORTINA DE ESTACAS).....	24
2.4.7. MATERIAIS CONTRASTANTES	25
2.4.8. CARGAS CONCENTRADAS	26
2.4.9. PROBLEMAS DE CONVERGÊNCIA	28
2.4.10. FORÇAS EXTERIORES À MASSA DESLIZANTE	30
2.4.11. FORÇAS/ TENSÕES NORMAIS AO LONGO DA SUPERFÍCIE DE ROTURA	31
2.4.12. FORÇAS DE PERCOLAÇÃO.....	33
2.4.13. ANÁLISE INTEGRADA DO PROBLEMA.....	34

3. METODOLOGIA DE ESTUDO	35
3.1. MÉTODO	35
3.2. EXEMPLOS NUMÉRICOS	35
3.2.1. EXEMPLO 1 – TALUDE HOMOGÉNEO	36
3.2.2. EXEMPLO 2 – TALUDE HETEROGÉNEO (4 ESTRATOS)	36
3.2.3. EXEMPLO 3 – TALUDE COM UM ESTRATO DE BAIXA RESISTÊNCIA	37
3.2.4. EXEMPLO 4 – BARRAGEM DE ATERRO HOMOGÉNEA	38
3.2.5. EXEMPLO 5 – CORTINA DE ESTACAS ANCORADA	39
3.2.6. EXEMPLO 6- CASO 1 DE CORREIA	39
3.2.7. EXEMPLO 7 – CASO 2 DE CORREIA	40
3.3. COMPARAÇÃO ENTRE PROGRAMAS	40
3.4. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE (M.E.L)	41
3.4.1. COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CORREIA E MORGENSTERN – PRICE	41
3.5. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE (M.E.L) E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (M.E.F)	41
4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA TALUDE_MRC	43
4.1. GENERALIDADES	43
4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO TALUDE	43
4.3. ESTRATIFICAÇÃO DO TALUDE	44
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO	44
4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS "MALHAS" DE BUSCA DE SUPERFÍCIES POTENCIAIS DE DESLIZAMENTO	44
4.6. DISCRETIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES POTENCIAIS EM FATIAS	45
4.7. DISCRIMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES POTENCIAIS INVÁLIDAS	45
4.8. CÁLCULO DO FACTOR DE SEGURANÇA	46
4.9. ESCOLHA DA FUNÇÃO DE INTERACÇÃO TANGENCIAL	46
4.10. CARACTERIZAÇÃO TOTAL DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS NAS FATIAS.	47
4.11. INTRODUÇÃO DOS DADOS INICIAIS	48
4.12. MODIFICAÇÕES E OPTIMIZAÇÕES EFECTUADAS NO TALUDES	48
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	49
5.1. ORGANIZAÇÃO DA APRESENTAÇÃO	49
5.2. COMPARAÇÃO ENTRE PROGRAMAS E MÉTODOS	49
5.2.1. RESULTADOS (EXEMPLO 1)	49

5.2.2. RESULTADOS (EXEMPLO 2)	51
5.2.3. RESULTADOS (EXEMPLO 3)	52
5.2.4. RESULTADOS (EXEMPLO 4)	54
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE M.E.L E M.E.F.....	55
5.3.1. RESULTADOS (EXEMPLO 4) DE UMA ANÁLISE DE M.E.F. (SLOPE/W+SEEP/W+SIGMA/W)	55
5.3.2. RESULTADOS (EXEMPLO 5)	56
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CORREIA E MORGENSTERN – PRICE (M-P)	58
5.4.1. CASO 1 DE CORREIA	58
5.4.2. CASO 2 DE CORREIA	62
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
BIBLIOGRAFIA	69
ANEXO A. RESULTADOS COMPLEMENTARES (SLOPE/W, SLIDE , TALUDES E TALUDE_MRC)	71
A.1.EXEMPLO 1	71
A.2.EXEMPLO 2	79
A.3.EXEMPLO 3	86
A.4. EXEMPLO 4	89
ANEXO B. GEOMETRIA DOS EXEMPLOS NUMÉRICOS	99
B.1.EXEMPLO 1	99
B.2.EXEMPLO 2	100
B.3 -EXEMPLO 3	101
B.4. EXEMPLO 4	102
B.5. EXEMPLO 5	103
B.6. CASO 1 DE CORREIA.....	104
B.7. CASO 2 DE CORREIA.....	105
ANEXO C. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO EXEMPLO NUMÉRICO 4	107
ANEXO D. CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE SUPORTE (SLOPE/W)	109
ANEXO E. TUTORIAL TALUDE_MRC.....	111
E.1. IMPOSIÇÕES PRÉVIAS.....	112
E.2. INTRODUÇÃO DOS DADOS INICIAIS NUM FICHEIRO DE DADOS EXCEL	112
E.3. LEITURA DO FICHEIRO DE DADOS PELO MATLAB	114
E.4. EXECUÇÃO DO TALUDE_MRC	115

E.5. TEMPO DE CÁLCULO.....	116
E.6. LEITURA DE RESULTADOS.....	116
ANEXO F. TALUDE_MRCMULTIPLE (M-FILE) (ANÁLISE MÚLTIPLA DE SUPERFÍCIES)	121
ANEXO G. TALUDE_MRCSINGLE (M-FILE) (ANÁLISE DE UMA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA).....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Método das fatias – Forças aplicadas a uma fatia de solo	5
Fig.2.2 – Método de Fellenius – Forças aplicadas a uma fatia de solo	7
Fig. 2.3 - Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo	8
Fig.2.4 – Método de Spencer – Forças aplicadas a uma fatia de solo	10
Fig. 2.5 - Determinação do factor de segurança (adaptado de Spencer, 1967)	11
Fig.2.6 – Método de Janbu – Forças aplicadas a uma fatia de solo.....	13
Fig. 2.7 - Método de Morgenstern e Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo	14
Fig.2.8 - Método de Correia - Forças aplicadas cada a uma fatia de solo.....	16
Fig.2.9 – Forças actuantes numa fatia dum talude em equilíbrio limite (Krahn, 2001)	19
Fig.2.10 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ (Krahn,2001)	21
Fig.2.11 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura circulares (Krahn, 2001)	22
Fig.2.12 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura planas(Krahn,2001).....	22
Fig.2.13 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura compostas (Krahn,2001)	23
Fig.2.14 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura em bloco (Krahn,2001)	24
Fig.2.15 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura num talude estabilizado por uma cortina de estacas (Krahn,2001).....	24
Fig.2.16 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para uma situação de materiais contrastantes (muro de suporte em pedra) (Krahn,2001).....	25
Fig.2.17 – Variação da função característica das forças de interacção e respectiva influência nos factores de segurança.(Krahn,2001)	26
Fig.2.18 – Talude estabilizado através de ancoragens (Krahn,2001).....	26
Fig.2.19 – Variação das forças normais e tangenciais de interacção nos dois casos de aplicação de carga.(Krahn,2001).....	27
Fig.2.20 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura com diferentes pontos de aplicação das ancoragens (Krahn,2001)	28
Fig.2.21 – Problema de convergência devido á existência de pontos sem qualquer FS associado (Krahn,2001)	29
Fig.2.22 – Variação de m_α com a inclinação média da base das fatias (α), ângulo de atrito (ϕ') e factor de segurança.(Krahn,2001).....	30
Fig.2.23 – Superfície potencial de rotura com estrutura de suporte (cortina de estacas-prancha) para além da profundidade da base do talude(Krahn,2001).....	31

Fig.2.24 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 1)(Krahn,2001)	32
Fig.2.25 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 2)(Krahn,2001)	32
Fig.2.26 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 3)(Krahn,2001)	32
Fig.3.1 – Talude homogéneo com geometria simples.....	36
Fig.3.2 - Talude heterogéneo constituído por 4 estratos distintos.....	36
Fig.3.3 - Talude estratificado constituído por 3 estratos distintos, um pouco espesso de baixa resistência e o subjacente (roxo) é tido como "bedrock".	37
Fig.3.4 - Barragem de aterro homogénea em fase final de construção.....	38
Fig.3.5 - Barragem de aterro homogénea em serviço	38
Fig.3.6 – Esquema bidimensional de uma cortina de estacas ancorada.....	39
Fig.3.7 – Talude homogéneo com superfície de rotura previamente especificada.....	39
Fig.3.8 - Talude com 2 estratos com características mecânicas distintas, uma superfície de rotura composta previamente especificada e representação nível freático.	40
Fig.4.1 – Função de interacção tangencial (Correia 1988).....	47
Fig.5.1 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC	50
Fig.5.2 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC	52
Fig.5.3 – Superfície crítica determinada através do SLOPE/W	53
Fig.5.4 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC num processo de busca de múltiplas superfícies (resultado não satisfatório).....	53
Fig.5.5 – Superfície crítica pré-determinada e processada no TALUDE_MRC	54
Fig.5.6 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC	55
Fig.5.7 – Superfície crítica determinada através do SLOPE/W+SEEP/W+SIGMA/W e linha de saturação	56
Fig.5.8 Superfície crítica determinada através do SLOPE/W+SIGMA/W	58
Fig.5.9 – Superfície crítica analisada através do SLOPE/W	59
Fig.5.10 – Superfície crítica analisada através do TALUDE_MRC.....	59
Fig.5.11- Comparação de X obtido a partir M-P e Correia	60
Fig.5.12- Comparação de E obtido a partir M-P e Correia	60
Fig.5.13- Comparação de N obtido a partir M-P e Correia	61
Fig.5.14- Comparação de S obtido a partir M-P e Correia	61

Fig.5.15 – Superfície crítica analisada através do SLOPE/W.....	62
Fig.5.16- Comparação de X obtido a partir M-P e Correia	63
Fig.5.17- Comparação de E obtido a partir M-P e Correia	63
Fig.5.18- Comparação de N obtido a partir M-P e Correia	64
Fig.5.19 - Comparação de S obtido a partir M-P e Correia	64
Fig.5.20 - Comparação de u obtido a partir M-P e Correia.....	65
Fig.5.21 - Superfície crítica analisada através do TALUDE_MRC.....	65
Fig.A.1.1 - Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.	71
Fig.A.1.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.	71
Fig.A.1.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado	72
Fig.A.1.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)	72
Fig.A.2.1- Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.	79
Fig.A.2.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.	79
Fig.A.2.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado	80
Fig.A.2.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)	80
Fig.A.3.1- Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.	86
Fig.A.3.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.	87
Fig.A.3.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado	87
Fig.A.3.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)	87
Fig.A.4.1 - Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.	89
Fig.A.4.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price	90
Fig.A.4.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de Bishop simplificado	90
Fig.A.4.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)	91
Fig.C.1.1 – Função de condutividade hidráulica do solo homogéneo da barragem	107

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Verificação das condições equilíbrio de momentos e de forças e forças de interação consideradas nos vários métodos de equilíbrio limite (adaptado de Krahn, 2001).....	20
Quadro 2.2 – Características mecânicas dos materiais contrastantes.....	25
Quadro 3.1 - Características mecânicas do solo do Exemplo 1	36
Quadro 3.2 - Características mecânicas do solo do Exemplo 2 (de cima para baixo)	37
Quadro 3.3 - Características mecânicas do solo do Exemplo 3 (correspondendo à Fig.3.3 de cima para baixo respectivamente)	37
Quadro 3.4 - Características mecânicas do solo do Exemplo 4	38
Quadro 3.5 - Características mecânicas do solo do Exemplo 5.....	39
Quadro 3.6 - Características mecânicas do solo do Caso 1 Correia.....	40
Quadro 3.7 - Características mecânicas do solo do Exemplo 2 Correia	40
Quadro 5.1 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	50
Quadro 5.2 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	51
Quadro 5.3 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	52
Quadro 5.4 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	54
Quadro 5.5 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	56
Quadro 5.6 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos	57
Quadro 5.7 – Verificação e validação de resultados de M-P de Correia (1988).....	58
Quadro 5.8 – Verificação e validação de resultados de Correia (1988)	59
Quadro 5.9 – Verificação e validação de resultados de M-P de Correia (1988).....	62
Quadro 5.10 – Verificação e validação de resultados de Correia (1988)	62
Quadro A.1.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas	73
Quadro A.1.2 – Códigos de identificação das superfícies potenciais.....	73
Quadro A.1.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 1).....	73
Quadro A.2.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas	80
Quadro A.2.2 – códigos de identificação das superfícies potenciais no TALUDE_MRC.....	81
Quadro A.2.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 2).....	81

Quadro A.3.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas	88
Quadro A.3.2 - Códigos de identificação das superfícies potenciais	88
Quadro A.3.3 - Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 3).....	88
Quadro A.4.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas	91
Quadro A.4.2 -Códigos de identificação das superfícies potenciais	91
Quadro A.4.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 4).....	92
Quadro A.4.4 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos(fase de serviço a montante)	97
Quadro B.1.1 - Pontos característicos da geometria do talude	99
Quadro B.1.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais	99
Quadro B.1.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES	99
Quadro B.2.1 - Pontos característicos da geometria do talude	100
Quadro B.2.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais	100
Quadro B.2.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES	100
Quadro B.3.1 - Pontos característicos da geometria do talude	101
Quadro B.3.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais	101
Quadro B.3.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES	101
Quadro B.4.1 - Pontos característicos da geometria do talude	102
Quadro B.4.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais	102
Quadro B.5.1 - Pontos característicos da geometria do talude	103
Quadro B.5.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais	103
Quadro B.6.1 - Pontos característicos da geometria do talude e da superfície de rotura.....	104
Quadro B.7.1 - Pontos característicos da geometria do talude e da superfície de rotura.....	105

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b - largura da fatia [m]

c – coesão [kPa]

D- diâmetro de uma ancoragem [m]

E – força normal aplicada na interface entre fatias, módulo de young [MPa]

f(x) – função representativa das forças de interacção

FS ou F – factor de segurança

FS_m – factor de segurança associado à equação de equilíbrio de momentos

FS_f - factor de segurança associado à equação de equilíbrio de forças

h – altura da fatia [m]

h_i – altura de uma estrato numa superfície de rotura [m]

l – comprimento da base da fatia [m]

K_a – coeficiente de impulso activo

K_p – coeficiente de impulso passivo

K₀ – coeficiente de impulso de repouso

k_h – coeficiente de permeabilidade horizontal [m/s]

k_v - coeficiente de permeabilidade vertical [m/s]

K_{ratio} - quociente entre coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical

m_a – denominador da expressão associada ao cálculo da força normal na base das fatias

M_r – momento resistente [kN/m]

M_s - momento solicitante [kN/m]

N – reacção normal na base das fatias [kPa]

s – espaçamento entre ancoragens

S ou T – tensões de corte mobilizadas na base das fatias [kPa]

r- raio da circunferência [m]

u – pressão intersticial [kPa]

W- peso próprio das fatias [kN]

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

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

y(x) – função característica da superfície de rotura

y'(x) – função característica da linha de pressão ou impulso

α – inclinação da base de uma fatia [°]

β – inclinação do talude [°]

Δf – variação da função das forças de interacção

ΔE – variação da força normal na interface entre fatias

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

γ – peso volúmico do solo [kN/m³]

γ_w - peso volúmico da água [kN/m³]

λ – factor adimensional utilizado no método Morgenstern-Price

σ_n – tensão normal aplicada base da fatia [kPa]

τ_r – resistência ao corte do solo

ϕ – ângulo de atrito do solo [°]

θ – inclinação da resultante das forças no método de Spencer [°]

ξ – coordenada horizontal adimensional das funções de interacção de forças

M.E.L – método de equilíbrio limite

M.E.F – método dos elementos finitos

M-P – Morgenstern-Price

MRC – Método de Rui Correia

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional, conjugado com as crescentes necessidades das populações satisfazerem as suas exigências ao nível da habitação, vias de comunicação e serviços, provocaram a ocupação de áreas que outrora eram evitadas devido às suas condições geotécnicas desfavoráveis nomeadamente as que estão associadas a problemas de estabilidade de taludes. Sendo uma questão frequentemente mediatizada devido a acidentes graves com consequências devastadoras para as populações, por outro lado também se trata de uma situação comum e de análise corrente em actividades como construção de barragens de aterro, estabilização de encostas ou escavações e aterros para execução de vias de comunicação.

A estabilidade dos taludes naturais depende de uma série de factores: a topografia, a geologia, a hidrogeologia, o clima, sismos ou até a própria acção humana. Nenhum deles se pode apontar isoladamente como responsável único pela instabilidade, que resulta em geral da combinação de diversos factores, o que também alerta para o grau de incerteza elevado associado.

A recorrência e a necessidade de respostas eficazes e económicas gerou desenvolvimentos significativos na forma como foram abordados os problemas de estabilidade de taludes desde os anos 30 do século passado, com maior ênfase após aparecimento do computador e as possibilidades que o cálculo automático abriu.

As últimas décadas ficaram marcadas pela evolução dos métodos clássicos de equilíbrio limite para estabilização de taludes, que ainda hoje são tidos em conta, embora os métodos computacionais tenham tornado evidentes as limitações destes, bem como permitido a aplicabilidade de outros.

Os estudos para além de determinados pressupostos teóricos tomados em cada método, também têm em vista os resultados de inúmeras observações do comportamento de taludes, possibilitando assim uma maior aproximação à realidade do terreno com vista a aumentar o nível de segurança dos maciços terrosos e a fiabilidade das soluções implementadas.

O trabalho que se apresenta está estruturado em três partes distintas. Na primeira é feita uma revisão geral dos métodos clássicos e do método de Correia (1988), visto serem a base de estudo de todo o trabalho, tendo este último método sido incorporado no programa desenvolvido no âmbito desta tese. Serão ainda referidas as limitações associadas aos mesmos, tal como as formas de as contornar. Seguidamente serão expostas as fases essenciais da elaboração do programa desenvolvido em Matlab. E, numa última fase, serão comparados os resultados obtidos em exemplos pré-definidos, através dos métodos de equilíbrio limite, com especial realce para métodos rigorosos como Morgenstern-Price (1965) e Correia (1988), disponíveis em diversos programas comerciais, como o SLOPE/WTM (da Geo-slope) e o SLIDETM (da Rocscience), e programas académicos abertos, como o TALUDES e o programa elaborado no contexto deste trabalho, designado por TALUDE_MRC.

2

MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

2.1. GENERALIDADES

Analicamente existem formas distintas de um engenheiro abordar este tipo de problemas e, evidentemente, que acabam por ganhar supremacia aquelas que cumprirem requisitos de segurança, aplicabilidade e rapidez.

Como este tipo de situações são muito diversas, a generalização torna-se perigosa e difícil de concretizar porque se trata de um assunto extenso e que pode ter imensas ramificações muito complexas. É portanto importante organizar desde já os conceitos básicos que suportam este tipo de análises.

Existem basicamente dois tipos de abordagens possíveis para a análise de estabilidade dum talude, sendo uma baseada nas relações tensão-deformação dos materiais e a outra baseada no conceito de equilíbrio limite.

A primeira pode ser mais realista, mas é ao mesmo tempo mais complexa, porque apesar de traduzir na modelação um comportamento mecânico mais compatível com a realidade, também é verdade que isso é possível para casos como taludes de aterro em que o material constitutivo é normalmente controlado. O mesmo já não se poderá dizer dos taludes naturais que apresentam incertezas quanto à geologia, estratigrafia, hidrogeologia e características mecânicas dos materiais, acabando por aumentar a complexidade e a incerteza dos resultados. Outro aspecto importante, é que a avaliação de segurança não é feita através de factores de segurança mas sim através da análise das distribuições de tensões e deformações no interior do talude, algo que também toma contornos complexos dada a variabilidade das características mecânicas dos materiais.

Perante tal cenário é normal recorrer-se à segunda abordagem, através de métodos de equilíbrio limite, que para além da simplicidade de aplicação e elevada experiência acumulada ao longo dos anos, confinam a incerteza dos parâmetros resistentes aos da resistência ao corte.

A avaliação da estabilidade dum talude por um método de equilíbrio limite consiste em determinar se ao longo de qualquer superfície responsável por levar o talude à rotura a resistência ao corte máxima é ou não superior à resistência mobilizada para garantir o equilíbrio. O quociente entre a resistência ao corte máxima e a resistência mobilizada define o factor de segurança do talude.

Os métodos de equilíbrio limite podem distinguir-se quanto à forma da superfície de rotura dos taludes:

- Superfície de rotura plana (taludes infinitos, instabilização por blocos)

- Superfície de rotura circular (método de Fellenius (1936), métodos de Bishop (1955) e Bishop simplificado, método de Spencer (1967))
- Qualquer tipo de superfície de rotura (método de Janbu (1954), método de Morgenstern-Price (1965) e método de Correia (1988)).

Os métodos de cálculo podem ainda ser divididos em dois outros grandes grupos conforme o modelo constitutivo que rege o comportamento do maciço, ou seja, os que tratam as massas terrosas como sistemas de corpos rígidos ou como corpos regidos pelo modelo elastoplástico.

Os primeiros são associados aos estudos efectuados nos métodos de equilíbrio limite de superfície de rotura circular, inserindo-se nas metodologias clássicas da Mecânica dos Solos onde o objectivo principal é a obtenção da solitação crítica responsável pelo colapso, relegando o estado de tensão e deformação para segundo plano e simplificando assim certos aspectos, o que permite chegar a uma solução aproximada e razoável, comprovada pela experiência acumulada.

Já os modelos elástico-plásticos tomaram maior importância com o desenvolvimento dos métodos numéricos e o aparecimento de meios de cálculo automático mais poderosos, sem os quais a sua aplicação seria impossível. Este tipo de abordagem trata o equilíbrio em termos infinitesimais (tensões e deformações) conduzindo a equações diferenciais cuja resolução aproximada por métodos numéricos permite tratar geometrias complicadas e heterogeneidades naturais.

É em seguida feita uma revisão dos métodos de equilíbrio limite aplicados à estabilidade de taludes. Só serão expostos os métodos para superfícies de rotura circular e não circular ou arbitrária, tanto pelo seu interesse histórico como científico, de modo a explicitar os conceitos básicos e as suas diferenças e ir de encontro também ao objectivo principal do trabalho que é o de comparar resultados de métodos rigorosos como os de Morgenstern-Price e Correia.

2.2. MÉTODOS DAS FATIAS

Os métodos mais utilizados na análise de estabilidade de taludes são aqueles que dividem em fatias a massa de solo acima da superfície potencial de deslizamento. Essa subdivisão é feita segundo planos verticais, que podem estabelecer diferentes larguras das fatias. Aplica-se também aos casos heterogéneos desde que se atribua à base de cada fatia um só conjunto de parâmetros de resistência. A resistência ao corte de cada fatia é, assim, descrita de forma independente das restantes.

A base de cada fatia é representado por um segmento de recta, em vez de uma curva, de forma a simplificar a quantificação do peso próprio, e a sua inclinação deve ser igual à inclinação média da base da fatia. Obviamente que o erro assim introduzido será tanto menor quanto menor for a largura das fatias utilizadas na análise.

O factor de segurança (FS) do talude é definido pelo quociente entre o momento resistente total (M_r) (dependente da coesão c' e componente atrítica ϕ') e o momento instabilizador (M_s), ambos considerados em relação ao centro da superfície circular de deslizamento

$$FS = \frac{M_r}{M_s} \quad (2.1)$$

O factor de segurança é igual para todas as fatias o que implica a existência de interacção entre elas.

Para uma melhor compreensão do problema considere-se então o talude da Fig.2.1 cuja estabilidade será analisada pelo método das fatias, com um arco de circunferência de raio r e centro O . A massa de solo está dividida em fatias verticais, genericamente de largura b e altura h (medida a meio da fatia), fazendo a tangente ao ponto médio da base um ângulo α com a horizontal. As forças que actuam numa fatia (por unidade de comprimento na normal à secção) são também apresentadas na referida figura.

Na base da fatia estão aplicadas as forças normal N e tangencial T . A força N decompõe-se numa força normal efectiva N' (igual a $\sigma'_n l$) e noutra, $u.l$, resultante da pressão intersticial u , sendo l o comprimento da base. A força T é a força de corte mobilizada na base, dada por:

$$T = \frac{\tau_r}{FS} \cdot l \quad (2.2)$$

Sendo τ_r a resistência ao corte na rotura.

Em termos de tensões efectivas T fica sob a forma:

$$T = \frac{c'}{FS} l + (N - ul) \frac{\tan \phi}{FS} \quad (2.3)$$

Nas interfaces entre fatias estão aplicadas as forças de interacção normais, E_n e E_{n+1} e tangenciais ou de corte X_n e X_{n+1} . É preciso ter em conta também o peso próprio de cada fatia, $W = \sum \gamma_i b h_i$, para taludes estratificados, onde γ_i e h_i são o peso volúmico e altura de cada estrato, respectivamente, existentes na superfície de rotura.

Para além do peso próprio também devem ser tidas em conta, se for o caso, acções sísmicas, sobrecargas no topo do talude, acções estabilizadoras promovidas por pregagens ou ancoragens ou por exemplo acção da água na parte montante de uma barragem de aterro.

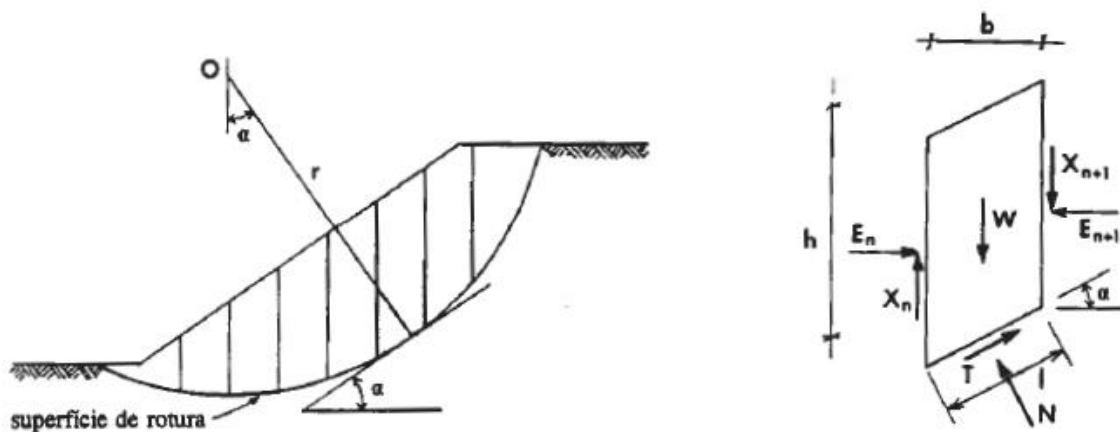


Fig. 2.1- Método das fatias – Forças aplicadas a uma fatia de solo

Através do equilíbrio de momentos em torno de O tem-se que o somatório dos momentos provocados pelas forças de corte T deve igualar o momento proporcionado pelo peso da massa de solo. Assim, em qualquer fatia o braço de W é $r \sin \alpha$, tendo-se:

$$\Sigma Tr = \Sigma W r \operatorname{sen} \alpha \quad (2.4)$$

donde se obtém

$$FS = \frac{\Sigma T_{rI}}{\Sigma W \operatorname{sen} \alpha} \quad (2.5)$$

Em termos de tensões efectivas, a expressão geral do factor de segurança toma a seguinte forma:

$$FS = \frac{\Sigma(c' + (N - ul)\tan\phi')}{\Sigma W \operatorname{sen} \alpha} \quad (2.6)$$

O problema é estaticamente indeterminado uma vez que para $3n$ equações de equilíbrio existem $4n-2$ incógnitas, ou seja, existem mais incógnitas que equações para $n > 2$. Em termos físicos isto traduz-se pelo facto de as fronteiras laterais entre fatias não serem superfícies de rotura, logo a relação entre as forças X e E não é determinada pelo critério de Mohr-Coulomb. É pois necessário estabelecer certas hipóteses quanto aos seus valores e pontos de aplicação porque doutro modo a indeterminação destas incógnitas impossibilita a quantificação de N e posteriormente do FS .

Para a resolução serão introduzidas simplificações que conduzirão nalguns métodos a que seja satisfeito o equilíbrio de forças ou então de momentos, enquanto noutros será satisfeito o equilíbrio completo. Estes últimos serão os mais pertinentes para o desenvolvimento deste trabalho. As simplificações referidas quanto à relação entre as duas forças de interacção entre fatias, X e E , e o seu ponto de aplicação são o que distingue os vários métodos que em seguida se apresentam.

2.2.1. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE PARA SUPERFÍCIES DE ROTURA CIRCULARES

Em taludes com características mecânicas homogêneas e sem discontinuidades marcadas a experiência indica que os escorregamentos aparentam a forma de uma concha, que por simplificação adoptada pelos investigadores deste tipo de fenómenos se traduziu num arco de circunferência. Este pressuposto permitiu que a estabilidade do talude pudesse ser avaliada através do equilíbrio de momentos em relação ao centro da superfície de rotura, sendo os braços das forças normais a esta nulos e os das forças de corte constantes.

É de referir que a simplificação introduzida e a natureza bidimensional do estudo conduzem a resultados do factor de segurança conservativos porque só é analisada a superfície crítica, sendo desprezado o efeito tridimensional da resistência mobilizada nas extremidades laterais da concha de deslizamento.

2.2.1.1. MÉTODO DE FELLENIUS

Neste método, apresentado por Fellenius em 1936, as forças X e E de interacção entre fatias são paralelas à base da fatia, ou seja:

$$X_{n+1}/E_{n+1} = X_n/E_n = \tan \alpha \quad (2.7)$$

As forças aplicadas a cada fatia são então indicadas na Fig.2.2. Fazendo a projecção das forças na direcção perpendicular à base da fatia tem-se:

$$N=W \cos \alpha \quad (2.8)$$

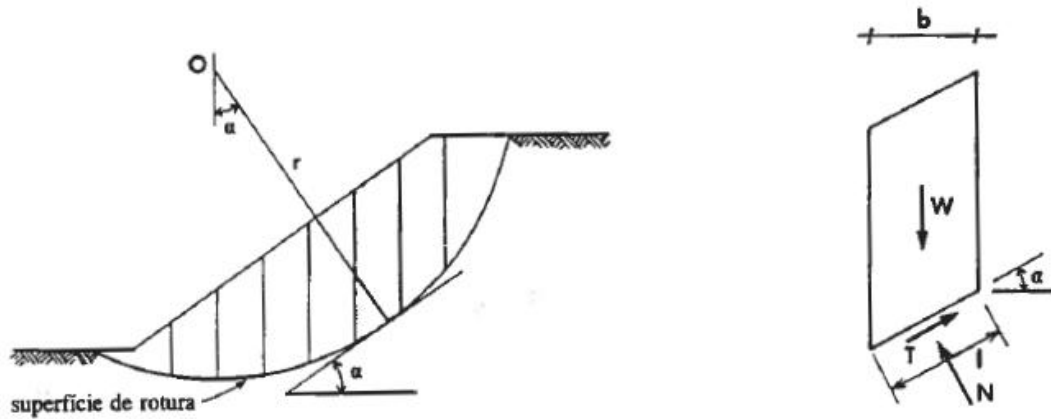


Fig.2.2 – Método de Fellenius – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O factor de segurança em termos de tensões efectivas, obtido da expressão geral já apresentada, é:

$$FS= \frac{1}{\sum W \text{ sen} \alpha} \sum [c' + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi'] \quad (2.9)$$

Atendendo à hipótese admitida da resultante das forças de interacção, o equilíbrio na direcção paralela à base de cada fatia não é satisfeito. Portanto, é fácil inferir que o factor de segurança se encontra subestimado, sendo o erro obtido, relativamente a métodos mais precisos como Morgenstern-Price, de cerca de 5% a 20%.

2.2.1.2. MÉTODO DE BISHOP

O método apresentado por Bishop em 1955 foi o primeiro método rigoroso capaz de analisar superfícies de ruptura circulares em solos friccionais e coesivos. É também um método baseado no método das fatias, no entanto o equilíbrio completo em termos de forças e momentos é verificado.

As forças consideradas aplicadas a cada fatia são indicadas na Fig.2.3. Fazendo o somatório das forças verticais para obter o equilíbrio de uma fatia, tem-se:

$$W + (X_{n+1} - X_n) = N \cos \alpha + T \text{ sen} \alpha \quad (2.10)$$

onde

$$T = \frac{c'}{FS} l + (N - ul) \frac{\tan \phi}{FS} \quad (2.11)$$

Assim tem-se que :

$$N-ul = \frac{W + (x_{n+1} - X_n) - \frac{c'l \operatorname{sen} \alpha}{FS} - ul \operatorname{cosec} \alpha}{\operatorname{cosec} \alpha + \frac{\tan \phi' \operatorname{sen} \alpha}{FS}} \quad (2.12)$$

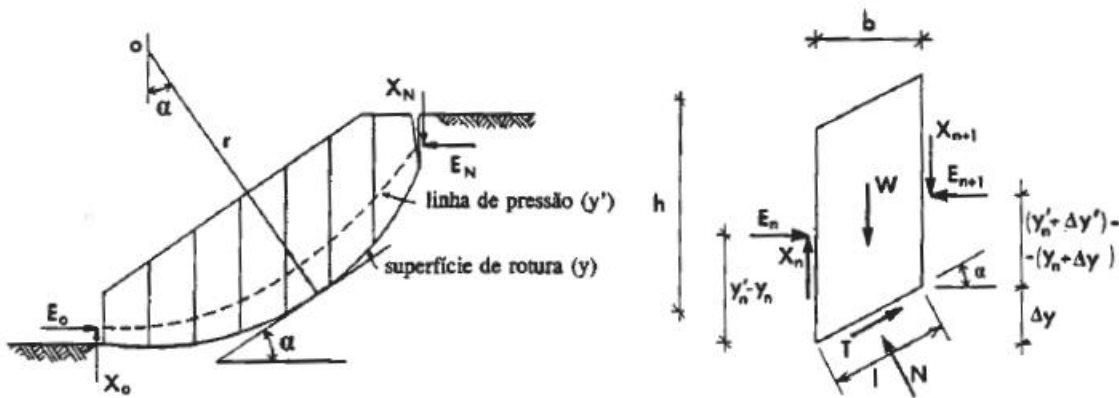


Fig.2.3 - Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo

Fazendo $l = b \cdot \operatorname{sec} \alpha$ e considerando a pressão intersticial através do parâmetro $r_u = u/\gamma h = ub/W$ e substituindo na expressão geral do factor de segurança vem:

$$FS = \frac{1}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \times \sum \left[c'b + (W(1-r_u) + (x_{n+1} - x_n)) \tan \phi' \right] \frac{\operatorname{sec} \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{FS}} \quad (2.13)$$

Para que o equilíbrio interno seja satisfeito e admitindo a inexistência de água em eventuais fendas de tracção, as forças internas devem satisfazer as seguintes condições fronteira:

$$\sum (X_{n+1} - X_n) = X_0 - X_N \quad (2.14)$$

$$\sum (E_{n+1} - E_n) = E_0 - E_N \quad (2.15)$$

Assumindo estes pressupostos o equilíbrio de forças e momentos fica garantido se forem considerados valores apropriados de X_i . Caso contrário, o equilíbrio completo não será satisfeito.

O equilíbrio de momentos para cada fatia (não considerado para a obtenção da solução final do factor de segurança) permitirá determinar a linha de aplicação das forças entre fatias, também designada por linha de pressão. Contudo, para estabelecer esta equação é necessário admitir o ponto de aplicação de

N, tendo sido escolhido o centro da base da fatia, onde também é aplicado o peso próprio respectivo. Perante as circunstâncias, no somatório de momentos relativamente ao centro da base de cada fatia, as contribuições de W e N são nulas.

A condição de equilíbrio de momentos depende de $y(x)$ e $y'(x)$ como se pode perceber pela Fig.2.3, onde a primeira é uma função representativa da superfície de rotura enquanto a segunda traduz matematicamente a localização de linha de pressão.

A sucessão dos cálculos fatia a fatia levará a que passem a ser conhecidas quer a superfície de rotura, quer a linha de pressão. Todavia, existe um número infinito de hipóteses para os valores de X_i que satisfazem o equilíbrio completo mas que nem sempre conduzem a soluções razoáveis. Logo é importante verificar a validade das soluções, como por exemplo garantir que a linha de pressão se encontra no interior da massa deslizando.

Bishop constatou, porém, que apesar de existirem inúmeras soluções para o problema, a variação dos factores de segurança é insignificante.

2.2.1.3. MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

Bishop propôs uma simplificação para o método anteriormente apresentado que consiste em considerar que as forças de interacção entre fatias são horizontais, pelo que:

$$X_{n+1} - X_n = 0 \quad (2.16)$$

e fazendo o somatório de forças verticais tem-se:

$$W = N \cos \alpha + T \operatorname{sen} \alpha \quad (2.17)$$

donde se tira:

$$N - ul = \frac{W - \frac{c' \operatorname{sen} \alpha}{FS} - ul \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \operatorname{sen} \alpha}{FS}} \quad (2.18)$$

Fazendo $l = b \sec \alpha$, tomando r_u e substituindo na expressão geral do factor de segurança vem:

$$FS = \frac{1}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \times \sum \left[\left[c' b + W(1 - r_u) \tan \phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{FS}} \right] \quad (2.19)$$

O método de Bishop Simplificado ou Modificado não permite a determinação directa do factor de segurança devido ao facto de este surgir em ambos os membros da equação (2.19). É pois necessário utilizar um processo iterativo para obter a solução sendo contudo a convergência bastante rápida. O erro associado é reduzido relativamente a métodos mais precisos e raramente excede os 7%, sendo até na maioria dos casos inferior a 2%.

2.2.1.4. MÉTODO DE SPENCER

Spencer apresentou em 1967 um método de análise de superfícies de deslizamento circulares, o qual satisfaz tanto o equilíbrio de momento como o de forças, tomando como paralelas as resultantes das forças de interacção aplicadas a cada fatia.

Neste método as forças X e E actuantes nos dois planos verticais que limitam uma fatia são substituídas por uma resultante estaticamente equivalente, Q , actuante no ponto médio da base da respectiva fatia tal como W , N e T (ver Fig. 2.4).

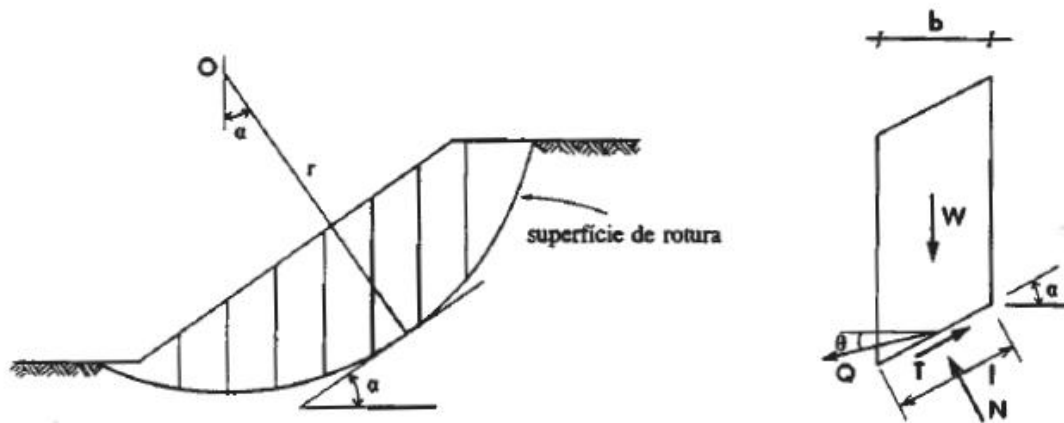


Fig.2.4 – Método de Spencer – Forças aplicadas a uma fatia de solo

Os somatórios de forças na direcção normal e paralela à base de cada fatia conduzem, respectivamente, às seguintes equações de equilíbrio de forças:

$$N - W \cos \alpha + Q \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad (2.20)$$

$$T - W \sin \alpha + Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (2.21)$$

onde θ é a inclinação da resultante Q em cada fatia.

A manipulação das expressões juntamente com o critério de rotura adoptado leva a uma resultante Q com a seguinte forma:

$$Q = \frac{\frac{c'l}{FS} + \frac{(W \cos \alpha - ul) \tan \phi'}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[1 + \frac{\tan \phi' \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right]} \quad (2.22)$$

Se a soma dos momentos das forças exteriores em relação a um ponto arbitrário for nula, o mesmo sucede quanto à soma dos momentos das forças de interacção relativamente a esse centro de rotação, isto é:

$$\sum Q \cdot r \cdot \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (2.23)$$

onde r é o raio da superfície de deslizamento.

A partir das hipóteses:

- O raio r é constante
- As forças exteriores ao talude estão em equilíbrio, logo a soma vectorial das forças de interacção é nula
- As resultantes das forças de interacção são paralelas, logo θ_i é sempre constante

obtem-se:

$$\Sigma Q=0 \quad (2.24)$$

A solução final pode então ser obtida do seguinte modo:

- Escolhem-se vários valores de θ
- Para cada valor de θ determina-se um FS para o equilíbrio de forças (FS_f) e equilíbrio de momentos (FS_m)
- Traçar curvas de variação de FS_f e FS_m com θ , onde a intersecção de ambas identifica o FS comum e a inclinação da forças de interacção que satisfazem o equilíbrio
- Cálculo das forças de interacção de cada fatia X e E
- Estabelecer o equilíbrio de momentos em relação ao ponto médio da base de cada fatia, sendo assim possível determinar o ponto de aplicação dessas forças de interacção.

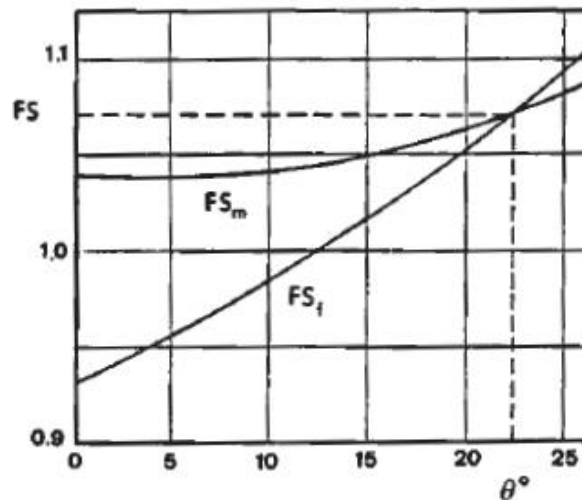


Fig.2.5- Determinação do factor de segurança (adaptado de Spencer, 1967)

2.3. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE PARA QUALQUER TIPO DE SUPERFÍCIES DE ROTURA

Se a resistência ao corte não for uniforme no talude, o que na realidade é o mais usual, então a superfície crítica não será necessariamente circular, passando a depender da forma como a resistência ao corte se distribuiu em profundidade. De facto, na maioria dos casos a geometria da superfície crítica é condicionada pela existência de estratos de baixa resistência, por vezes de reduzida espessura, portanto a adopção de superfícies circulares pode proporcionar resultados enganadores.

A análise de estabilidade adoptada nestas situações é também realizada pelo método das fatias, embora seja mais complexa que a análise de superfícies circulares. Tal fica a dever-se ao facto de qualquer que seja o ponto em relação ao qual se expressem as equações de momentos, é sempre

necessário considerar as forças normais à base das fatias, pois o braço do momento deixa de ser nulo, e o braço do momento das forças de corte deixa de ser constante.

Tal como acontecia com os métodos com directriz circular, também aqui o problema é indeterminado, sendo necessário assumir algumas hipóteses para que se possa definir o factor de segurança associado ao talude. São essas mesmas hipóteses que constituem a principal diferença entre os vários métodos de análise.

2.3.1 MÉTODO DE JANBU

O método apresentado por Janbu em 1954 permite fazer a análise de estabilidade de um talude admitindo superfícies de rotura com qualquer formato. O procedimento baseia-se em equações diferenciais, as quais comandam o equilíbrio de forças e momentos da massa acima da superfície adoptada.

O equilíbrio de momentos é considerado em relação ao ponto médio da base de cada fatia, de largura infinitesimal, dx , (ver Fig.2.6) tornando desde logo as contribuições do peso, dW , e força normal dN , nulas, porque ambas actuam nesse mesmo ponto.

À semelhança do Método de Bishop o equilíbrio de momentos é dado por:

$$E_n \left[(y'_n - y_n - \frac{dy}{2}) \right] - (E_n + dE) \left[(y'_n + dy') - (y_n + dy) + \frac{dy}{2} \right] + X_n \frac{dx}{2} + (X_n + dX) \frac{dx}{2} = 0 \quad (2.25)$$

onde dE e dX são as diferenças de valores de E e X entre as duas faces da fatia, dy e dy' são as diferenças dos valores tomados pelas funções $y(x)$ e $y'(x)$ entre as duas faces da fatia. Simplificando a expressão e fazendo tender dx para 0, a expressão aproxima-se do seguinte limite:

$$E_n \frac{dy'}{dx} + \frac{dE}{dx} (y'_n - y_n) - X_n = 0 \quad (2.26)$$

O equilíbrio de forças na vertical e na horizontal para uma fatia infinitesimal conduz a:

$$dW + dX - dN \cos \alpha - dT \sin \alpha = 0 \quad (2.27)$$

$$dE + dN \sin \alpha - dT \cos \alpha = 0 \quad (2.28)$$

sendo T a força de resistência ao corte na base da fatia.

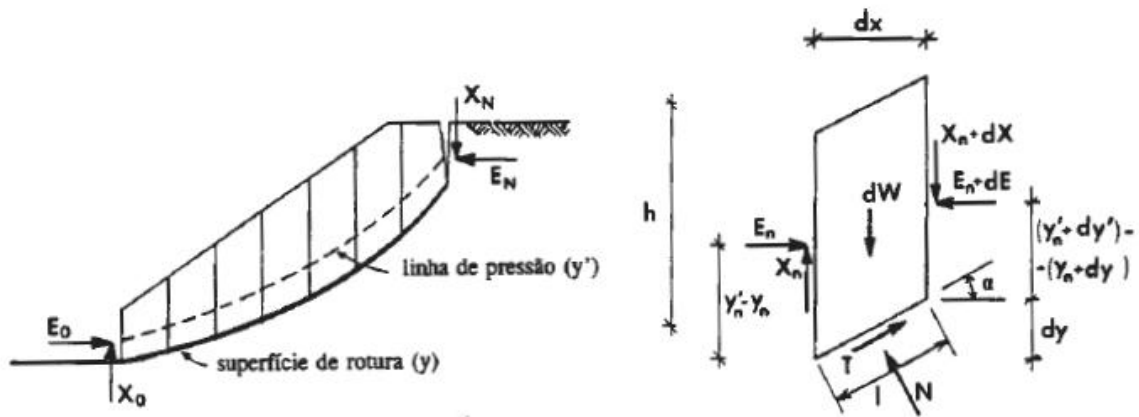


Fig.2.6 – Método de Janbu – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O equilíbrio local fica assim garantido através da verificação das equações (2.26), (2.27) e (2.28).

Quanto ao equilíbrio estático global também será necessário considerar o equilíbrio vertical, horizontal e de momento da totalidade da massa do solo.

Janbu mostrou que para existir equilíbrio global das forças verticais, o integral do diferencial das forças de corte de interação entre fatias tem que estar equilibrado com as forças de corte aplicadas nas fronteiras da massa de solo. Analogamente, passa-se o mesmo com o equilíbrio global das forças horizontais, ou seja:

$$\int dX = X_0 - X_n \quad (2.29)$$

$$\int dE = E_0 - E_n \quad (2.30)$$

O equilíbrio de momentos encontra-se automaticamente satisfeito quando se considera o equilíbrio local de cada fatia, incluindo as extremas.

A manipulação das diversas equações traduz-se na seguinte expressão do factor de segurança:

$$FS = \frac{1}{E_0 - E_n + \sum (W + (X_{n+1} - X_n)) \tan \alpha} \times \sum \left[[c' \Delta x + (W + (X_{n+1} - X_n) - u \Delta x) \tan \phi'] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{FS}} \right] \quad (2.31)$$

A determinação do factor de segurança é feita da seguinte forma.

- Toma-se $X_{n+1} - X_n = 0$ para cada fatia, podendo assim obter-se da expressão (2.31) uma primeira aproximação de FS.
- Define-se uma posição para a linha de pressão e utilizando o FS obtido inicialmente chega-se a um valor aproximado para $X_{n+1} - X_n = 0$ através das expressões de equilíbrio de forças e momentos, podendo assim ser calculado um novo valor para FS.
- O processo será repetido até ser obtido um FS associado a um determinado erro de convergência admitido no processo de cálculo.

2.3.2 MÉTODO DE MORGENSTERN E PRICE

Morgenstern e Price apresentaram em 1965 um método de análise de estabilidade de taludes no qual todas as condições de equilíbrio e de fronteira são satisfeitas e a superfície de rotura pode ser de qualquer forma. Este método só é prático se for resolvido através de cálculo automático.

A aplicação do método, tal como o de Janbu, recorre a equações diferenciais que governam o equilíbrio da massa de solo acima da superfície de rotura, tomando uma equação de equilíbrio de momentos semelhante.

$$E_n \frac{dy'}{dx} + \frac{dE}{dx} (y'_n - y_n) - X_n = 0 \quad (2.32)$$

embora o equilíbrio de forças local (em cada fatia) é considerado nas direcções normal e paralela à base da fatia e não na vertical e horizontal como sucedia no método de Janbu. Assim:

$$dN - dW \cos \alpha - dX \cos \alpha + dE \sin \alpha = 0 \quad (2.33)$$

$$dT - dE \cos \alpha - dX \sin \alpha - dW \sin \alpha = 0 \quad (2.34)$$

onde a força de resistência ao corte, dT , é definida a partir do critério de rotura de Mohr-Coulomb.

$$dT = \frac{c' \frac{dx}{\cos \alpha} + (dN - u \frac{dx}{\cos \alpha}) \tan \phi'}{FS} \quad (2.35)$$

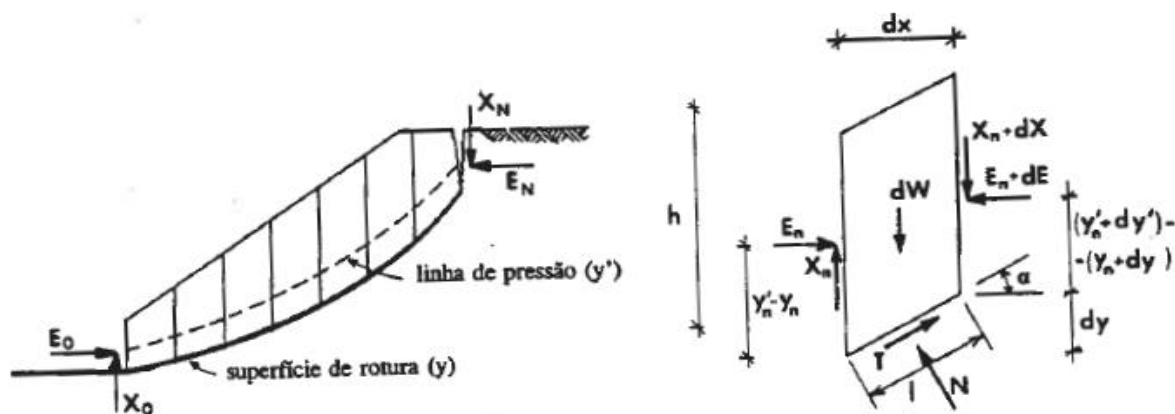


Fig.2.7 - Método de Morgenstern e Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo

Os desenvolvimentos matemáticos das expressões levam a uma segunda equação, isto é:

$$\frac{c'}{FS} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{\tan \phi'}{FS} \left[\frac{dW}{dx} + \frac{dX}{dx} - \frac{dE}{dx} \frac{dy}{dx} - u \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) \right] = \frac{dE}{dx} + \frac{dX}{dx} \frac{dy}{dx} + \frac{dW}{dx} \frac{dy}{dx} \quad (2.36)$$

onde $dy/dx = \tan \alpha$

As equações (2.35) e (2.36) são, assim, as duas equações diferenciais que governam respectivamente o equilíbrio de momentos e de forças numa fatia infinitesimal. Elas contêm contudo três incógnitas – E, X e y' - o mesmo que dizer: forças de interação e posição da linha de pressão. Tornando o problema estaticamente indeterminado.

De maneira a levantar esta indeterminação, Morgenstern e Price consideraram uma relação entre as forças de interação X e E do género:

$$X = \lambda f(x) E \quad (2.37)$$

onde $f(x)$ é uma função arbitrária descrevendo a variação do quociente entre X e E, sendo λ um factor de escala. A função $f(x)$ adoptada será aceitável se a solução final obtida for fisicamente razoável. É interessante ter em conta que fazendo $f(x)$ igual a uma constante se obtém uma formulação idêntica à do método de Spencer.

Para se obter a solução final é necessário proceder à integração das equações diferenciais referidas. Como forma de facilitar esta integração, a massa do solo é dividida em fatias de largura finita, nas quais a função f deve depender linearmente de x .

Não serão especificados os passos seguidos nesse processo de integração para não tornar esta exposição demasiado morosa. Mas se for do interesse do leitor consultar essa informação aconselha-se a leitura de *Morgenstern, N.R. Price, V.E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces*, bem como um dos subcapítulos seguintes que irá abordar mais pormenorizadamente a problemática associada às equações das forças de interação.

Assim, obter uma solução requer o arbítrio da função $f(x)$ e valores iniciais para FS e λ . Uma vez escolhidos, são integradas as equações diferenciais para cada fatia. Se as condições fronteira não forem satisfeitas, deve então escolher-se novos valores de entrada para FS e λ até que essas condições se verifiquem.

Obtida a solução final é necessário analisar a posição da linha de pressão e o valor da tensão de corte interfatias. Se algum deles for considerado não satisfatório, o procedimento deve ser repetido com uma nova função f até se atingir uma solução plausível.

2.3.3 MÉTODO DE CORREIA

O método de Correia é um método de equilíbrio limite proposto em 1988 aplicável a superfícies de escorregamento de qualquer forma. O método assegura o cumprimento total das condições de equilíbrio estático, porém ao contrário de outros métodos rigorosos como o de Morgenstern-Price, permite o cálculo do factor de segurança através de uma única equação não-linear.

A remoção da indeterminação estática representa a novidade e a diferença mais significativa relativamente a outros métodos porque se admite que a variação da força tangencial de interação, entre fatias, ao longo da massa potencialmente instável é definida por uma função de interação tangencial especificada previamente:

$$X = X_{\max} f(x) \quad (2.38)$$

onde $f(x)$ é uma função de forma análoga à usada na formulação de Morgenstern e Price e X_{\max} é um parâmetro de escala a ser calculado durante a resolução do problema.

O facto de se utilizar uma única equação não-linear é extremamente relevante porque reduz o esforço computacional e os problemas de convergência do processo iterativo.

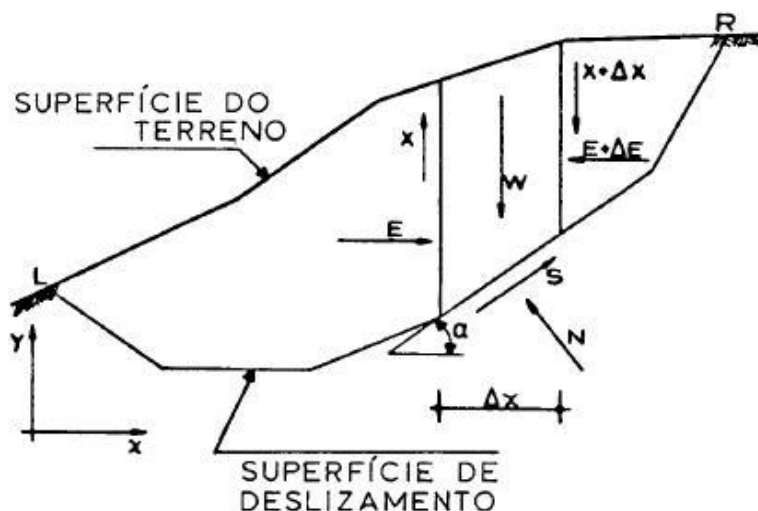


Fig.2.8 - Método de Correia - Forças aplicadas cada a uma fatia de solo

A remoção da indeterminação estática no método de Correia baseia-se, tal como em outros métodos, em hipóteses relativas à distribuição das forças de interação. Todavia, em vez da relação entre a força normal e tangencial imposta em Morgenstern-Price, o pressuposto centra-se na própria distribuição da força de interação. Há que referir que a ideia base foi introduzida pela primeira vez por Sarma (1973), se bem que de uma forma diferente.

Quanto a cuidados especiais a ter com esta função, deve ser tido em conta que esta se deve anular nos pontos de extremidade, ou seja, nos pontos L e R da superfície de deslizamento (Fig.2.8), o que implica:

$$\sum \Delta f = 0 \quad (2.39)$$

onde Δf representa a diferença entre os valores de f nos lados esquerdo e direito de cada fatia e o somatório se estende às n fatias.

O assunto das funções das forças de interação será abordado mais pormenorizadamente no subcapítulo posterior.

Na figura 2.8 pode observar-se a divisão em fatias do talude e as forças aplicadas numa fatia genérica, de onde se conclui que a componente normal da reacção na base toma a forma:

$$N = N' + u \Delta x \sec \alpha \quad (2.40)$$

Usando o critério de Mohr-Coulomb, a força tangencial na base de cada fatia é dada por:

$$S = \frac{c'}{F} \Delta x \sec \alpha + N' \frac{\tan \phi'}{F} \quad (2.41)$$

As duas condições de equilíbrio de forças para cada fatia fornecem:

$$W + \Delta X = N \cos \alpha + S \sin \alpha \quad (2.42)$$

$$\Delta E = -N \sin \alpha + S \cos \alpha \quad (2.43)$$

Através das equações (2.40), (2.41), (2.42) e (2.43) obtém-se:

$$\Delta E = \frac{(W + \Delta X) (\tan \phi' - F \tan \alpha) + (c' - u \tan \phi') \Delta X \sec^2 \alpha}{F + \tan \phi' \tan \alpha} \quad (2.44)$$

Do equilíbrio de forças, segundo a direcção horizontal, para toda a massa de terreno resulta:

$$\sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha) = \sum \Delta E = 0 \quad (2.45)$$

Tornando o equilíbrio de momentos, para toda a massa do terreno, em torno de um ponto arbitrário C, com as coordenadas x_c e y_c , obtém-se:

$$\sum (W - N \cos \alpha - \sum \text{sen} \alpha)(x - x_c) + \sum (-N \sin \alpha + S \cos \alpha)(y - y_c) = 0 \quad (2.46)$$

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

Introduzindo as equações (2.42) e (2.43) a equação (2.46) transforma-se em:

$$- \sum \Delta X (x - x_c) + \sum \Delta E (y - y_c) = 0 \quad (2.47)$$

A partir da equação (2.38) chega-se a:

$$\Delta X = X_{\text{máx}} \Delta f \quad (2.48)$$

e a partir das equações (2.39) e (2.45) chega-se a:

$$\sum \Delta f x_c = x_c \sum \Delta f = 0 \quad (2.49)$$

$$\sum \Delta E y_c = y_c \sum \Delta E = 0 \quad (2.50)$$

Agora, usando as equações (2.44),(2.48),(2.49) e (2.50), as equações (2.45) e (2.47) podem ser transformadas em:

$$A_1 X_{\text{máx}} + A_2 = 0 \quad (2.51)$$

$$A_3 X_{\text{máx}} + A_4 = 0 \quad (2.52)$$

onde A1, A2, A3, e A4 são funções de f, dadas por:

$$A_1 = \sum \Delta f \frac{\tan\phi' - F \tan\alpha}{F + \tan\phi' \tan\alpha} \quad (2.53)$$

$$A_2 = \sum \frac{W(\tan\phi' - F \tan\alpha) + (c' - u \tan\phi') \Delta E \sec^2 \alpha}{F + \tan\phi' \tan\alpha} \quad (2.54)$$

$$A_3 = \sum \Delta f \frac{\tan\phi' - F \tan\alpha}{F + \tan\phi' \tan\alpha} y - \sum \Delta f \quad (2.55)$$

$$A_4 = \sum \frac{W(\tan\phi' - F \tan\alpha) + (c' - u \tan\phi') \Delta E \sec^2 \alpha}{F + \tan\phi' \tan\alpha} y \quad (2.56)$$

A partir das equações (2.51) e (2.52) chega-se a:

$$\Psi(F) = A_1 A_4 - A_2 A_3 = 0 \quad (2.57)$$

$$X_{\text{máx}} = -\frac{A_2}{A_1} \quad (2.58)$$

O factor de segurança pode então ser obtido através da resolução numérica da equação não linear (2.57). Após a determinação de FS e $X_{\text{máx}}$ é possível determinar as forças normais e tangenciais de interacção através da formulação descrita em (2.43) e (2.38), respectivamente. É ainda possível chegar à localização da linha de impulso através da condição de equilíbrio de momentos.

Para a resolução numérica de (2.57) é sugerido por Correia o método de Newton-Raphson, com o qual a convergência é mais rápida e eficiente.

Outro dos pontos importantes a destacar na aplicação do método é a proximidade da solução final deste relativamente à oferecida por Morgenstern-Price, todavia com a vantagem de possuir um processo iterativo com apenas uma variável e com isso um menor esforço computacional de cálculo

2.4 LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

Este ponto inspira-se nos ensinamentos colhidos no interessante e abrangente trabalho de Krahn (2001).

A análise de estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite tem vindo a ser realizada correntemente nas últimas décadas devido aos resultados satisfatórios, alicerçados em anos e anos de experiência acumulada. A sua adaptação aos métodos computacionais levou a avanços significativos nesta área, passando nomeadamente a ser possível a aplicação de métodos iterativos mais complexos e também mais rigorosos, como é o caso do de Morgenstern-Price.

O universalização dos computadores pessoais impulsionou o desenvolvimento de programas comerciais baseados nestas técnicas de análise que, na actualidade, se tornaram de uso bastante comum devido ao cardápio de possibilidades que se abriu perante problemas mais complexos a nível de:

- Estratigrafia
- Variação do nível freático
- Aplicação de modelos constitutivos lineares e não lineares
- Superfícies de rotura com geometrias complexas
- Reforço de taludes através de muros de suporte, pregagens, ancoragens, entre outros
- Aplicação de sobrecargas pontuais e distribuídas.

Porém, esta exploração extrema dos métodos expôs também as suas deficiências. A aplicação destes nas condições supracitadas vão para além do âmbito para o qual foram inicialmente concebidos, dado que apenas são satisfeitas as equações de equilíbrio estático, enquanto a compatibilidade das tensões e deformações não é tida em consideração, quando na realidade se sabe que esta pode interferir significativamente no factor de segurança. Portanto, será conveniente especificar e esclarecer determinadas situações onde isso sucede.

2.4.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE GENERALIZADO (GLE)

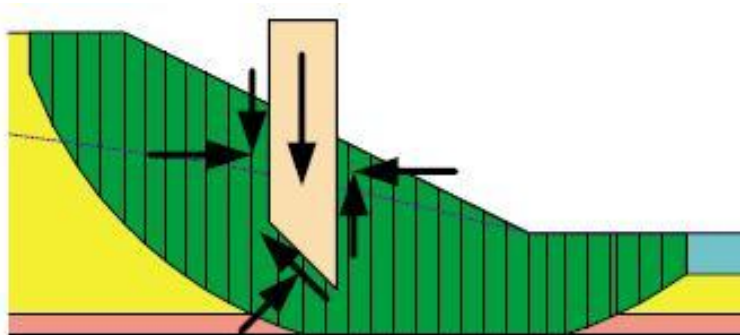


Fig.2.9 – Forças actuantes numa fatia dum talude em equilíbrio limite (Krahn, 2001)

A formulação do método de equilíbrio limite generalizado engloba os elementos chave de todos os métodos listados no Quadro 2.1 e baseia-se em dois factores de segurança, um correspondente ao equilíbrio de momentos (F_m) e outro ao equilíbrio de forças (F_f).

$$F_m = \frac{\sum [c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi']}{\sum W_x - \sum N_f \pm Dd} \quad (2.59)$$

$$F_m = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (2.60)$$

onde

D - linha de carga

β , R, x, f, d, ω - parâmetros geométricos

α - Inclinação da base da fatia

A força normal, N, toma a forma:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha \tan \phi'}{FS}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{FS}} \quad (2.61)$$

onde o denominador é designado por m_α , factor que mais tarde será discutido devido aos problemas de convergência que pode suscitar.

As forças de interacção são determinadas através da expressão sugerida por Morgenstern e Price.

$$X = \lambda f(x) E \quad (2.62)$$

Quadro 2.1 – Verificação das condições equilíbrio de momentos e de forças e forças de interacção consideradas nos vários métodos de equilíbrio limite (adaptado de Krahn, 2001)

Método	Equilíbrio de momentos	Equilíbrio de forças horizontais	Força de interacção normal (E)	Força de interacção tangencial (X)	Inclinação da resultante X/E
Fellenius	Sim	Não	Não	Não	Não existe
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Janbu	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern -Price	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

O Quadro 2.1 mostra que as grandes diferenças entre os métodos nela referidos se referem a:

- Verificação das condições de equilíbrio relativamente a momentos e forças
- Consideração das forças entre fatias (X e E)
- Relação existente entre as forças de interacção (X/E)

O método de equilíbrio limite generalizado (GLE) fornece valores para F_m e F_f em função de λ , expondo a sensibilidade daqueles à variação deste factor adimensional, como se depreende da Fig.2.10.

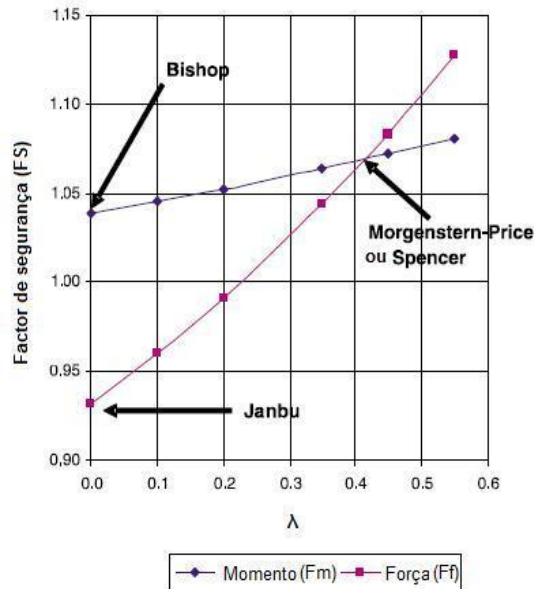


Fig.2.10 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ (Krahn, 2001)

Tal como é indicado no Quadro 2.1, o método de Bishop simplificado ignora a existência de forças tangenciais entre fatias, verificando apenas o equilíbrio de momentos, daí a variação de λ só modificar a curva correspondente a F_m . Torna-se também claro que dado o método não considerar as forças tangenciais de interacção, o respectivo factor de segurança corresponde ao valor nulo de λ .

O mesmo se pode referir quanto ao método de Janbu que também não considera as forças interacção mas só verifica o equilíbrio de forças. Logo $\lambda=0$ na curva de F_f corresponderá ao FS do método.

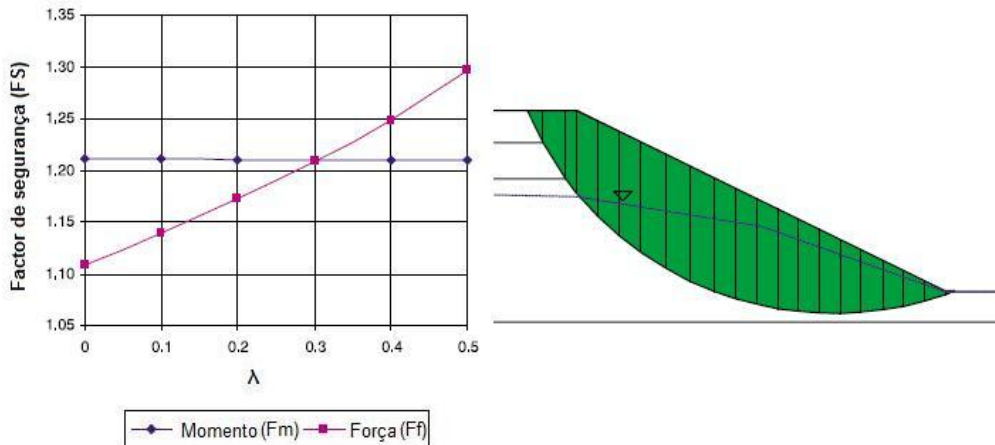
A intersecção de ambas as curvas (F_m e F_f) resulta na verificação das condições de equilíbrio de momentos e forças, o que corresponde às condições satisfeitas pelos métodos de Spencer e Morgenstern-Price, logo o ponto de intersecção corresponde ao FS a eles associado.

Há duas notas a reter:

- No exemplo genérico da Fig 2.10, os métodos de Spencer e de Morgenstern-Price apresentam igual FS, o que poderá nem sempre acontecer devido à dependência dos métodos das funções de interacção de forças previamente escolhidas
- O desprezo das forças tangenciais de interacção expõe o conservadorismo ou, nalguns casos, a sobrevalorização da segurança, dos métodos de Bishop e Janbu relativamente a métodos “rigorosos” como o de Morgenstern-Price.

Este tipo de abordagem genérica possibilita demonstrar as especificidades que suportam os diversos métodos de equilíbrio limite e aquilo que os diferencia, explicitando de forma clara a razão por detrás dos distintos factores de segurança obtidos nos diversos métodos, e identificando aqueles dos quais se espera resultados mais rigorosos.

2.4.2 SUPERFÍCIES DE ROTURA CIRCULARES

Fig.2.11 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura circulares (Krahn, 2001)

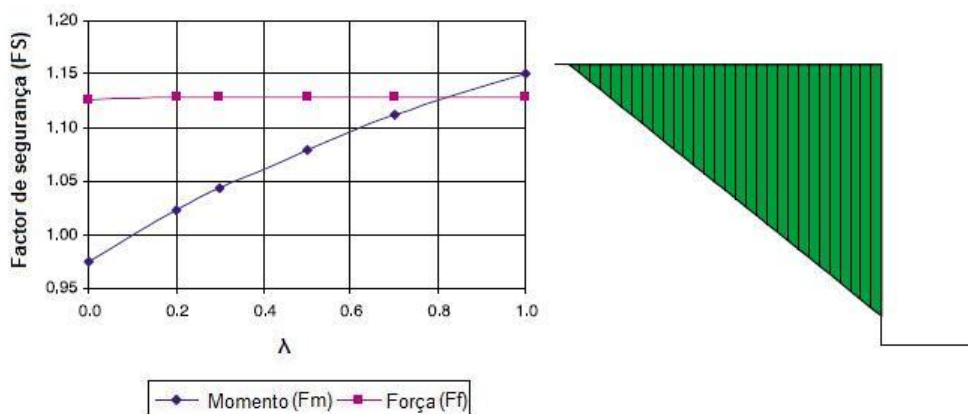
Como é perceptível pela Fig.2.11, o FS associado ao equilíbrio de momentos é independente de λ , daí a curva ser horizontal, ou seja, para diferentes valores de λ , F_m é constante. Por outro lado, a inclinação da curva referente ao equilíbrio de forças revela que esta já é dependente de λ .

O equilíbrio de momentos não é influenciado pelas forças de interacção porque a rotação da massa deslizante age como um corpo livre sem movimentos internos entre fatias. Por outro lado a movimentação lateral da massa já exige a mobilização de tais forças, daí a dependência de λ no segundo caso.

Constata-se que em casos simples onde a superfície de rotura é circular, o FS do método de Bishop é muito próximo, senão coincidente, com o de Morgenstern-Price (intersecção de F_m com F_f), algo usual nestas circunstâncias.

Por outro lado a solução dada por Janbu, é relativamente conservadora perante soluções mais rigorosas, como consequência dos critérios adoptados no que diz respeito às forças de interacção, incluindo as de efeito estabilizador.

2.4.3 SUPERFÍCIES DE ROTURA PLANAS

Fig. 2.12 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura planas (Krahn, 2001)

Para superfícies de rotura planas as condições de equilíbrio de momentos e forças em função de λ tomam posições opostas. F_f passa a ser independente de λ e F_m dependente porque, e por analogia

com o caso anterior, o movimento lateral do corpo não mobiliza forças de interacção enquanto a rotação sim.

Neste caso a solução obtida pelo método de Janbu é semelhante à de Morgenstern-Price enquanto a de Bishop passa a ser subvalorizada.

2.4.4 SUPERFÍCIES DE ROTURA COMPOSTAS (CIRCULAR + PLANA)

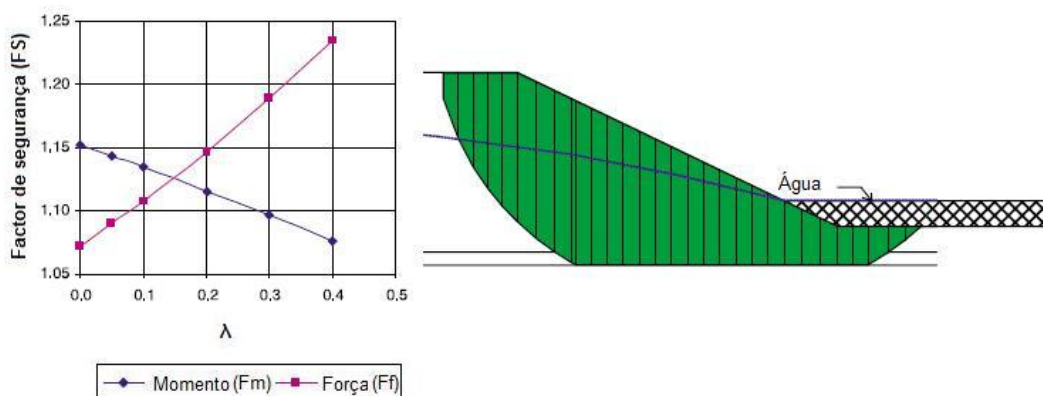


Fig. 2.13 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura compostas (Krahn, 2001)

As superfícies de rotura compostas também são potenciais mecanismos de rotura, habituais em casos de presença de estratos subjacentes com características mecânicas fracas que acabam por precipitar a rotura por corte, interrompendo a superfície de rotura circular em formação com uma plana coincidente com a transição para o estrato mais fraco.

Seguindo a filosofia adoptada no dois exemplos anteriores, compreende-se que ambas as condições de equilíbrio são dependentes das forças de interacção, ou seja, tanto F_m como F_f são sensíveis à variação de λ embora de formas opostas. O aumento de λ leva a um aumento do factor de segurança associado ao equilíbrio de forças, enquanto para condições de momentos o respectivo factor diminui.

Apesar de não se poder generalizar para todos os casos, na sua maioria o factor de segurança segundo Bishop é superior e o de Janbu inferior ao oferecido por Morgenstern-Price, tal como ilustrado no gráfico da Fig.2.13, o que constitui um dado útil para uma melhor compreensão dos resultados obtidos em casos de estudo neste contexto.

2.4.5 SUPERFÍCIES DE ROTURA COMPOSTAS (PLANAS)

Outra das possibilidades para a rotura de um talude é este se movimentar como um corpo solidário e rígido, caso em que, tal como nas superfícies de rotura compostas, as condições de equilíbrio de momentos e forças são dependentes de λ . Porém, essa influência acaba por não ser equitativa porque, como se pode observar no gráfico da Fig.2.14, o equilíbrio de forças é, evidentemente, mais influenciado pelas forças de interacção do que no caso dos momentos.

Portanto facilmente se conclui que as soluções oferecidas por Bishop e Janbu são ambas conservadoras, com destaque para a última que apesar de se encontrar do lado da segurança, numa situação de projecto seria claramente anti-económica.

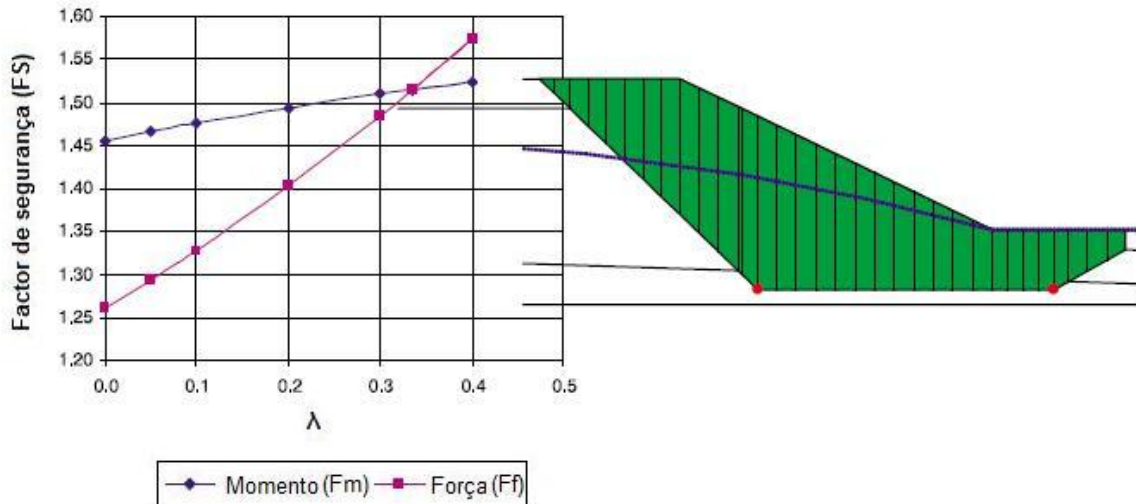


Fig.2.14 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura em bloco (Krahn, 2001)

2.4.6 SUPERFÍCIES DE ROTURA COM ESTRUTURAS DE SUPORTE (CORTINA DE ESTACAS)

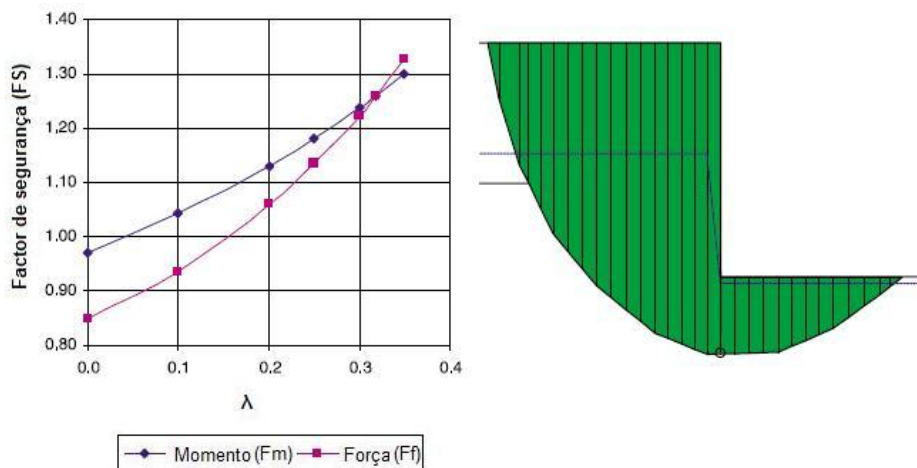


Fig. 2.15 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para superfícies de rotura num talude estabilizado por uma cortina de estacas (Krahn, 2001)

Em certas ocasiões é necessário recorrer a estruturas de suporte de terras para controlar a estabilidade de determinados maciços aquando de escavações a profundidades significativamente grandes.

Ambas as condições de equilíbrio são dependentes e muito sensíveis à variação de λ tal como ilustra o gráfico da Fig.2.15. Para $\lambda=0$ tanto o FS de Bishop como o de Janbu são inferiores a 1, quando na realidade o FS mais rigoroso de Morgenstern-Price é consideravelmente superior a 1. É um caso claro de avaliação errada da segurança porque o facto de não se considerarem as forças de interacção resulta em soluções subvalorizadas, indicativas da não satisfação do critério de segurança.

Por isso, tudo leva a crer que neste género de situações, as abordagens através de métodos como os de Janbu e Bishop conduzem a soluções conservadoras e anti-económicas.

2.4.7 – MATERIAIS CONTRASTANTES

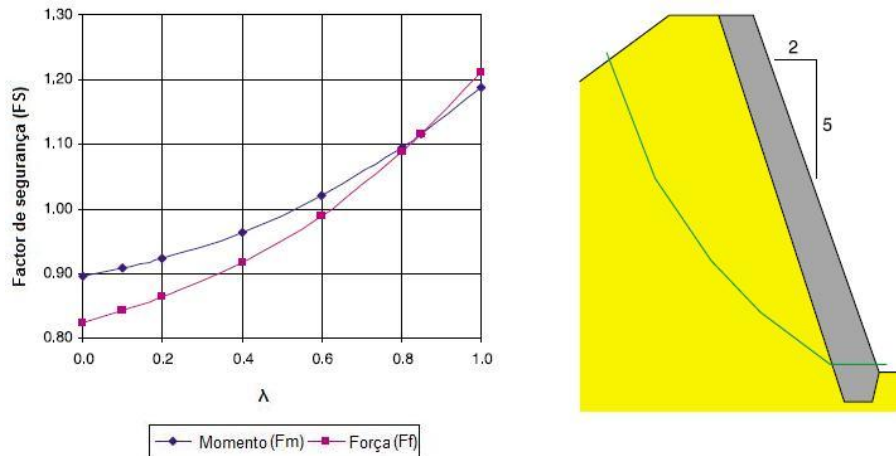


Fig.2.16 – Variação dos factores de segurança F_m e F_f com λ para uma situação de materiais contrastantes (muro de suporte em pedra) (Krahn, 2001)

Em inúmeras situações é necessário recorrer a estruturas de suporte, sendo uma das possibilidades os muros em pedra. Porém, uma questão que por vezes parece ser esquecida durante a abordagem destes problemas é que os materiais constitutivos do terreno e do muro têm propriedades mecânicas distintas.

Quadro 2.2 – Características mecânicas dos materiais contrastantes.

Método	Solo	Muro de suporte
γ (kN/m ³)	21	22
c (kPa)	0	0
Φ (°)	36	42

Em resultado de simplificação nas análises os factores de segurança obtidos para Bishop, Janbu, ou até mesmo Morgenstern-Price, são bastante conservadores, os primeiros dois pelo facto já debatido de não considerarem as forças de interacção e pelo modo de reproduzir a zona de interacção entre materiais contrastantes. Já o método de Morgenstern-Price, apesar de oferecer uma solução segura, mesmo assim não deixa de ser conservador, porque é razoável pensar que a função característica das forças de interacção $f(x)$ não será constante para todas as fatias, principalmente naquelas que incluem o muro de suporte.

Então, para se proceder a uma caracterização mais realista pode-se fazer variar $f(x)$ para as fatias mais próximas do muro de suporte, incluindo aquelas constituídas por material do muro, tal como representado na Fig.2.17.

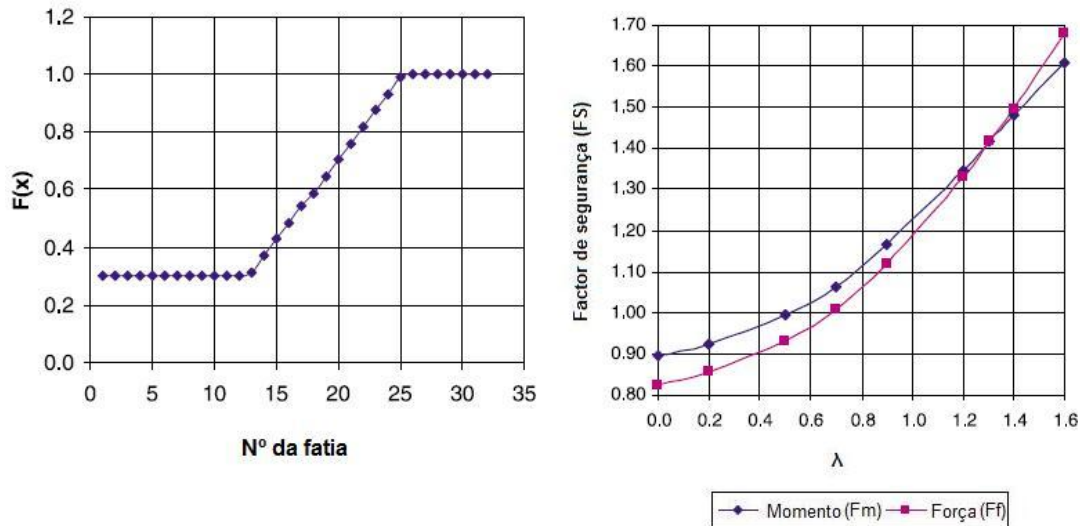


Fig.2.17 – Variação da função característica das forças de interação e respectiva influência nos factores de segurança (Krahn, 2001)

Com a variação de $f(x)$ pode-se constatar que:

- Neste tipo de casos a pré-determinação adequada de $f(x)$ pode ser preponderante na quantificação do factor de segurança, daí o resultado inicial de M-P ser tão conservador comparativamente com o que se obtém após a alteração
- Tanto a condição de equilíbrio de momentos como a de forças são igualmente sensíveis à variação de λ , sendo portanto fácil entender a importância das forças de interação pois tanto no gráfico da Fig.2.16 como na Fig.2.17 as duas curvas são próximas, com uma tendência crescente acentuada no segundo caso.

2.4.8 – CARGAS CONCENTRADAS

O recurso a métodos computacionais nos métodos de equilíbrio limite permitiu a inclusão de elementos estabilizadores como ancoragens, pregagens ou muros de suporte que na sua essência equivalem a cargas concentradas aplicadas ao talude (Fig.2.18).

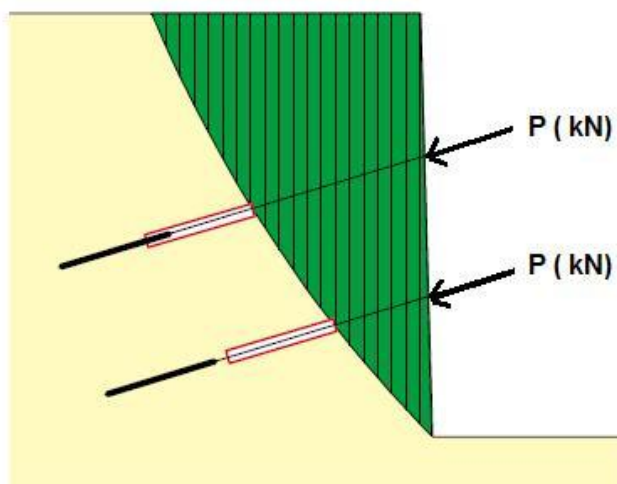


Fig.2.18 – Talude estabilizado através de ancoragens (Krahn, 2001)

Todavia, a forma como são introduzidas estas forças nas condições de equilíbrio é dúbia, isto é, se são aplicadas ao corpo (talude) como um todo ou então fatia a fatia. As questões essenciais a esclarecer são então: qual a influência da inclusão destas forças no comportamento do talude, de que maneira alteram as forças de interacção e quais as tensões de corte resultantes na superfície de rotura.

Há duas alternativas possíveis para introduzir as forças concentradas devidas às ancoragens no equilíbrio. Na primeira as forças são aplicadas nas fatias onde as ancoragens intersectem a superfície de rotura, enquanto na segunda as forças seriam aplicadas directamente na parede ancorada.

Obviamente, o diferente carácter das hipóteses conduz a diferentes distribuições das forças de interacção das fatias como é perceptível nos gráficos da Fig.2.19.

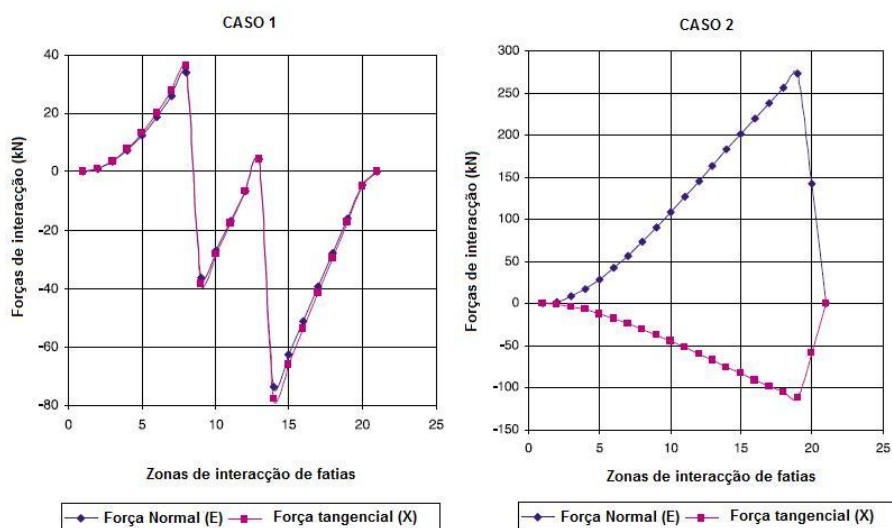


Fig.2.19 – Variação das forças normais e tangenciais de interacção nos dois casos de aplicação de carga (Krahn, 2001)

As grandes diferenças encontradas são as seguintes:

- No Caso 1 os valores das forças de interacção são muito próximos, praticamente coincidentes até, enquanto o Caso 2 apresenta diferenças significativas, mesmo na direcção das forças que aqui são opostas
- A distribuição das forças de interacção é mais regular no segundo caso, no qual a influência das ancoragens só é sentida nas fatias mais próximas da parede ancorada. Por outro lado, o Caso 1 apresenta discontinuidades devido à introdução das forças apenas em fatias intersectadas na sua base pelas ancoragens.

A distribuição das tensões ao longo da superfície de rotura também apresenta diferenças, tal como retratado na Fig 2.20. A aplicação da força das ancoragens na base das fatias intersectadas pelas ancoragens gera picos de tensão proporcionais à área da base da fatia (Caso1). Por outro lado isso já não se regista com cargas aplicadas na parede, que não proporcionam qualquer interferência na distribuição de tensões normais (Caso 2).

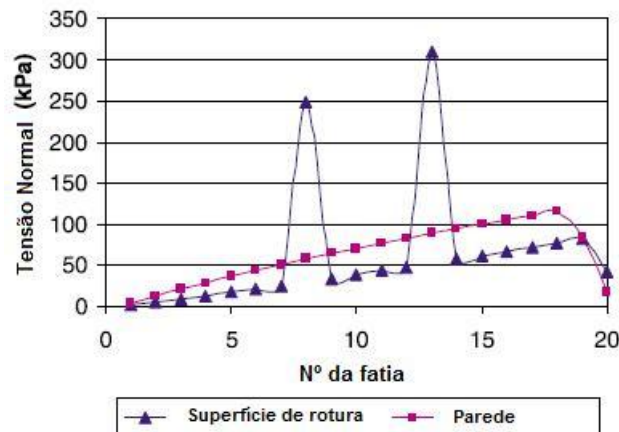


Fig.2.20 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura com diferentes pontos de aplicação das ancoragens (Krahn,2001)

Apesar das diferenças relatadas, o FS obtido continua a ser razoável porque a obtenção dos dois factores de segurança (F_m e F_f) exige um processo iterativo que terá de obedecer a duas condições:

- A determinação das forças actuantes em cada fatia exige, obrigatoriamente, que a fatia esteja em equilíbrio
- A determinação das forças em cada fatia exige que o factor de segurança seja o mesmo para todas as fatias.

Logo, as forças de interacção e na base das fatias não são representativas das condições in situ. Mesmo assim o FS global é razoável porque os métodos de equilíbrio limite levam a que as irregularidades locais sejam amenizadas depois da integração das forças.

2.4.9 – PROBLEMAS DE CONVERGÊNCIA

Sabendo à partida que a resolução de problemas de estabilidade de taludes recorre a processos iterativos, os aspectos de convergência tomam aqui especial relevo. Perante isto convém referir a origem e possível interpretação destes quando surgem nos resultados.

O problema numérico surge do denominador da expressão do reacção normal da base da fatia (2.61) que a partir de uma determinada inclinação deixa de ser possível chegar a uma reacção N capaz de garantir o equilíbrio da fatia, o equivalente a dizer que se está perante uma solução não convergente.

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\text{sen}\alpha \tan\phi'}{FS} \quad (2.63)$$

Este problema de não convergência pode criar dúvidas quanto à fiabilidade do FS mínimo quando este se localiza próximo de uma zona com soluções desse género.

Normalmente a superfície crítica localiza-se próxima da inclinação da cunha activa de rotura ($45+\Phi/2$), a mesma onde se iniciam os problemas de convergência e se localizam potenciais centros de superfícies críticas. Contudo, e como já foi referido, a presença de um resultado convergente muito próximo de outros não convergentes coloca em causa a validade do mesmo.

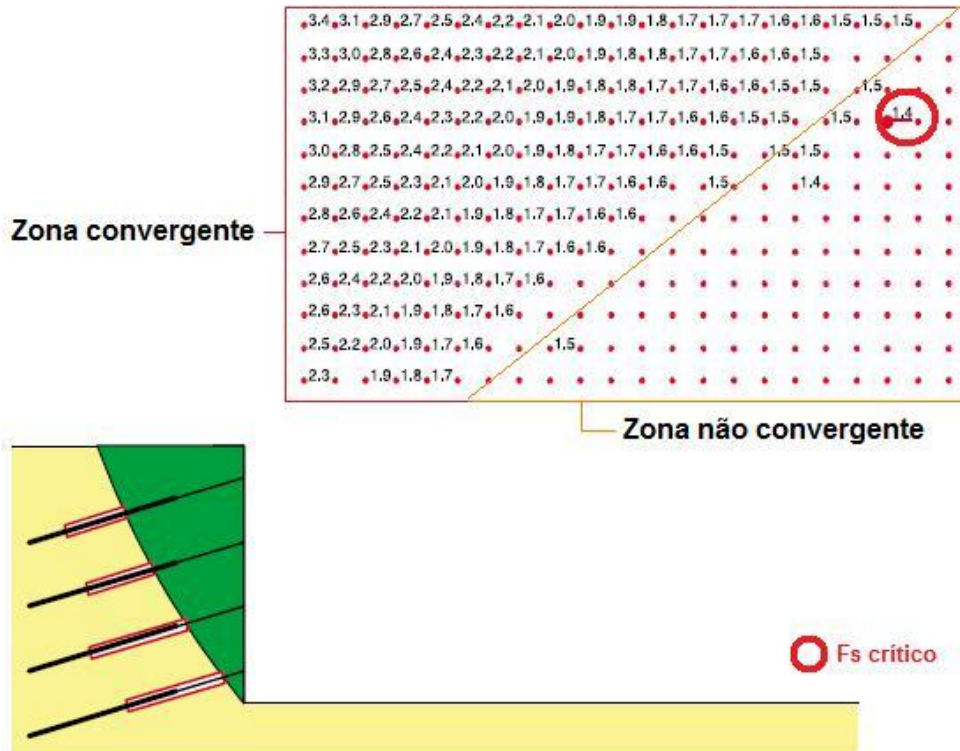


Fig.2.21 – Problema de convergência devido à existência de pontos sem qualquer FS associado (Krahn, 2001)

Como é perceptível na formulação de m_α , este depende tanto de α como foi detalhado na Fig.2.22 como do ângulo de atrito, ϕ' , e até do próprio factor de segurança que vai sofrendo alterações sucessivas durante o processo iterativo. Portanto é pertinente demonstrar essa influência de forma explícita, tal como na Fig.2.23.

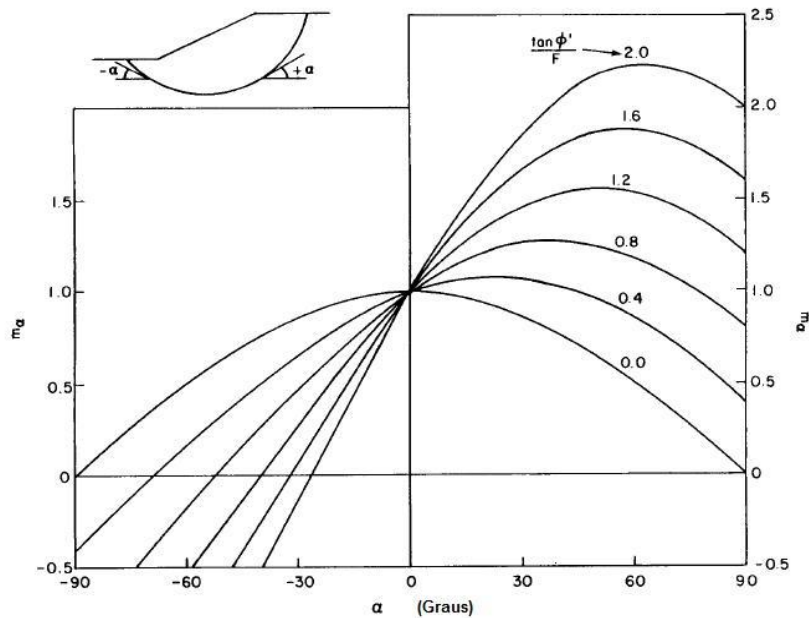


Fig.2.22 – Variação de m_α com a inclinação média da base das fatias (α), ângulo de atrito (ϕ') e factor de segurança (Krahn, 2001)

Outra das circunstâncias que podem proporcionar não convergência durante o processo de cálculo é a presença de solo com elevada coesão. A contribuição desta, muito significativa por sinal, pode ser superior à da componente atrítica, acabando por gerar um equilíbrio de forças pouco realista nas fatias em que as forças de atrito passam a estar a favor do movimento, sendo a reacção normal negativa para que o equilíbrio se verifique.

Logo, conclui-se que para estes casos os métodos de equilíbrio limite revelam insuficiências que terão de ser ultrapassadas com auxílio de outras ferramentas.

Podem ainda ser encontrados problemas quando as premissas que sustentam a distribuição das forças de interacção são irrealistas, em resultado de condições fronteira mal reproduzidas nas funções $f(x)$. Daí dever haver uma ponderação prévia em relação ao tipo de funções a introduzir para este tipo de casos.

2.4.10. FORÇAS EXTERIORES À MASSA DESLIZANTE

As situações que introduzem forças exteriores à massa deslizante são comuns, principalmente em estruturas de suporte como cortinas de estacas ou estacas prancha em aço que, em muitas ocasiões, atingem profundidades para além da superfície de rotura.

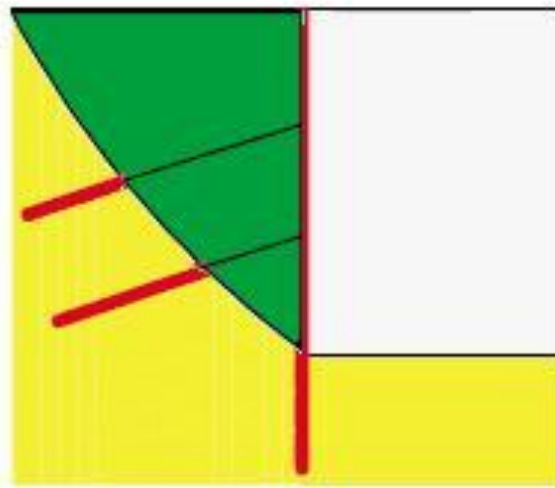


Fig.2.23 – Superfície potencial de rotura com estrutura de suporte (cortina de estacas-prancha) para além da profundidade da base do talude (Krahn, 2001)

O problema aqui está na componente passiva existente à frente da cortina de estacas que contribui para estabilização, só que no entanto esta parcela não é considerada na abordagem pelos métodos de equilíbrio limite.

Outra questão que se coloca é que nos casos de estacas prancha, tal como nos muros de suporte, há uma diferença significativa nas características mecânicas dos materiais, acentuada ainda mais no caso de estas serem de aço, com rigidez muito distinta da do terreno o que introduz outra dificuldade no problema.

Pode tentar-se contornar estas situações através da inclusão de uma força fictícia no sopé do talude, equivalente ao impulso passivo, contudo há que ter em conta que o impulso passivo depende da interação solo-estaca e as condições de equilíbrio (momentos e forças) estabelecidas não iriam ser realistas, apesar de desde o início se encontrar do lado da segurança.

2.4.11. FORÇAS/ TENSÕES NORMAIS AO LONGO DA SUPERFÍCIE DE ROTURA

Como já foi referido, uma das variáveis chave nos métodos de equilíbrio limite é a reacção normal na base de cada fatia, N , embora esta seja dependente dos pressupostos de cada método quanto às forças de interacção.

De maneira a expor os erros que podem provir daqui decidiu-se comparar resultados obtidos através de análises de equilíbrio limite (L.E) por Morgenstern-Price com $f(x)$ constante com análises por elementos finitos (F.E) (elástico-linear).

Analisaram-se 3 hipóteses:

1. A superfície de rotura intersecta a base da escavação
2. A superfície de rotura é mais profunda que a base de escavação
3. A superfície de rotura intersecta a base de escavação com inclusão de ancoragens

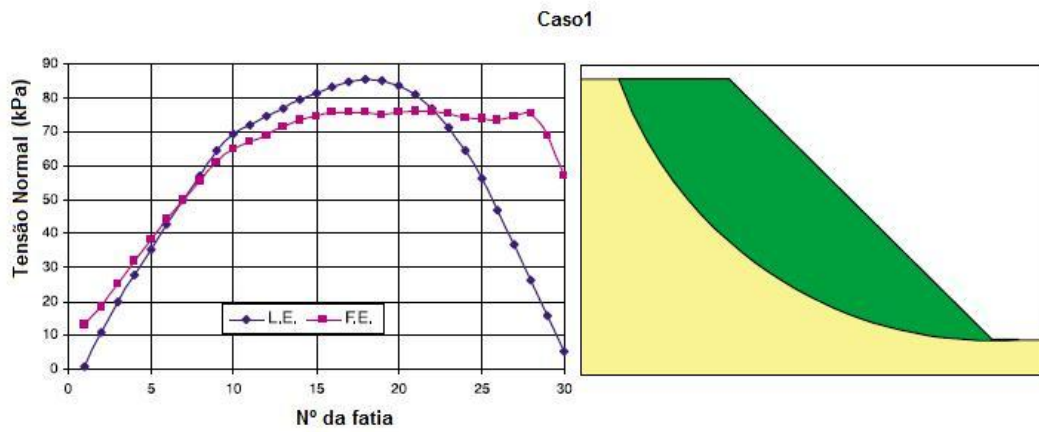


Fig.2.24 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 1)(Krahn, 2001)

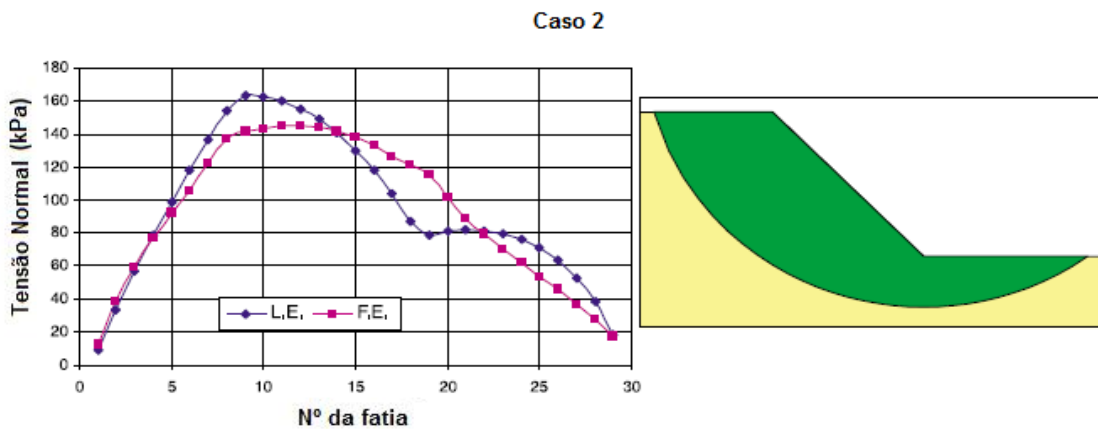


Fig.2.25 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 2)(Krahn, 2001)

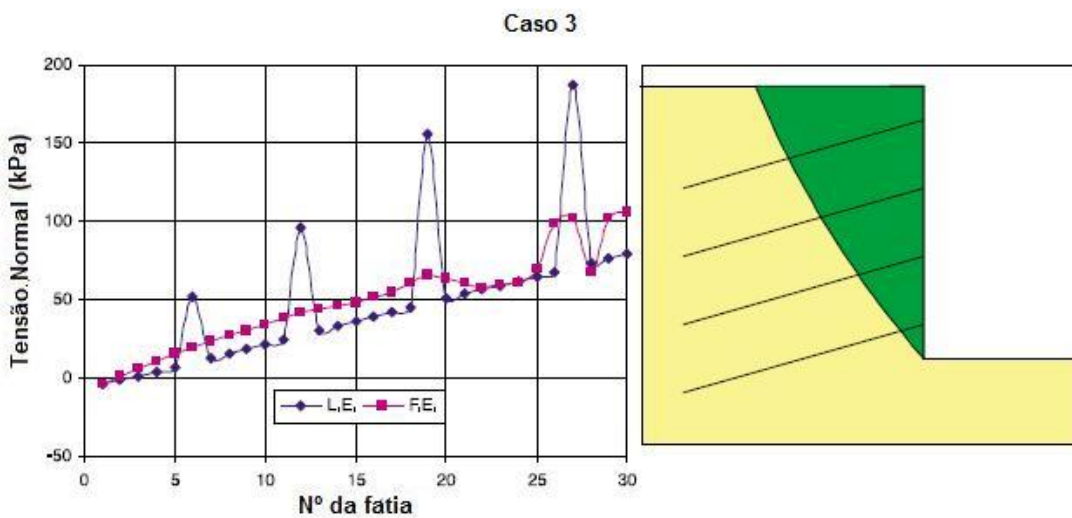


Fig.2.26 – Distribuição de tensões normais ao longo da superfície de rotura para LE e FE (Caso 3)(Krahn, 2001)

Como é bem notório pelas figuras, o comportamento em termos de tensões normais ao longo da superfície de rotura apresenta discrepâncias nas 3 hipóteses.

1. As maiores diferenças entre a análise de elementos finitos e equilíbrio limite concentram-se essencialmente na base do talude, provocadas por alterações do estado de tensão do maciço naquele local, cuja consideração é menosprezada pelo equilíbrio limite resultando em tensões tão díspares na sua proximidade
2. Há diferenças na forma como se distribuem as tensões porque enquanto a solução por elementos finitos aparenta maior continuidade, a dada por L.E apresenta uma repartição mais irregular
3. O comportamento é semelhante à excepção das fatias que são intersectadas pelas ancoragens promovendo assim picos de tensão nas mesmas.

Retira-se destes resultados que métodos baseados em elementos finitos são mais realistas na caracterização do estado de tensão do terreno, algo que os métodos de equilíbrio limite adulteram em muitos casos devido aos pressupostos em que se baseiam.

No entanto, e apesar das imprecisões apontadas aos métodos de equilíbrio limite, estes continuam a ser seguros porque os FS resultantes permanecem aproximações razoáveis, embora se saiba que se pode proceder a optimizações.

2.4.12. FORÇAS DE PERCOLAÇÃO

Em casos de estabilidade de taludes com percolação incluída, a inclusão das forças inerentes ao fenómeno no equilíbrio limite pode trazer alguma confusão na interpretação da situação.

Esta questão toma especial relevância em casos como barragens de aterro onde são estudadas, simultaneamente, a estabilidade e a percolação.

A percolação resulta das diferenças de carga hidráulica entre diferentes regiões de um maciço, mobilizando forças no sentido da região de maior para a de menor carga hidráulica. Durante esse percurso entre regiões há um gradiente de carga ao qual as forças de percolação são proporcionais.

Porém, e como já foi referido, os métodos de equilíbrio limite preocupam-se essencialmente em satisfazer o equilíbrio de forças e momentos, desprezando o estado de tensão do terreno, portanto a não inclusão de um possível fenómeno de percolação continuaria a não colocar em causa a fiabilidade dos resultados alcançados.

Outro ponto a considerar seria se, ao considerar as forças de percolação, como estas se inseririam no equilíbrio das fatias pois iriam existir implicações directas nos valores das forças de interacção (X e E) tal como nas da base de cada fatia (N e T). Visto que as condições de equilíbrio se poderiam tornar mais confusas, as forças de percolação não são consideradas no cálculo, mas por outro lado as pressões intersticiais continuam a ser tidas em conta.

Actualmente, com programas comerciais de elementos finitos é possível conjugar a análise de percolação com a de estabilidade, o que, após uma caracterização adequada dos parâmetros mecânicos e de condutividade hidráulica, permite um estudo mais rigoroso das condições *in situ*.

2.4.13. ANÁLISE INTEGRADA DO PROBLEMA.

Os métodos de equilíbrio limite baseiam-se puramente nos princípios da estática, menosprezando a importância do estado de tensão *in situ* e a compatibilidade de deformações. Todavia actualmente já é possível associar ambos os aspectos e assim contornar este problema. Em suma, hoje em dia é possível combinar com poderosos programas de cálculo os benefícios de uma análise por elementos finitos do estado de tensão e deformação do terreno com as virtualidades dos métodos de equilíbrio limite.

Como já foi apontado diversas vezes, um dos elementos chave para determinação do FS crítico é a reacção normal da base das fatias, N.

Actualmente, com programas comerciais é possível fazer uma análise integrada do problema, ou seja, através de um programa de elementos finitos estabelece-se o estado de tensão e deformação do terreno, para de seguida exportar os resultados para um programa de estabilidade de taludes, obtendo-se assim uma optimização significativa dos resultados finais, especialmente em situações com estado tensão *in situ* com particularidades, como por exemplo zonas de concentração de tensões.

Com estas ferramentas passa a dispor-se de uma série de vantagens, nomeadamente:

- Deixam de ser necessários pressupostos para com as forças de interacção
- O FS passa a ser determinístico, uma vez que as tensões já se encontram determinadas, logo deixam de existir problemas de convergência
- A compatibilidade de deformações passa a estar garantida
- O estado tensão *in situ* passa a ser mais realista
- Os locais do talude com possíveis concentrações de tensões passam a ser devidamente tratados na análise de estabilidade
- Os casos de interacção solo-estrutura de suporte passam a estar caracterizados de forma mais realista, deixando para trás os problemas que se levantavam anteriormente
- A consideração das acções dinâmicas induzidas por sismos pode ser realizada com facilidade
- A utilização do modelo constitutivo elástico-linear, mais importante para o estudo do estado de tensão, garante uma convergência rápida do problema.

3

METODOLOGIA DE ESTUDO

3.1. MÉTODO

Depois de revistos vários aspectos importantes relacionados com a análise da estabilidade de taludes descritos nos capítulos anteriores, passou-se à solução de vários exemplos numéricos simples numa fase inicial, posteriormente complementada com um exemplo mais complexo, quer em termos de topografia do terreno, quer de estratificação.

A metodologia de estudo adoptada envolve a utilização em paralelo de dois programas comerciais (SLOPE/W e SLIDE), de um programa aberto escrito em Fortran (TALUDES) e do programa TALUDE_MRC desenvolvido em Matlab no âmbito desta tese, com interpretação dos resultados obtidos e comparações que se processam a diversos níveis, tais como:

- Comparação entre os programas (SLOPE/W, SLIDE, TALUDES e TALUDE_MRC)
- Comparação entre diferentes métodos de equilíbrio limite (métodos clássicos vs. métodos "exactos")
- Comparação dos métodos de equilíbrio limite (M.E.L) com o método dos elementos finitos (M.E.F)
- Comparação entre o método de Correia e o de Morgenstern-Price.

3.2. EXEMPLOS NUMÉRICOS

Foram analisados 7 problemas de estabilidade de taludes, cada um deles reflectindo diferentes aspectos deste tipo de problemas, tendo em vista obter uma experiência numérica mais alargada do tipo de questões que podem daí advir e as respectivas implicações nos resultados.

Os primeiros cinco exemplos são baseados na geometria (apenas do terreno) e características mecânicas de exemplos existentes no conjunto de tutoriais oferecidos pela GEOSLOPE.

O sexto e sétimo exemplo (Caso 1 e Caso 2) serão os mesmos que Correia utilizou na apresentação do método para dessa forma validar os resultados do novo programa TALUDE_MRC realizado em Matlab e possibilitar a comparação com outros métodos. Estes serão sujeitos inicialmente a uma validação dos resultados existentes, isto é, serão introduzidas directamente as geometrias das superfícies analisadas no SLOPE/W porque é o único programa disponível que possibilita a definição de uma superfície específica. Tudo isto tem como objectivo conferir os resultados obtidos com o método de Morgenstern-Price para os exemplos 6 e 7.

Durante a exposição dos exemplos serão ainda fornecidos os dados relativos às características mecânicas dos solos, sendo as geometrias fornecidas em Anexo, tal como a informação sobre a superfície freática do exemplo 4, que contempla um caso de percolação numa barragem de aterro.

3.2.1. EXEMPLO 1 – TALUDE HOMOGÉNEO

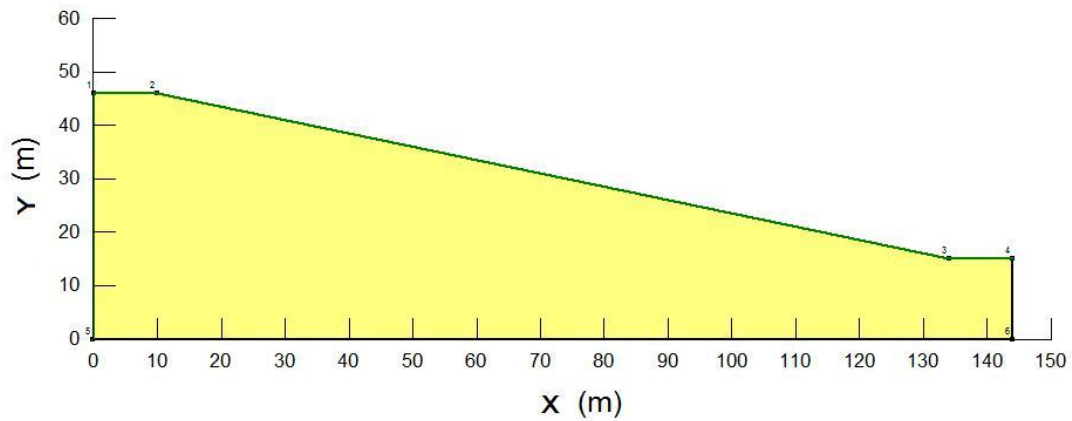


Fig.3.1 – Talude homogêneo com geometria simples.

Quadro 3.1- Características mecânicas do solo do Exemplo 1

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	ν
Solo homogêneo	20	12,5	16	10	0,3

3.2.2 . EXEMPLO 2 – TALUDE HETEROGÉNEO (4 ESTRATOS)

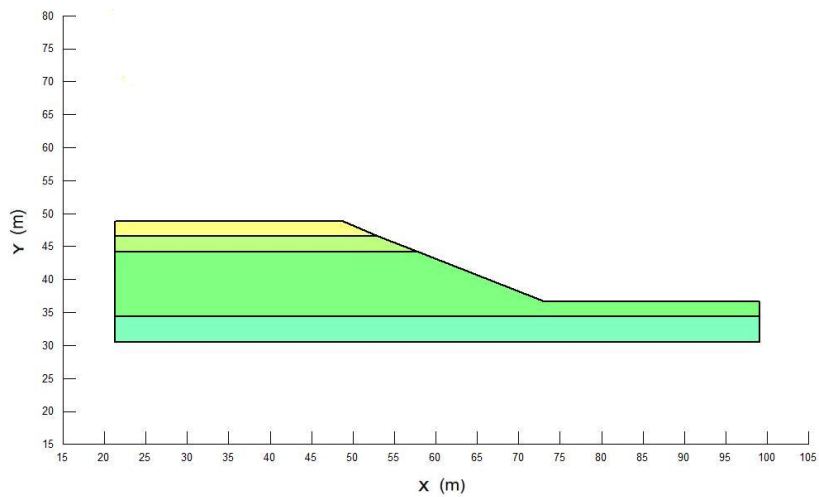


Fig.3.2 - Talude heterogêneo constituído por 4 estratos distintos

Quadro 3.2- Características mecânicas do solo do Exemplo 2 (de cima para baixo)

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	E(MPa)	ν
"upper silty clay"	30	0	18	5	0,3
"lower silty clay"	21	29	18	7	0,3
"soft silty clay"	20	14	17	8	0,3
"sandy clay till"	27	29	19	15	0.3

3.2.3. EXEMPLO 3 – TALUDE COM UM ESTRATO DE BAIXA RESISTÊNCIA

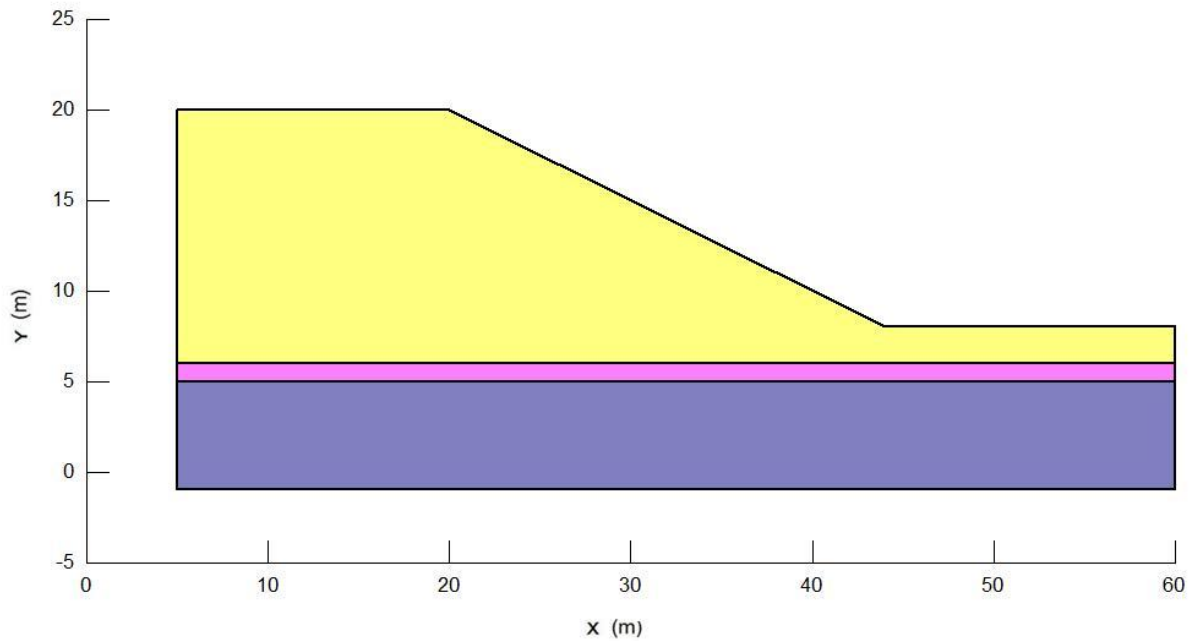


Fig.3.3 - Talude estratificado constituído por 3 estratos distintos, um pouco espesso de baixa resistência e o subjacente (roxo) é tido como "bedrock".

Quadro 3.3 - Características mecânicas do solo do Exemplo 3 (correspondendo à Fig.3.3 de cima para baixo respectivamente)

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kpa)$	$\gamma(kN/m^3)$	E(MPa)	ν
"sandy clay"	30	20	15	8	0,3
"weak layer"	10	0	18	5	0.3
"bedrock"				1e+011	

3.2.4. EXEMPLO 4 – BARRAGEM DE ATERRO HOMOGÉNEA

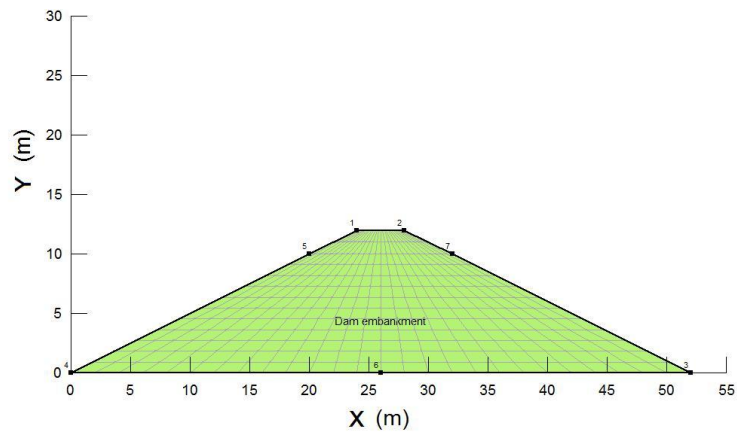


Fig.3.4 - Barragem de aterro homogénea em fase final de construção

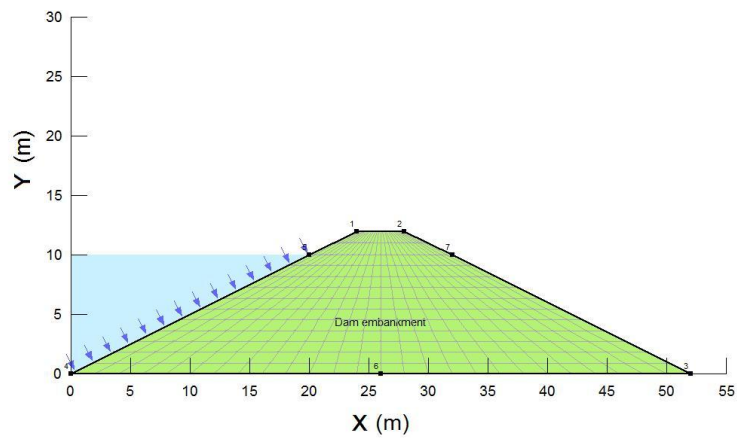


Fig.3.5 - Barragem de aterro homogénea em serviço

Quadro 3.4- Características mecânicas do solo do Exemplo 4

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	ν
Solo homogéneo	30	25	20	70	0,3334

3.2.5. EXEMPLO 5 – CORTINA DE ESTACAS ANCORADA

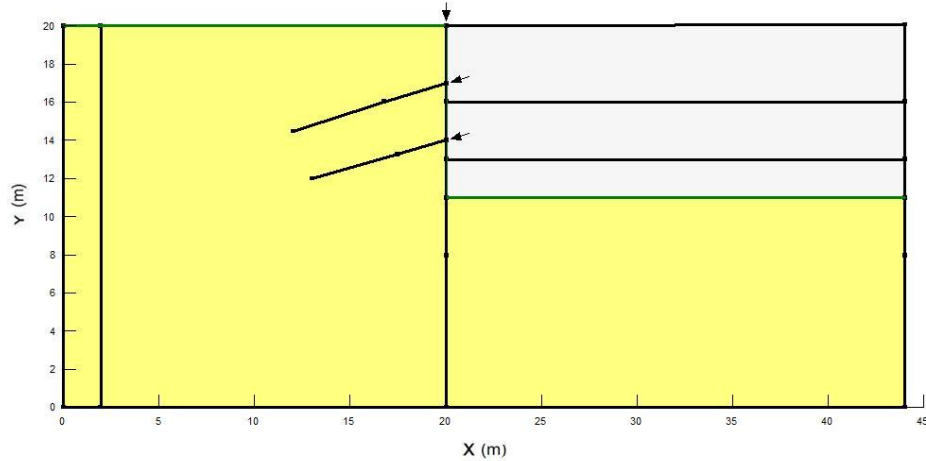


Fig.3.6 – Esquema bidimensional de uma cortina de estacas ancorada.

Quadro 3.5- Características mecânicas do solo do Exemplo 5

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	ν
Solo homogéneo	30	0	20	5	0,3334

Este exemplo apenas será sujeito a uma análise comparativa entre os programas SLOPE/W e SLIDE e entre M.E.L e M.E.F porque os programas TALUDES e TALUDE_MRC ainda não estão preparados para lidar com este tipo de casos específicos. Apesar de o programa TALUDES ter capacidade para lidar com ancoragens e pregagens ainda não consegue simular a acção estabilizadora da parede de estacas. Tal como este, também o programa TALUDE_MRC padece da mesma insuficiência, inclusivamente ainda não se encontra preparado para lidar com acções provenientes de ancoragens ou pregagens.

3.2.6. EXEMPLO 6 - CASO 1 DE CORREIA

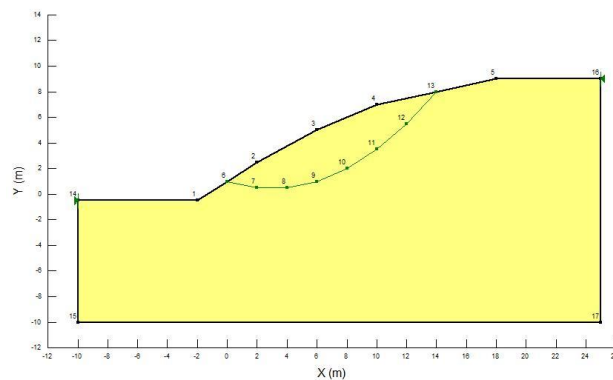


Fig.3.7 – Talude homogéneo com superfície de rotura previamente especificada.

Quadro 3.6- Características mecânicas do solo do Caso 1 Correia

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	ν
Solo homogéneo	28	2	20	10	0,3

3.2.7. EXEMPLO 7 – CASO 2 DE CORREIA

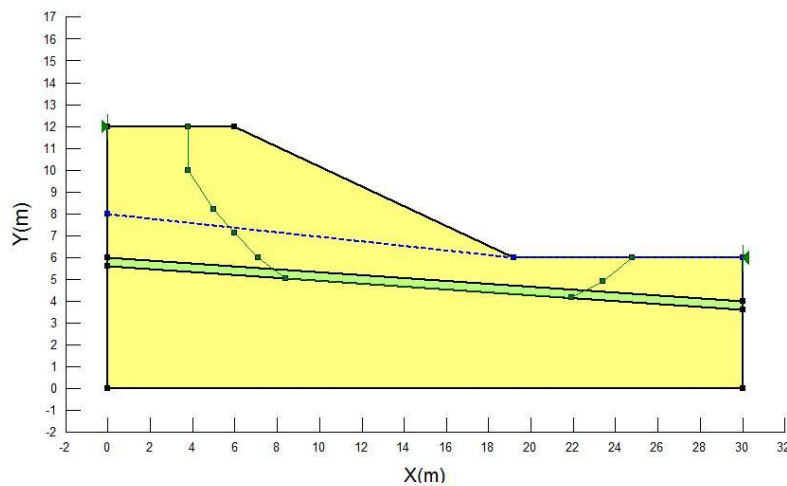


Fig.3.8 - Talude com 2 estratos com características mecânicas distintas, uma superfície de rotura composta previamente especificada e representação nível freático.

Quadro 3.7- Características mecânicas do solo do Exemplo 2 Correia

Tipo de solo	$\phi(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	ν
M1 (amarelo)	24	25	18,8	8	0,3
M2 (verde)	12	0	18,8	4	0,4

A nomenclatura M1 e M2 para os solos segue a adoptada por Correia na apresentação do exemplo.

3.3. COMPARAÇÃO ENTRE PROGRAMAS

A comparação entre programas visa essencialmente a validação de resultados através da redundância das leituras, ou seja, introduzindo o mesmo tipo de dados iniciais, tais como: geometria, características mecânicas dos solos, malhas de centros de circunferência e raios e os métodos de equilíbrio limite serão expectáveis resultados bastante próximos que permitirão comprovar a validade dos programas desenvolvidos.

Todos os exemplos serão analisados em 4 programas distintos, isto é, dois programas comerciais (SLOPE/W e SLIDE) e dois outros programas abertos auxiliares (TALUDES e TALUDE_MRC), o que envolve, claramente, modos distintos de introdução dos dados iniciais bem como de disponibilização final dos resultados.

A comparação propriamente dita visa os resultados dos métodos de Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price em SLOPE/W e SLIDE. Quanto ao programa TALUDES, este apenas fornece

dados relativamente a Bishop Simplificado e Fellenius e o programa TALUDE_MRC só fornece resultados baseados no método de Correia.

3.4. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE (M.E.L)

Tal como foi referido no capítulo 2, os M.E.L apresentam resultados desiguais devido às premissas em que estão assentes. A importância deste confronto de resultados ganha relevância porque é útil para demonstrar que, na realidade, há métodos mais rigorosos do que outros, validando assim as razões teóricas que os suportam. Outra utilidade patente é a possibilidade de efectuar um paralelismo entre os vários resultados dos diferentes métodos com as características do terreno em causa.

A comparação em si, será feita ao nível dos factores de segurança de cada método indicado em 3.3, e com os respectivos raios e centros de circunferência das superfícies críticas nos casos de Fellenius, Bishop e Morgenstern-Price.

3.4.1. COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CORREIA E MORGENSTERN – PRICE

Sendo o objectivo principal deste documento a comparação dos resultados de Correia com outros métodos, especialmente com Morgenstern-Price, será dado maior ênfase ao que advir do programa elaborado em Matlab (único meio para usar o método) em relação aos resultados de Morgenstern-Price entretanto extraídos dos outros programas comerciais.

Essa comparação será feita para superfícies críticas já determinadas pelo método de Morgenstern-Price possibilitando comparações mais rigorosas ao nível da distribuição de forças existentes nas fatias. E também serão realizadas buscas de múltiplas superfícies para encontrar a superfície crítica ditada pelo método comparando depois com outras obtidas noutros métodos.

3.5. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE (M.E.L) E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (M.E.F)

Como já foi indicado no capítulo anterior o M.E.F possui uma série de vantagens perante os M.E.L e com os avanços notórios das ferramentas de cálculo automático a utilização dos primeiros torna-se cada vez mais usual.

Esta comparação servirá para comprovar as vantagens da aplicação do método e apurar se os resultados até agora obtidos através dos M.E.L se distanciam muito, isto é, se sobrestimam ou subestimam a segurança, relacionando evidentemente com as características dos terrenos. A comparação terá especial atenção aos resultados dos métodos ditos exactos em relação aos obtidos com o M.E.F.

A utilização do M.E.F obriga à caracterização do terreno com outro rigor e parâmetros semelhantes aos utilizados em análises tensão-deformação em regime elástico, como por exemplo coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de deformabilidade (E).

Outra das questões que poderia ser explorada seria qual o modelo constitutivo e critério de rotura a adoptar. Porém, e para não fugir ao âmbito principal da tese, ir-se-á optar por um modelo linear-elástico e pelo critério de Mohr-Coulomb.

Este tipo de análise poderia ser efectuado, tanto no SLOPE/W com determinação do estado de tensão *in situ* em SIGMA/W como no SLIDE interagindo com o PHASE2. Embora ambos possam efectuar-lo,

decidiu-se fazê-lo apenas com recurso ao SLOPE/W e SIGMA/W, integrados no GEOSTUDIO 2007, devido a uma interacção mais ágil e eficaz.

4

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA TALUDE_MRC

4.1. GENERALIDADES

O desenvolvimento de programas de cálculo automático para análise de estabilidade de taludes pode tomar contornos mais ou menos complexos, de acordo com os métodos de equilíbrio limite que se queiram aplicar, que podem ir desde os mais simples, com superfícies de deslizamento circulares, até superfícies com outras configurações que não a circular, logo mais complicadas de lidar.

Para além grande opção de métodos disponíveis existe outra preocupação fulcral relacionada com estratégia a utilizar na caracterização geométrica do talude, associando-lhe as características mecânicas dos diversos estratos.

Portanto, fica claro que há dois aspectos essenciais na execução de programas automáticos com esta finalidade:

- A leitura por parte do programa da geometria do problema aos mais diversos níveis, desde o posicionamento global do talude, a localização das malhas de busca, as cotas dos diversos estratos e a posição do nível freático, até à localização das superfícies potenciais de deslizamento e divisão da respectiva massa deslizando em fatias
- Os métodos de equilíbrio limite impostos variam nas suas formulações e exigências geométricas complementares, isto é, devido à consideração ou não consideração da interacção entre fatias serão necessários dados acerca dos pontos de aplicação dessas forças em cada fatia, logo um tempo de processamento mais demorado devido a uma formulação mais extensa e exigente.

Dentro das várias linguagens de programação existentes, decidiu-se recorrer ao Matlab por ser uma ferramenta de cálculo extremamente actual, com grande potencialidade no que diz respeito à apresentação gráfica dos resultados, dotada de imensas funções auxiliares muito úteis na fase de elaboração do programa, com consequentes melhorias na velocidade de processamento.

Outra das razões que levou à sua adopção foi a sua universalidade pois, sendo uma ferramenta com grande expressão a nível internacional, faz todo o sentido usar esta linguagem para uma melhor difusão do programa no futuro.

4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO TALUDE

O primeiro aspecto a ter em conta neste género de problemas será a introdução das coordenadas sob a forma de abcissas e ordenadas que, formando um polígono fechado, definem as fronteiras do talude.

A caracterização geométrica do talude, para além de básica, é essencial para estabilidade do mesmo pois certos casos com declives elevados constituem, automaticamente, situações de maior risco.

A introdução das coordenadas deve ser realizada de forma disciplinada e no sentido horário ou anti-horário de modo a formar um polígono fechado que, durante o processamento do programa, possibilita a detecção das intersecções das superfícies de deslizamento com as fatias do talude.

4.3. ESTRATIFICAÇÃO DO TALUDE

A estratificação dos taludes tratáveis pelo programa pode ir até um número limite de 4 (por imposições programáticas) pois é o número máximo de estratos encontrado nos exemplos em estudo. Se possível, em versões posteriores do programa será elaborada uma forma expedita e generalizada de resolver esta limitação.

A introdução de cada estrato é feita da mesma maneira descrita anteriormente, ou seja, através da introdução das coordenadas dos vértices da poligonal delimitadora de cada estrato constituindo assim um polígono fechado.

Como informação adicional será ainda indicada directamente nos *inputs* do programa, a linha que define a superfície limite superior de cada estrato, de modo a facilitar durante o processamento a identificação de pontos de intersecção das superfícies de deslizamento com os estratos. Essa linha será definida pelos mesmos pontos que definem o estrato respectivo, mas agora somente aqueles que correspondem à superfície.

A definição dos diversos estratos é muito importante porque irá ter interferência directa no peso próprio de cada fatia e nos parâmetros resistentes – ângulo de atrito e coesão – existentes na zona inferior e de interface da superfície de deslizamento.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO

O nível freático será caracterizado através da indicação das coordenadas de pontos que constituirão uma linha recta ou até vários segmentos (em casos mais complexos) que definem a localização da superfície livre freática no problema em causa.

Inicialmente, é possível ao utilizador indicar se o problema requer ou não a definição do nível freático.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS "MALHAS" DE BUSCA DE SUPERFÍCIES POTENCIAIS DE DESLIZAMENTO

O mecanismo de busca de superfícies potenciais de deslizamento pode ser feito de diversas formas, tal como se pode constatar aquando da utilização de softwares comerciais como o SLOPE/W e SLIDE, nomeadamente:

- Imposição de uma superfície potencial específica
- Inserção de uma posição inicial e final das extremidades de uma superfície potencial
- Busca de potenciais deslizamentos em bloco com indicação prévia da localização dessas zonas potenciais
- Inserção de malhas de busca constituídas por uma malha de possíveis centros das circunferências e outra por pontos que darão os incrementos de raio dessas circunferências.

No programa elaborado optou-se por seguir a última hipótese porque se trata da metodologia mais utilizada e também da mais simples de implementar.

Para definição dessas duas malhas de busca, basta definir 4 vértices dum polígono rectangular e definir o número de divisões pretendidas na horizontal e vertical. Obviamente, quanto maior o número de divisões, maior o número de centros de superfícies potenciais a verificar e respectivos raios, maior volume de resultados logo factores de segurança mais rigorosos embora com um esforço computacional igualmente acrescido.

O programa TALUDE_MRC, genericamente, está formatado para analisar superfícies de deslizamento circulares, que em linguagem de programação é de maior acessibilidade de implementação, todavia existe uma opção que possibilita a análise de uma superfície de deslizamento específica com introdução directa dos pontos que a definem. Portanto a inclusão dessa opção permitirá analisar qualquer tipo de superfície de deslizamento previamente estipulada, o que vai de encontro à finalidade principal do método de Correia.

Evidentemente que o processo de cálculo referente a apenas uma superfície específica não necessitará da inclusão de malhas de busca porque aqui o problema da descoberta da superfície crítica não se coloca.

Na fase pós-cálculo o TALUDE_MRC possibilita a coloração da malha de centros para tornar mais fácil a leitura da distribuição dos coeficientes de segurança, associados às respectivas coordenadas do centro da circunferência. A cada ponto especificado na malha corresponde o coeficiente de segurança mínimo determinado para aquele ponto. Contudo, havendo a possibilidade de não existirem resultados válidos para um determinado ponto, este não apresentará qualquer coloração.

4.6. DISCRETIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES POTENCIAIS EM FATIAS

Após situar o talude e respectivas "malhas de busca" é necessário ultrapassar várias etapas até ser possível aplicar a formulação dos métodos de equilíbrio limite, ou seja, antes de aplicar o que quer que seja é obrigatório recolher uma série de dados relativos a cada superfície potencial, nomeadamente e por esta exacta ordem:

- Pontos de intersecção da circunferência com o talude e os seus diferentes estratos
- Divisão em fatias da massa potencialmente deslizante, resultante da intersecção da circunferência com o terreno. A divisão em fatias encontra-se condicionada pela possível detecção de pontos "notáveis" como intersecções com os estratos ou então o nível freático, para posteriormente facilitar a associação dos parâmetros resistentes da base de cada fatia. Logo, nestas zonas são expectáveis fatias com larguras diferentes.
- Identificação das coordenadas dos pontos constituintes de cada fatia, ora por introdução directa ou por interpolação
- Com os dados obtidos no ponto anterior é agora possível determinar a área, inclinação da base (α) e o comprimento da base de cada fatia

4.7. DISCRIMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES POTENCIAIS INVÁLIDAS

Durante o processo de discretização das superfícies potenciais podem ocorrer situações particulares que devem ser identificadas antes do cálculo do factor de segurança porque podem conduzir a um erro no programa ou então torná-lo demasiado lento devido à consideração dessas superfícies.

Portanto deve-se dotar o programa com condições que identifiquem essas superfícies e, simultaneamente, que permitam o avanço para outras sem erro.

Como casos específicos temos os seguintes:

- A circunferência não intersecta o talude logo o programa não detecta qualquer massa potencial de deslizamento para dividir em fatias
- A circunferência intersecta os limites laterais ou da base do talude, constituindo uma superfície de rotura irrealista e conduzindo a cálculos desnecessários

Outra particularidade que deve ser considerada no programa é a discriminação ou não de superfícies de deslizamento que não obedeçam a um critério de profundidade mínima. Este é um critério que depende apenas do utilizador e da profundidade mínima que este considerar apropriada, tornando inválidas superfícies que não cumpram o estipulado. Este tipo de questão surge frequentemente nos programas comerciais, nomeadamente no SLOPE/W e SLIDE, que por defeito assumem sempre uma profundidade mínima de 0.1 metros. Torna-se compreensível se se tiver em conta que acontecem casos em que as circunferências intersectam o talude quase infinitesimalmente gerando superfícies com factores de segurança muito reduzidos, que deturpam os resultados globais levando até a possíveis problemas numéricos durante o cálculo.

4.8. CÁLCULO DO FACTOR DE SEGURANÇA

Depois da recolha de todos os dados relevantes passa-se a aplicar o método de equilíbrio limite em causa. Aqui refere-se apenas um M.E.L, no entanto há que considerar que para cada M.E.L os dados a ser recolhidos previamente podem ser diferentes de acordo com as exigências.

Por exemplo, a aplicação do método de Bishop simplificado implica a indicação de um FS inicial e um critério de convergência para o processo iterativo. Todavia no método de Correia tal é desnecessário porque a formulação do método não necessita de um processo iterativo imposto, porque isso é feito internamente pelo Matlab durante a resolução do sistema de equações. Por outro lado, o método de Correia exige que sejam determinadas as coordenadas (x_m , y_m) dos pontos médios da base de cada fatia, algo que o método de Bishop não requer.

A determinação do factor de segurança será feita através da formulação enunciada por Correia e descrita em 2.3.3, com o auxílio da ferramenta de resolução de equações existente no Matlab.

Na fase inicial de desenvolvimento do programa TALUDE_MRC optou-se por tomar os resultados do caso 1 de Correia como referência porque sendo mais simples permite um controlo mais apertado dos resultados parciais, o que facilita a implementação do método, percebendo melhor as suas implicações.

4.9. ESCOLHA DA FUNÇÃO DE INTERACÇÃO TANGENCIAL

Tal como muitos estudos indicam, a função de interacção entre fatias não tem repercussões significativas no factor de segurança desde que a função se adequa a casos fisicamente admissíveis. Porém, e se for tido como objectivo obter os resultados do caso 1, recomenda-se que se utilize a função com forma semelhante à de um sino, simétrica e com três segmentos parabólicos, tal como indicado na Fig.4.1.

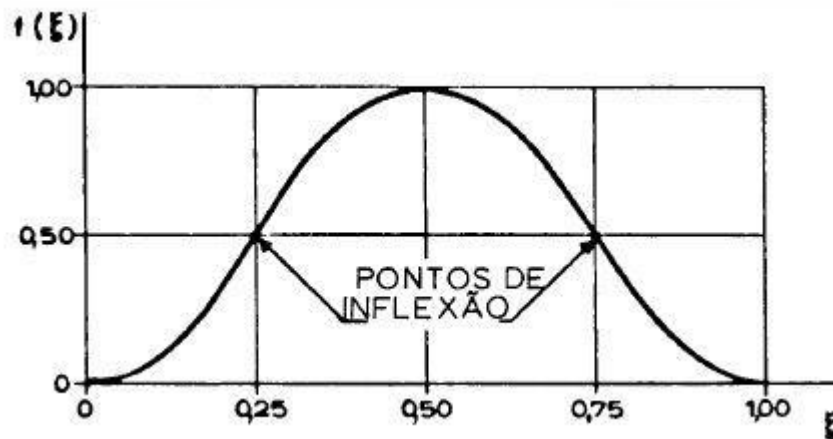


Fig.4.1 – Função de interação tangencial (Correia 1988)

Na Fig.4.1 a função de interação está definida em termos da coordenada horizontal adimensional.

$$\xi = \frac{x - x_L}{x_R - x_L} \quad (4.1)$$

A utilização de outra função como por exemplo uma função "seno" leva a resultados muito próximos em termos de FS mas que diferem nos valores de $X_{m\acute{a}x}$, como se mostra no quadro seguinte:

Quadro 4.1 – Resultados finais para diferentes funções de interação tangencial (Caso 1)

Função	FS	$X_{m\acute{a}x}$ (kN/m)
Seno	1,494	35,4
"Sino"	1,446	45,3

As diferenças ao nível do $X_{m\acute{a}x}$ levarão a uma distribuição de forças nas fatias distinta pois sendo X directamente dependente de $X_{m\acute{a}x}$ e $f(x)$, a resultante de cada fatia será relativamente diferente tal como, inerentemente, os valores intervenientes no equilíbrio de N,S e E. Todavia essas diferenças não se repercutem no FS global porque, tal como está patente no quadro anterior, este só sofre alterações da ordem das centésimas.

4.10. CARACTERIZAÇÃO TOTAL DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS NAS FATIAS

Depois de obtido o factor de segurança e o $X_{m\acute{a}x}$ é possível determinar, na totalidade, as forças de interação (X e E) e da base (N e S) na resolução simultânea do sistema de equações formado por (2.38), (2.42) e (2.43).

Será dada a opção ao utilizador de obter estes resultados específicos porque em determinadas circunstâncias pode apenas precisar de calcular o factor de segurança e assim não será realizado um esforço computacional desnecessário. É certo que isto não tem relevância quando se está a estudar

uma superfície específica, mas quando se está a efectuar uma busca de superfície crítica (analisando múltiplas superfícies) o tempo de cálculo pode crescer significativamente.

A caracterização total do equilíbrio de forças nas fatias concretiza-se em pleno com a determinação da linha de impulso, através de uma condição de equilíbrio de momentos que ditará o posicionamento das forças normais de interacção.

4.11. INTRODUÇÃO DOS DADOS INICIAIS

Outra das questões a ter em conta é a forma de introduzir dados no programa. Obviamente que a maior preocupação seria concretizar uma maneira expedita de poder introduzir os dados e até prever o que estaria para ser lido pelo programa. Logo, optou-se por criar um ficheiro em Microsoft Excel devidamente formatado para ser lido pelo programa em Matlab.

Neste ficheiro constam "inputs" acerca de:

- Número de estratos
- Existência ou não do nível freático
- Características mecânicas do solo
- Coordenadas dos diferentes estratos
- Coordenadas do nível freático
- Posicionamento da malha de centros e de incrementos de raio
- Número de fatias
- Profundidade mínima de uma superfície crítica
- Coordenadas de uma superfície específica de estudo (caso particular)

No Anexo E consta um breve tutorial onde será feita, ao leitor, a descrição do funcionamento do TALUDE_MRC nas suas diversas fases de aplicação desde a inserção de dados até à leitura de resultados.

4.12. MODIFICAÇÕES E OPTIMIZAÇÕES EFECTUADAS NO TALUDES

Para além do TALUDE_MRC realizado de raiz, o programa TALUDES já existente, sofreu algumas alterações de acordo com as exigências que se foram revelando ao longo do trabalho, nomeadamente:

- Interface gráfica (antes inexistente) com o programa Drawmesh que possibilitou a esquematização dos dados relativos à geometria do talude e malha de centros e raios após o cálculo.
- Coloração das "malhas" de centros de acordo com FS obtidos, indo de encontro com apresentação gráfica semelhante em softwares comerciais como o SLIDE.
- Imposição de uma profundidade mínima das superfícies críticas, opção que antes não estava disponível.
- Eliminação de superfícies irrealistas que intersectavam os limites inferiores e laterais dos taludes, responsáveis por factores de segurança reduzidos e que exigiam maior esforço de cálculo desnecessário.
- Alteração nas malhas de centros e raios de circunferências. Na primeira deixou de ser necessário indicar o espaçamento entre pontos e passou-se a estabelecer um número de divisões igual enquanto no caso dos raios deixou-se de indicar um raio mínimo e máximo e passou-se a introduzir uma cota mínima e máxima onde se dá variação dos raios mediante o número de divisões especificado
- Leitura de resultados efectuada em ficheiros de dados mais compactos.

5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. ORGANIZAÇÃO DA APRESENTAÇÃO

O Capítulo 5 insere-se na fase final do estudo pois trata-se já de uma fase de exposição e discussão dos resultados obtidos à luz da utilização dos diversos programas já citados, tendo como principal objectivo a validação do programa TALUDE_MRC através da sua aplicação nos vários exemplos.

Em traços gerais, ir-se-á seguir a organização sugerida na metodologia indicada no Capítulo 3. Inicialmente será feita uma comparação genérica dos resultados com vários quadros referentes aos primeiros 4 exemplos (Exemplos 1, 2, 3 e 4). Aqui serão indicados, somente, os primeiros 4 porque são os únicos que possuem resultados em SLOPE/W, SLIDE, TALUDES e TALUDE_MRC. Os restantes exemplos devido às suas especificidades serão discutidos noutra âmbito mais particular e também mais relevante.

A comparação entre M.E.L e M.E.F terá especial incidência nos Exemplos 4 e 5. No Exemplo 4 coloca-se a problemática da percolação que se instala no período de serviço da barragem.

O Exemplo 5 apesar de ser único a não ter qualquer leitura por parte do TALUDES e TALUDE_MRC é pertinente porque permite entender melhor a influência do estado de tensão do terreno e as suas sucessivas alterações na estabilidade global do talude. Logo, com os resultados retirados do SLOPE/W e SLIDE para ambos os métodos será possível fazer uma análise sustentada.

Finalmente, no relativo ao paralelismo entre método de Correia e Morgenstern-Price será elaborada uma análise mais pormenorizada dos exemplos utilizados por Correia na apresentação do método. Aqui a comparação será feita não só ao nível do FS e posicionamento da superfície crítica como também ao nível das forças registadas nas fatias e nas respectivas zonas de interacção. E procurar-se-á explicitar as razões que expliquem tanto as semelhanças como as diferenças.

5.2. COMPARAÇÃO ENTRE PROGRAMAS E MÉTODOS

5.2.1. RESULTADOS (EXEMPLO 1)

Neste primeiro caso trata-se de um talude extremamente simples ao nível da geometria e homogeneidade do terreno. Portanto, à partida, é expectável que os resultados dos vários programas sejam bastante próximos

Quadro 5.1 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W	Slope/W+Sigma/W	Slide	Taludes	TALUDE_MRC*	$X_{\text{máx}}$ (kN/m)
Fellenius	1,85		1,853	1,854		
Bishop	1,93					
Bishop simplificado			1,934	1,934		
Spencer	1,93		1,932			
Janbu	1,84		1,838			
Morgenstern- Price	1,93		1,931			
Correia					1,78	495,7
MEF		1,91				

Tal como se pode constatar pelo quadro, os resultados encontram-se efectivamente muito próximos. Nomeadamente, aqueles que provêm do SLOPE e SLIDE possuem uma correspondência quase à milésima algo que se veio também a verificar com o TALUDES.

A uniformidade dos resultados também se deveu a uma inserção de dados rigorosa, onde se teve o cuidado de colocar o "input" o mais idêntico possível para os 4 programas.

Através do MEF obteve-se um FS muito satisfatório comprovando a teoria de que para casos bastante simples de geometria e características do terreno, o estado de tensão pouca influência tem na estabilidade.

O FS correspondente a Correia é o que apresenta uma maior diferença relativamente a Morgenstern-Price, e tal como se pode analisar pela localização do centro da circunferência e raio (ver informação complementar em anexo), estes indicam que durante o processo de busca de superfícies críticas este encontrou uma com outra localização, de FS ainda mais baixo, como ilustrado na Fig.5.1.

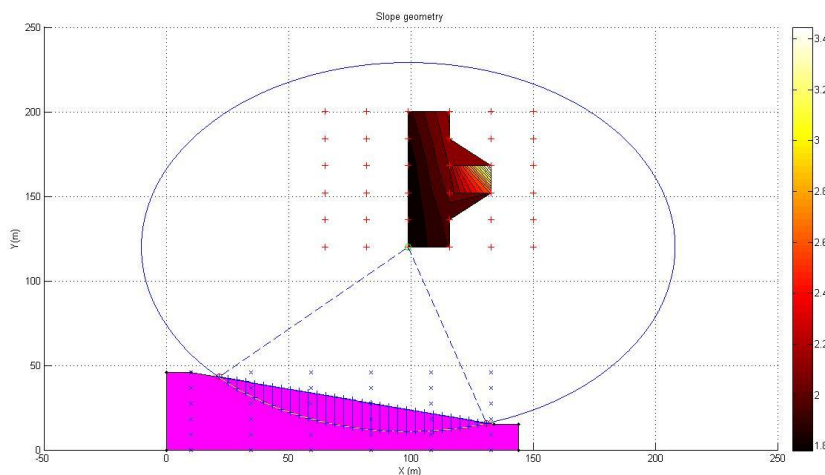


Fig.5.1 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC

Porém, se se for mais rigoroso na leitura dos dados, consultando a tabela de resultados referentes às várias superfícies (ver anexo) analisadas pode-se encontrar superfícies com centros e raios muito próximos dos obtidos em SLOPE, SLIDE e TALUDES e com factor de segurança na ordem dos 1.9.

Outra constatação presente no Quadro 5.1 na comparação de FS entre Bishop, Janbu e M-P vai de encontro ao indicado previamente no subcapítulo 2.4.2 pois a superfície de rotura circular apresenta FS de Bishop e M-P iguais e o de Janbu inferior.

5.2.2. RESULTADOS (EXEMPLO 2)

O Exemplo 2 conta com uma geometria relativamente simples, mas agora bastante estratificada, o que pode levar a diferenças nos resultados dos programas abertos, como o TALUDES e o TALUDE_MRC, porque sendo o SLOPE/W e SLIDE programas comerciais muito competitivos e consistentes não será de esperar efeitos inesperados derivados à estratificação.

Quadro 5.2 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W	Slope/W + Sigma/W	Slide	Taludes	TALUDE_MRC*	$X_{máx}$ (kN/m)
Fellenius	1,436		1,436	1,196		
Bishop	1,53					
Bishop Simplificado			1,534	1,224		
Spencer	1,525		1,528			
Janbu	1,403		1,401			
Morgenstern-Price	1,526		1,53			
Correia					1,304	159,19
MEF		1,579				

O quadro 5.2 demonstra que resultados de SLOPE/W e SLIDE são condizentes em praticamente todos os métodos. Contudo, o TALUDES e TALUDE_MRC oferecem soluções mais discrepantes e ambas conservadoras.

Quanto ao TALUDES, consultando informação complementar em anexo, percebe-se que este encontrou uma superfície crítica de raio menor, o que certamente afectou com maior incidência o momento estabilizador e levou a uma FS reduzido. Embora sendo um resultado subvalorizado e inócuo porque a superfície é realmente muito reduzida, a leitura de resultados complementares do TALUDES demonstram que superfícies mais significativas e até com geometria próxima do SLOPE/W e SLIDE com FS mais aproximados.

O resultado do TALUDE_MRC deve-se tanto ao facto de o próprio método ter descoberto um FS ainda menor como também surge de uma superfície centrada numa localização ligeiramente distinta dos outros métodos. (ver anexo A2)

A necessidade de malhas de busca mais refinadas deve-se ao facto de no TALUDE_MRC terem sido inseridos os mesmos vértices que definem a área de busca. No entanto, no SLOPE e SLIDE considerou-se 20 divisões da área de busca (na horizontal e vertical) perfazendo milhares de superfícies potenciais analisadas, algo que o TALUDE_MRC não consegue fazer porque teria de se

realizar um esforço computacional imenso e demorado. Logo optou-se por 5 divisões, o que resultou na análise de 216 superfícies. Mas com a comparação dos resultados finais conclui-se que seria necessária uma análise mais direccionada e cuidadosa como compensação.

Quanto ao MEF, este apresenta resultados que vão de encontro aos verificados nos restantes MEL, comprovando mais uma vez que em situações onde o estado de tensão do terreno não apresenta nenhuma particularidade de maior, os MEL continuam a ser uma solução fiável.

Neste exemplo, tal como no primeiro, os resultados de Bishop e M-P são praticamente iguais enquanto Janbu é menor. O que vai de encontro com as premissas do subcapítulo 2.4.2 relativamente a superfícies críticas circulares.

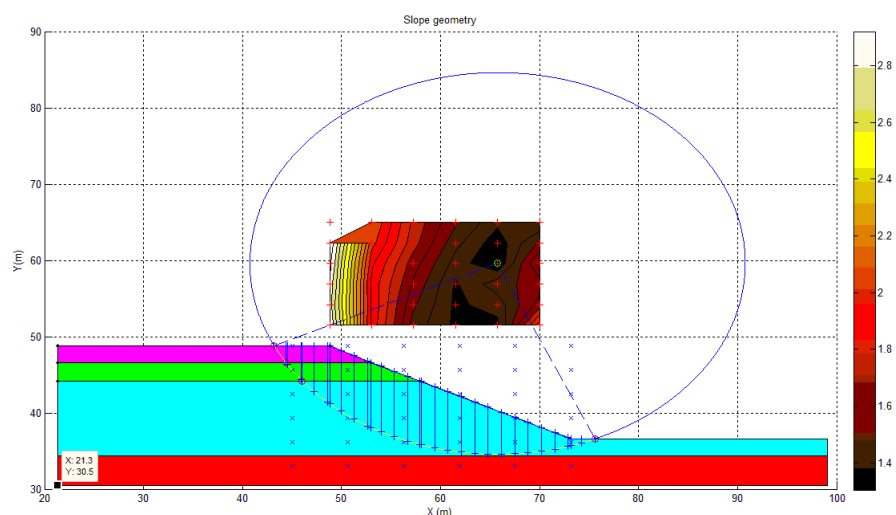


Fig.5.2 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC

5.2.3. RESULTADOS (EXEMPLO 3)

O exemplo 3 apresenta duas particularidades:

- Um estrato fino e de baixa resistência
- Um estrato mais profundo tido como "bedrock".

O segundo ponto apresenta-se como mais pertinente porque programas como o TALUDES e o TALUDE_MRC não possuem meios para reconhecerem um estrato como "bedrock" e as respectivas implicações que este tem para o cálculo, ou inclusivamente na geometria da superfície crítica que muito provavelmente será composta.

Quadro 5.3 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W	Slope/W+Sigma/W	Slide	Taludes	TALUDE_MRC*	X _{máx} (kN/m)
Fellenius	1,309		1,588	1,573		
Bishop	1,562					
Bishop Simplificado			1,748	1,735		
Spencer	1,565		1,744			

Janbu	1,468	1,636	
Morgenstern-Price	1,537	1,727	
Correia			2,022 105,93
MEF	1,518		

Tal como esperado, os resultados apresentam grande heterogeneidade, não tanto entre métodos mas acima de tudo entre programas, sendo o SLOPE/ W aquele que apresenta resultados mais fiáveis porque é o único a considerar superfície de rotura composta, acabando por lidar adequadamente com a combinação do estrato de baixa resistência e o "bedrock" subjacente tal como ilustra a imagem. As restantes imagens referentes às superfícies críticas determinadas em outros programas encontram-se em anexo. (ver anexo A3)

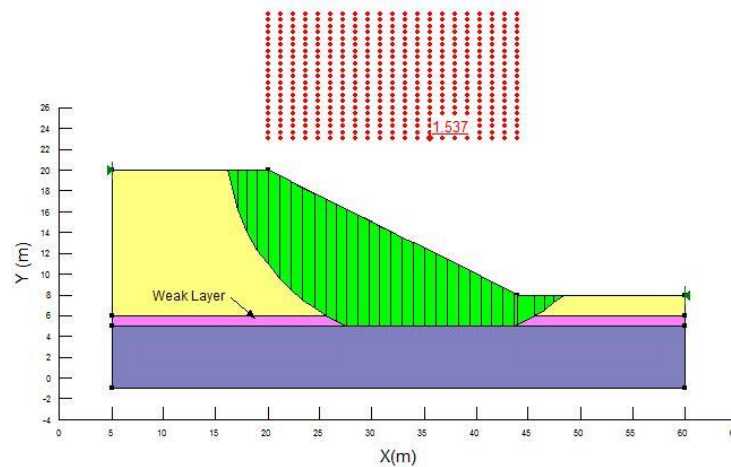


Fig.5.3 – Superfície crítica determinada através do SLOPE/W

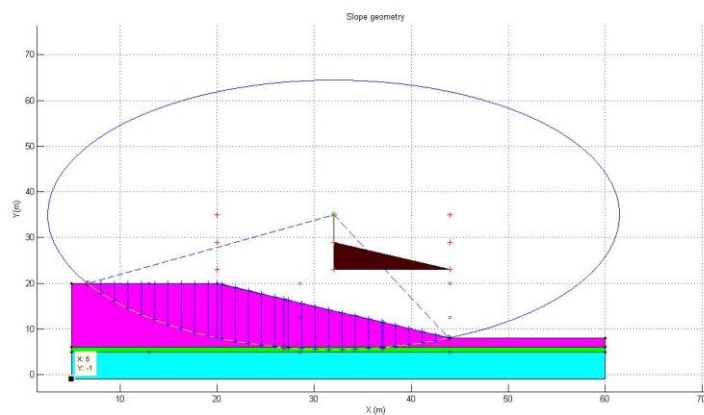


Fig.5.4 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC num processo de busca de múltiplas superfícies (resultado não satisfatório)

Parte da responsabilidade deste diferendo de resultados entre programas comerciais e programas abertos deve-se aos dados iniciais inseridos. Para possibilitar o processamento de qualquer exemplo é estritamente necessário caracterizar devidamente todos os estratos. Porém, enquanto SLOPE/W e SLIDE proporcionam essa opção de identificação do "bedrock" automaticamente, no TALUDES e TALUDE_MRC essa caracterização terá de ser improvisada com características

mecânicas muito elevadas que acabam por adulterar os coeficientes de segurança, retirando-lhes alguma fiabilidade.

Entretanto, sabendo que TALUDE_MRC está dotado da opção de análise para superfícies pré-determinadas decidiu-se retirar a geometria da superfície de rotura determinada em SLOPE/W e transpô-la para o TALUDE_MRC e dividida em 30 fatias.

Desse cálculo suplementar surgiu $FS=1.448$ ($X_{máx}=58.03$ kN/m) mais razoável e de encontro com o FS registado no SLOPE/W.

Sendo a superfície de análise composta por superfícies circulares e uma plana, superfícies referidas no subcapítulo 2.4.3, convém referir que os coeficientes de segurança de Bishop, M-P e Janbu conferem as premissas do mesmo, ou seja, $FS_{Bishop} > FS_{M-P} > FS_{Janbu}$

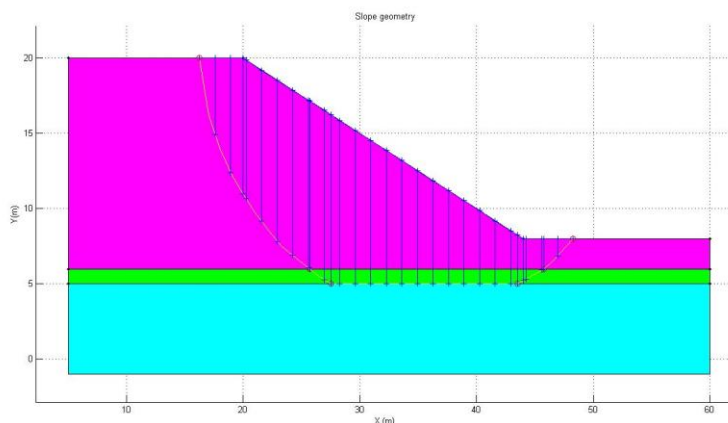


Fig.5.5 – Superfície crítica pré-determinada e processada no TALUDE_MRC

5.2.4. RESULTADOS (EXEMPLO 4)

O Exemplo 4 lida com um caso de estabilidade dos taludes de uma barragem de aterro homogénea e simétrica. A análise é efectuada na fase final de construção pelo que poderá ser realizada em qualquer um dos taludes, de jusante ou de montante.

Numa primeira fase são apenas comparados os coeficientes de segurança relativos à fase final de construção da barragem porque assim há possibilidade de leitura de resultados em todos os programas, sem qualquer interferência de forças de percolação que surgem no cenário de pleno armazenamento que é objecto de análise mais pormenorizada no subcapítulo seguinte.

Quadro 5.4 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W	Slope/W+Sigma/W	Slide	Taludes	TALUDE_MRC*	$X_{máx}$ (kN/m)
Fellenius	2,307		2,320	2,331		
Bishop	2,421					
Bishop Simplificado			2,428	2,433		
Spencer			2,426			
Janbu	2,264		2,269			
Morgenstern-Price	2,418		2,423			

Correia		2,09	131,44
MEF	2,4		

Como seria de esperar os FS obtidos não apresentam grandes discrepâncias devido à simplicidade do exemplo, embora a maior relevância esteja na forma como o TALUDE_MRC lida com a geometria da barragem, podendo proporcionar superfícies potenciais com geometrias particulares e distintas daquelas que se verificariam em taludes naturais correntes. (ver resultados complementares no Anexo A4).

Finalmente, e tal como nos exemplos anteriores, aqui a comparação entre Bishop, M-P e Janbu condiz com o indicado em 2.4.2 porque tanto Bishop e M-P apresentam Fs semelhantes como Janbu é inferior a estes.

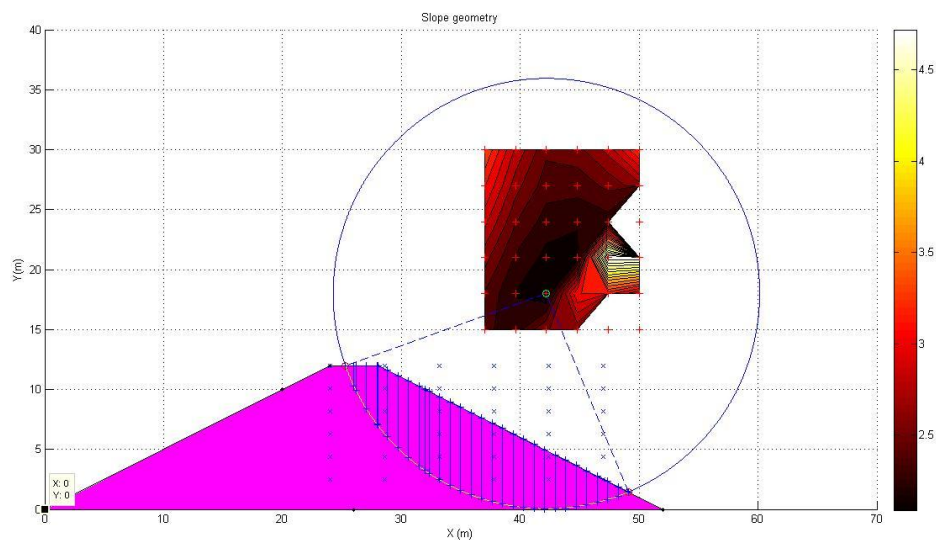


Fig.5.6 – Superfície crítica determinada através do TALUDE_MRC

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE M.E.L E M.E.F

5.3.1. RESULTADOS (EXEMPLO 4) DE UMA ANÁLISE DE M.E.F. (SLOPE/W+SEEP/W+SIGMA/W)

Actualmente, em programas comerciais dotados de capacidade de análise com o método dos elementos finitos, é possível conjugar a análise da percolação com a da estabilidade, o que após uma caracterização adequada dos parâmetros mecânicos e hidráulicos (em anexo), permite um estudo mais rigoroso das condições de pleno armazenamento, para daí comparar com resultados do subcapítulo anterior.

Portanto será realizada uma análise combinada entre SLOPE/W, SEEP/W e SIGMA/W para compreender a influência da percolação e estado de tensão na estabilidade.

Como o estudo se limitará a estudar a percolação numa fase de serviço da barragem após atingir o nível de pleno armazenamento (NPA), será mais pertinente observar o comportamento do talude de

justante porque como está instalado o NPA e não se coloca a hipótese de existir um esvaziamento rápido, o talude de montante terá, até, um acréscimo de estabilidade.

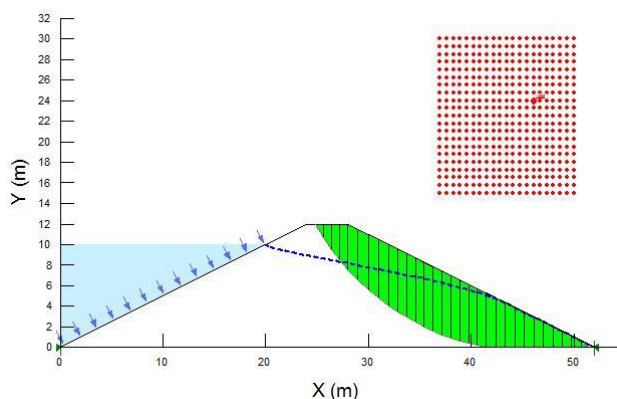


Fig.5.7 – Superfície crítica determinada através do SLOPE/W+SEEP/W+SIGMA/W e linha de saturação

Quadro 5.5 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W+Seep/W	Slope/W+Sigma/W+Seep/W	Slide
Fellenius	1,724		1,761
Bishop	1,865		
Bishop Simplificado			1,884
Spencer			1,885
Janbu	1,743		1,768
Morgenstern-Price	1,871		1,883
MEF		1,855	

E, como era aguardado, os coeficientes de segurança sofreram uma redução significativa com a inclusão das forças de percolação no corpo da barragem. Estas forças, sendo quase perpendiculares ou oblíquas (e com o sentido do escoamento) às fatias do talude, contribuirão com um efeito instabilizador.

Outro pormenor a registar é a reduzida diferença do FS entre casos que apenas incluem a percolação e a percolação acrescida do estado de tensão *in situ*. Isto leva a concluir que o estado de tensão tem neste caso uma influência ínfima na estabilidade.

5.3.2. RESULTADOS (EXEMPLO 5)

O Exemplo 5 refere-se a um problema comum em Geotecnia que é a estabilidade de estruturas de suporte de terras no caso em que, durante o seu processo construtivo, seja necessário proceder a escavações sucessivas que levam à alteração do estado de tensão do terreno.

O que o estudo pretende comparar é:

- Estabilidade do talude no tardo da parede de estacas ancorada sem modificação do estado de tensão
- Estabilidade do talude no tardo da parede de estacas ancorada com modificação do estado de tensão ao longo do processo de escavação

O primeiro ponto foi executado tanto em SLOPE/W como em SLIDE enquanto o segundo surge de uma análise combinada entre SLOPE/W e SIGMA/W.

Como era previsto, os resultados apresentados pelos M.E.L da primeira abordagem surgem com coeficientes de segurança superiores ao obtido pelo M.E.F. Isto confirma a premissa de que situações mais complexas do estado de tensão do terreno interferem directamente na estabilidade.

Quadro 5.6 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos

Métodos	Slope/W	Slope/W+Sigma/W	Slide
Fellenius	1,543		1,51
Bishop	1,892		
Bishop Simplificado			1,859
Spencer	1,898		1,854
Janbu	1,591		1,682
Morgenstern-Price	1,903		1,859
MEF		1,416	

As causas para tal diferença deve-se ao facto de os M.E.L não assumirem:

- A influência da cortina de estacas na estabilidade, especialmente na zona de interface entre o terreno e o tardo da cortina
- As alterações sucessivas do estado de tensão do terreno promovidas pelo processo de escavação e activação das ancoragens

Apesar das diferenças nos coeficientes de segurança a solução permanece segura, todavia convém ficar alerta para este tipo de questões na abordagem deste género de problemas.

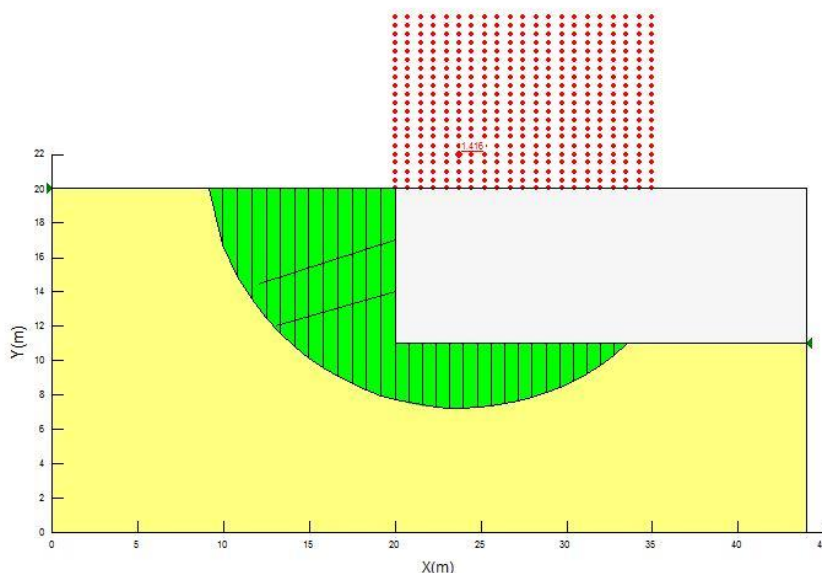


Fig.5.8 Superfície crítica determinada através do SLOPE/W+SIGMA/W

5.4. COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE CORREIA E MORGENSTERN – PRICE (M-P)

A comparação mais detalhada entre o método de Correia e Morgenstern-Price será baseada nos dois casos apresentados por Correia (1988) no trabalho em que é proposto o método.

A utilização destes dois casos permitirá usar como referência os resultados já existentes de Morgenstern-Price e Correia e a partir daí transpô-los para SLOPE/W e TALUDE_MRC para obter os coeficientes de segurança e resultados parciais o mais próximo possível dos valores de referência e que automaticamente permitiriam validar o TALUDE_MRC como programa de cálculo de estabilidade

Neste ponto serão comparados não só os coeficientes de segurança como também as forças de interação das fatias e até forças na base das fatias.

5.4.1. CASO 1 DE CORREIA

Este primeiro caso retrata um talude homogêneo com uma geometria relativamente simples, sendo sujeita a estudo uma superfície de deslizamento previamente determinada.

Inicialmente, procedeu-se à verificação dos resultados de M-P no SLOPE/W para as duas funções de forças de interação onde os resultados apresentaram uma proximidade muito grande (ao nível das milésimas praticamente).

Quadro 5.7 – Verificação e validação de resultados de M-P de Correia (1988)

Morgenstern-Price (SLOPE/W)			Morgenstern-Price (Correia 1988)		
Fs	λ	Função interação	Fs	λ	Função interação
1,471	0,4404	X/E= Const	1,472	0,424	X/E=Const
1,466	0,5423	X/E= sen(θ)	1,467	0,531	X/E= sen(θ)

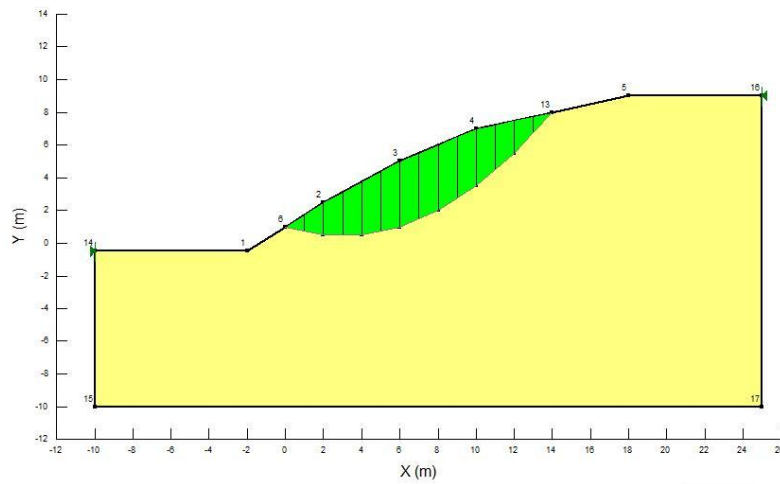


Fig.5.9 – Superfície crítica analisada através do SLOPE/W

Posteriormente foi analisada a mesma situação no TALUDE_MRC tendo-se obtido os resultados transcritos no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Verificação e validação de resultados de Correia (1988)

Correia (1988)		TALUDE_MRC	
FS	$X_{m\acute{a}x}(kN/m)$	FS	$X_{m\acute{a}x}(kN/m)$
1,449	45,4	1,446	45,3

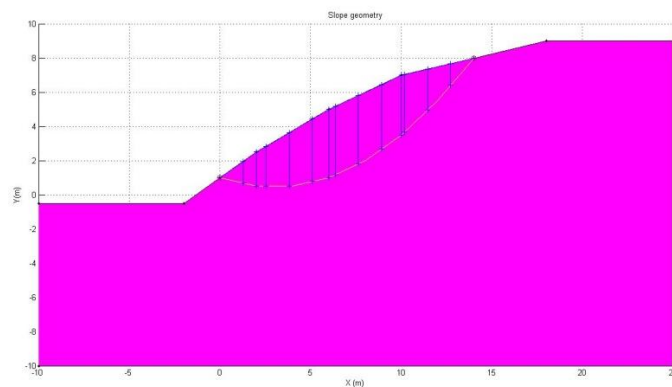


Fig.5.10 – Superfície crítica analisada através do TALUDE_MRC

Depois de devidamente confirmados estes resultados passou-se para uma análise mais detalhada ao nível das forças nas zonas de interacção entre fatias e na base das mesmas, ou seja, efectuou-se uma comparação gráfica entre X, E, N e S registados pelo método de Correia e M-P.

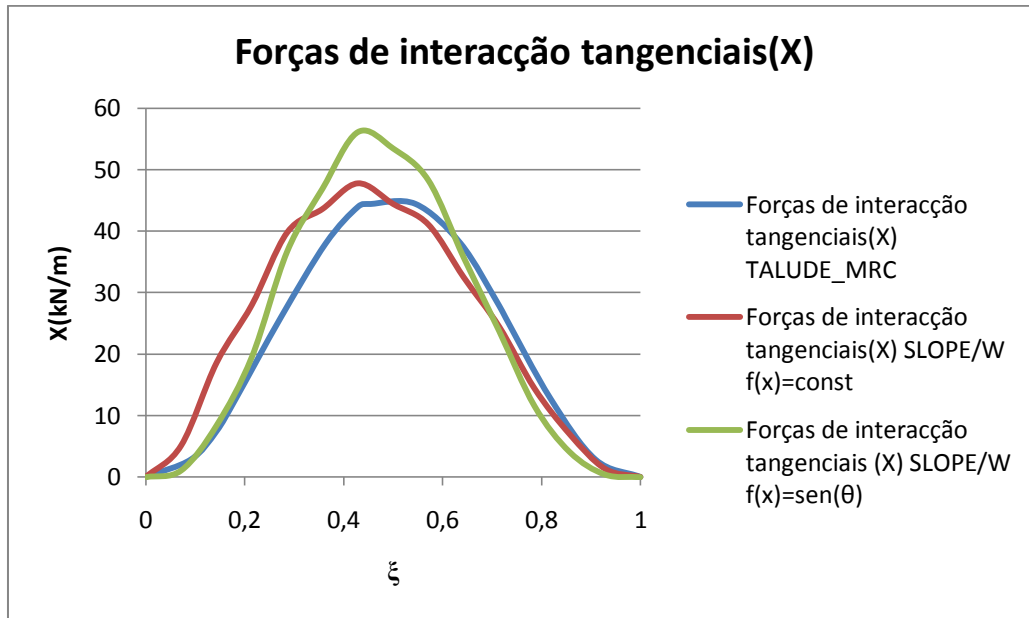


Fig.5.11 - Comparação de X obtido a partir M-P e Correia

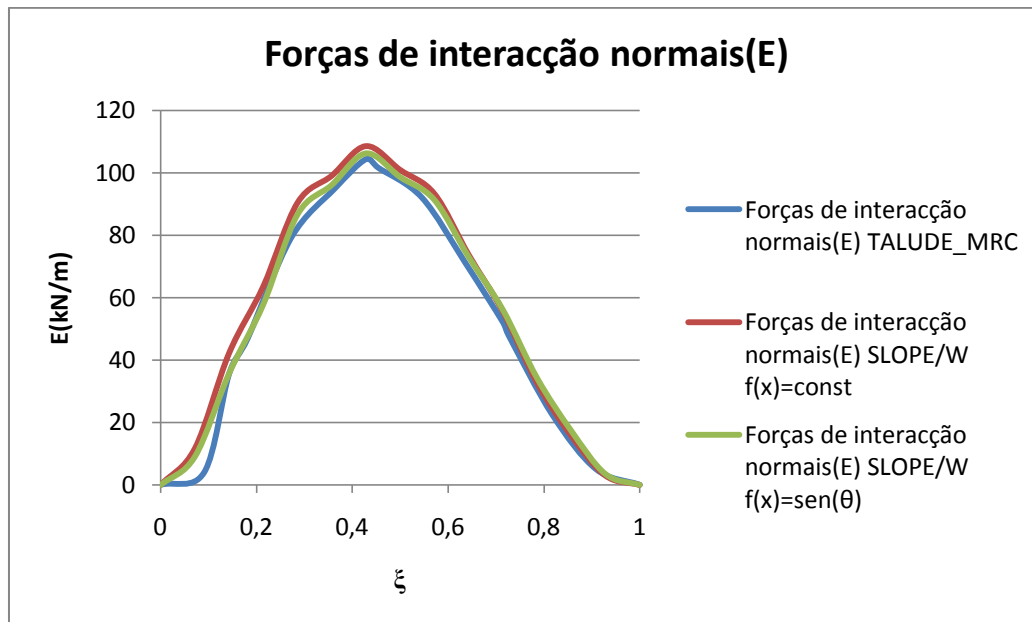


Fig.5.12 - Comparação de E obtido a partir M-P e Correia

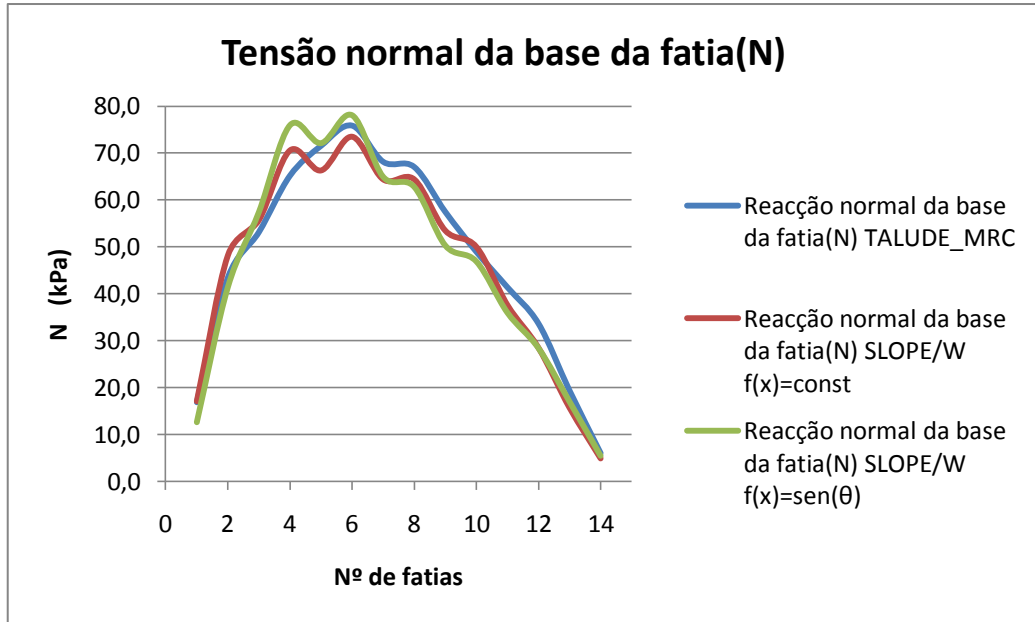


Fig.5.13 - Comparação de N obtido a partir M-P e Correia

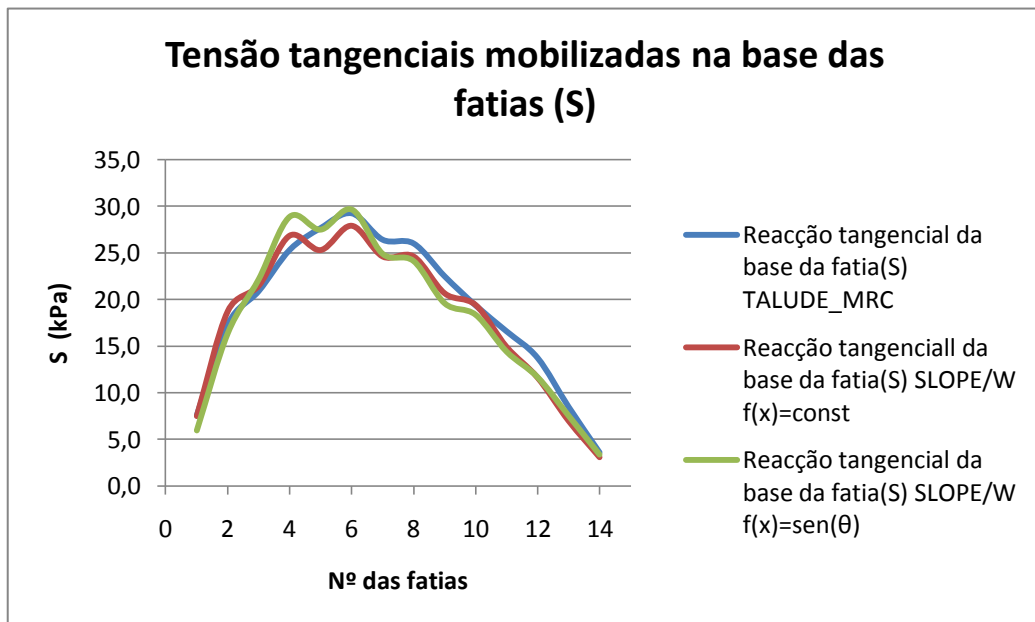


Fig.5.14 - Comparação de S obtido a partir M-P e Correia

Tal como está retratado nas Figuras 5.11 a 5.14, a convergência dos resultados é bastante satisfatória porque em quase todos se verifica grande proximidade das curvas características dos esforços, embora com ligeiras diferenças ao nível das forças tangenciais entre fatias que são fortemente condicionadas pelas funções de interacção impostas. Logo, sendo as três funções distintas, aguardava-se obviamente uma distribuição de esforços entre fatias ligeiramente diferente.

Convém referir que os gráficos de comparação das forças de interacção tangenciais e normais são feitas relativamente a uma escala horizontal adimensional, ξ . Para garantir que a distribuição de forças

tangenciais se assemelhe à função "sino"(Fig.4.1) imposta e não sofra distorções de escala caso o eixo horizontal dos gráficos fosse relativo ao número de zonas de interacção entre fatias.

5.4.2. CASO 2 DE CORREIA

Este segundo caso apresenta uma maior complexidade que os restantes exemplos pois considera um estrato pouco espesso de baixa resistência, nível freático e ainda uma superfície crítica composta.

A fase inicial foi semelhante à realizada no Caso 1 com a transposição dos dados do problema para os programas SLOPE/W e TALUDE_MRC, tendo-se de novo verificado grande convergência de resultados.

Quadro 5.9 – Verificação e validação de resultados de M-P de Correia (1988)

Morgenstern-Price (SLOPE/W)			Morgenstern-Price (Correia 1988)		
FS	λ	Função interacção	FS	λ	Função interacção
1.649	0.1398	$X/E = \text{sen}(\theta)$	1.656	0.145	$X/E = \text{sen}(\theta)$

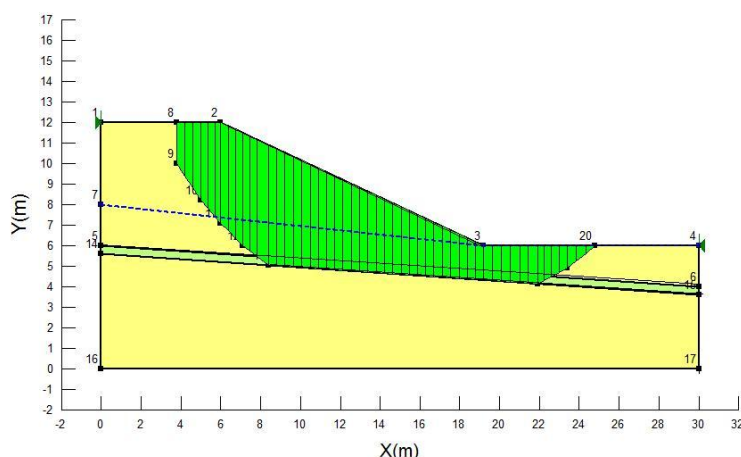


Fig.5.15 – Superfície crítica analisada através do SLOPE/W

Continuando no seguimento da metodologia inicial, a solução do Caso 2 no TALUDE_MRC resultou nos valores apresentados no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Verificação e validação de resultados de Correia (1988)

Correia (1988)		TALUDE_MRC	
FS	$X_{\text{máx}}$ (kN/m)	FS	$X_{\text{máx}}$ (kN/m)
1,631	18,7	1,607	14,4

Verificada a conformidade dos resultados passou-se à comparação das forças nas fatias e correspondentes zonas de interacção.

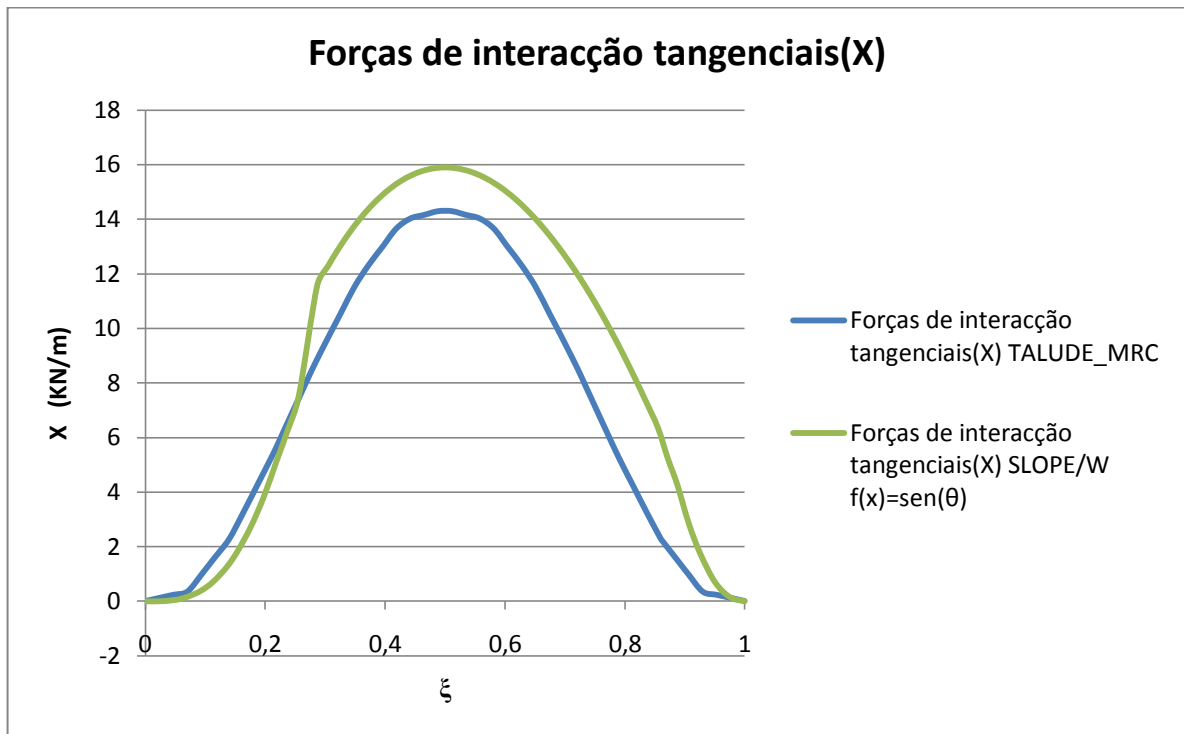


Fig.5.16-. Comparação de X obtido a partir M-P e Correia

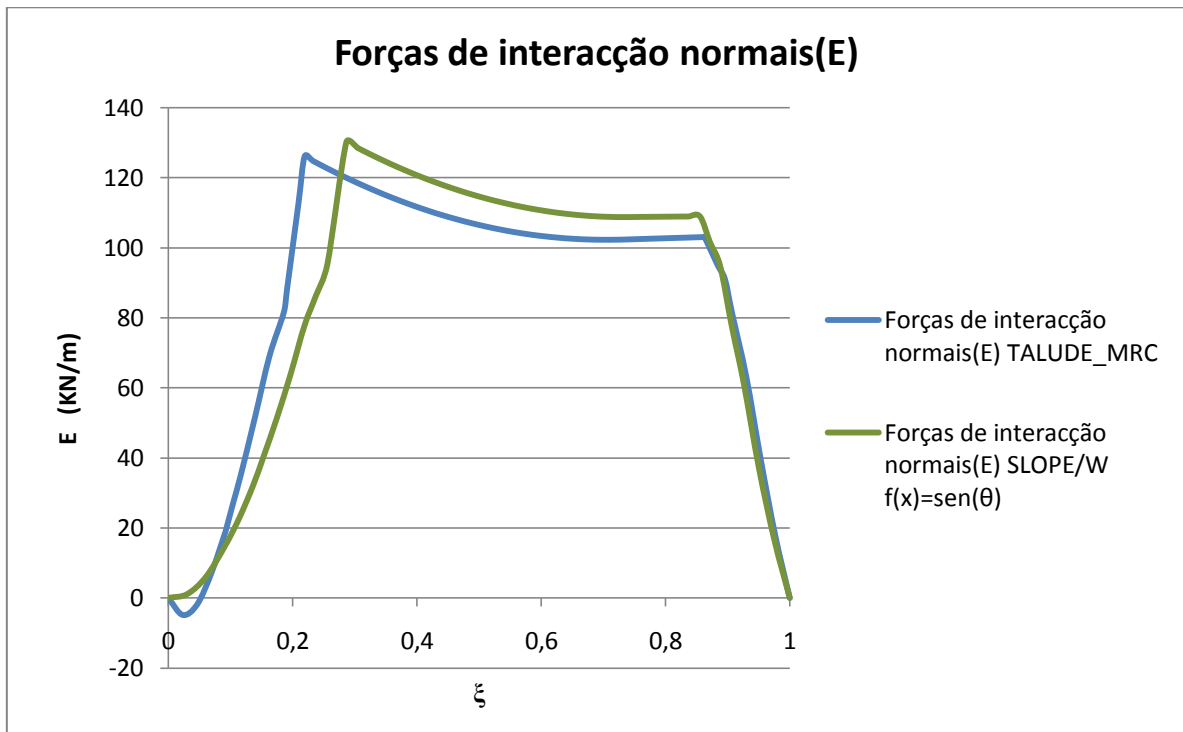


Fig.5.17- Comparação de E obtido a partir M-P e Correia

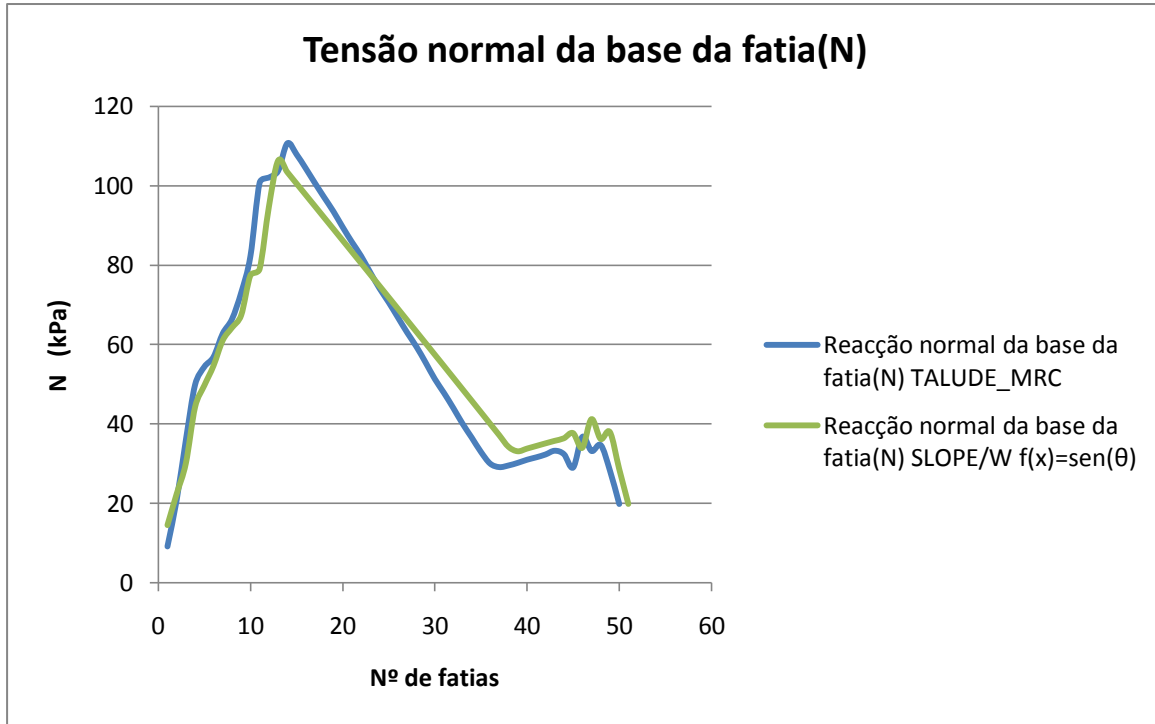


Fig.5.18- Comparação de N obtido a partir M-P e Correia

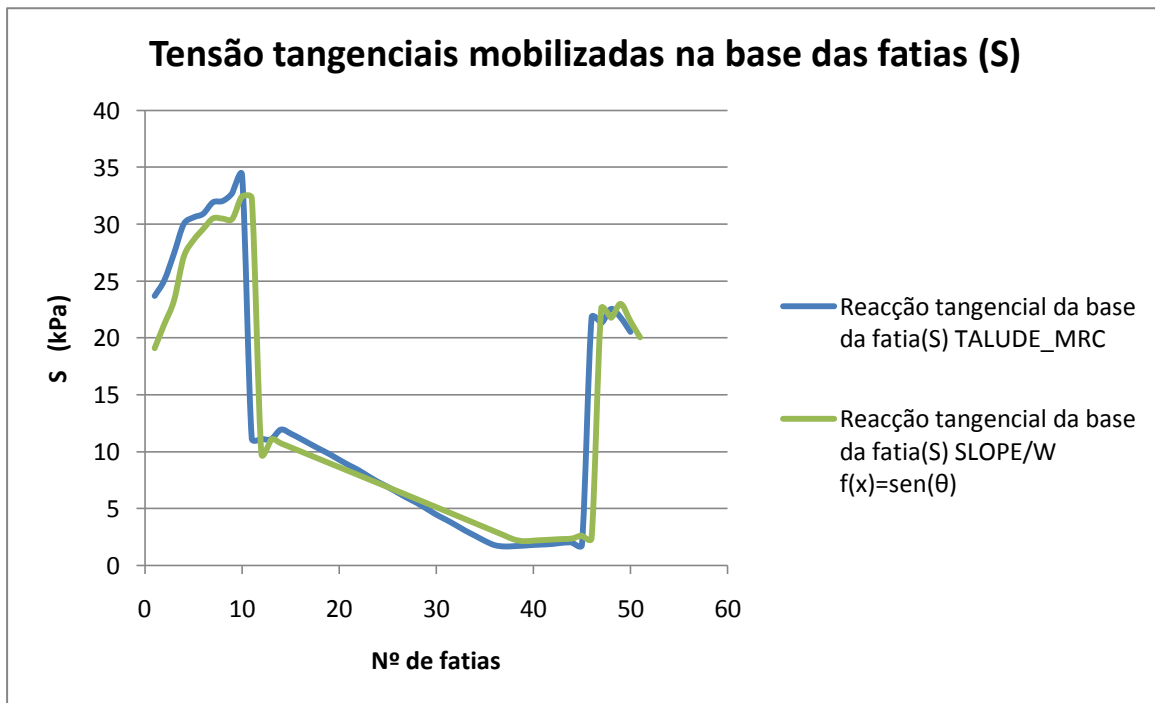


Fig.5.19 - Comparação de S obtido a partir M-P e Correia

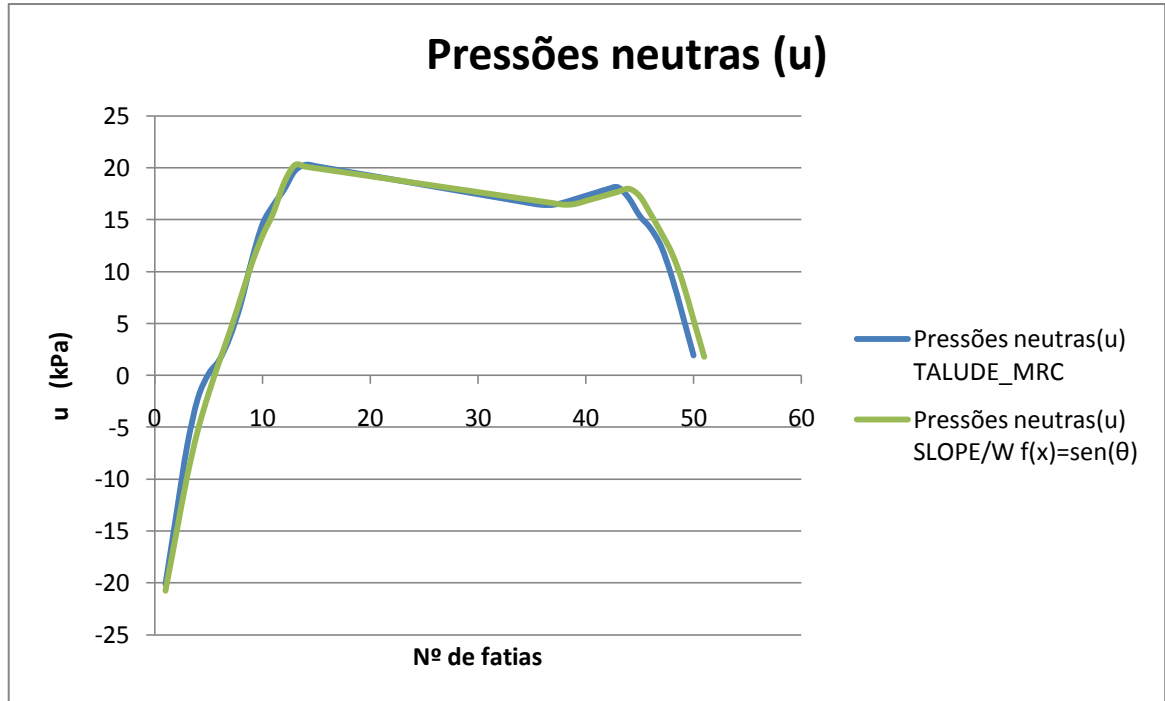


Fig.5.20 - Comparação de u obtido a partir M-P e Correia

Como se pode constatar pelas Figuras 5.16 a 5.20 as forças existentes nas fatias tanto para o método de Correia como Morgenstern-Price apresentam grande semelhança no global. Contudo as forças tangenciais (X) são as que demonstram, novamente, maior disparidade, algo que neste caso não será explicado apenas pelas funções de interação.

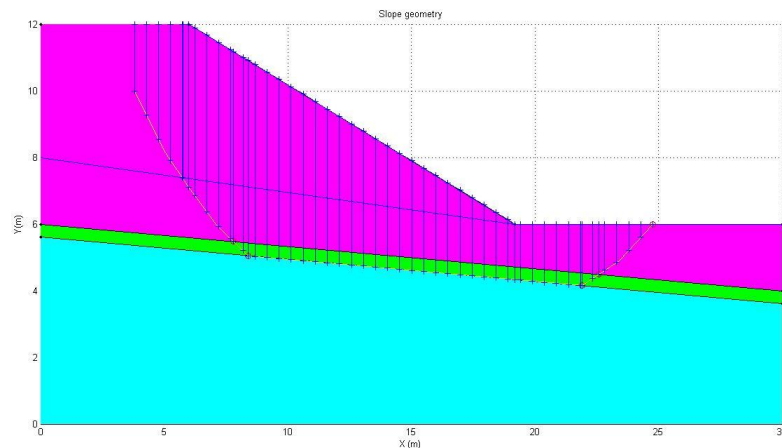


Fig.5.21 - Superfície crítica analisada através do TALUDE_MRC

Também se tem de referir que se devem contabilizar as pressões intersticiais negativas que surgem em fatias emersas porque também provocam interferências na obtenção do coeficiente de segurança final. O programa TALUDE_MRC já se encontra devidamente preparado para esta particularidade.

Estes pormenores, combinados com a não linearidade do sistema de equações responsável pela determinação do coeficiente de segurança, resultam em pequenas diferenças do FS, normalmente, ao

nível das centésimas. Porém, como $X_{\text{máx}}$ é sensível a esta variação é normal que este surja diferente do aguardado.

No Caso 2 o $X_{\text{máx}}$ resultante é um pouco mais baixo do que o esperado e sabendo que este tem influência directa nas forças tangenciais (X), percebe-se a razão de no gráfico referente às forças tangenciais de interacção se registar a maior diferença.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como síntese do trabalho apresentado considera-se pertinente expressar algumas considerações finais.

No que se refere à comparação entre os métodos de equilíbrio limite clássicos e os ditos " exactos", os resultados finais dos vários exemplos foram de encontro com as premissas expostas ao longo do capítulo 2.

Avanços notáveis nos programas comerciais possibilitam o recurso ao M.E.F de forma expedita, com resultados satisfatórios e que em determinadas circunstâncias revelam a importância do estado de tensão in-situ na estabilidade global.

O rigor da localização e constituição das malhas de busca é fulcral para resultados finais mais fiáveis e convergentes entre programas.

O TALUDE_MRC apresenta resultados satisfatórios, especialmente nos casos 1e 2 de Correia, embora nos restantes exemplos surja com coeficientes de segurança mais conservadores do que Morgenstern-Price. O que revela a necessidade do programa ser testado num maior, e mais variado, número de situações. Logo, com esse intuito, e após sujeitar os diversos exemplos a uma análise no TALUDE_MRC tornaram-se perceptíveis algumas insuficiências do programa que poderão ser colmatadas em versões posteriores.

Essas insuficiências centram-se em aspectos do próprio cálculo ou então em formas mais expeditas de introdução de dados e leitura de resultados, tais como:

- Inclusão de um maior número de estratos, (por agora limitado a 4)
- Determinação e inclusão da linha de impulso na representação gráfica final
- Identificação automática de superfícies compostas
- Identificação de estratos designados como "bedrock"
- Possibilidade de inclusão de sobrecargas
- Possibilidade de inclusão de ancoragens ou pregagens
- Criação de uma interface interna em Matlab que possibilite a introdução dos dados, passando a ser dispensável a utilização de um ficheiro de MS EXCEL
- Introdução da geometria dos taludes, malha de centros e malha de raios através de uma ferramenta de desenho do tipo CAD
- Processo de cálculo mais rápido
- Inclusão da acção sísmica
- Inclusão de malhas de busca relativas ao incremento de raios com formas poligonais tais como SLOPE/W e SLIDE

- Malhas de busca de centros e de raios com um número de divisões na vertical e horizontal distinto

BIBLIOGRAFIA

- Albatineh, Nermeen (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*, Master Thesis, The Graduate Faculty of the University of Akron
- Aberra, D.K. (2003). *Discrete element method for slope stability analysis*, Master Thesis, Addis Ababa University
- Berti, M. (2004). *Soluzione del metodo dell'equilibrio limite globale per l'analisi di stabilità dei versanti*, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna
- Bishop, A.W. (1955). *The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes*. Geotechnique. Vol. 1, pp. 7-17
- Correia, R.M. (1988). *A limit equilibrium method for slope stability analysis*. Proc. 5th Int. Symp. Landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 595-598
- Espinoza, R. D., Reppeto, P. C., Muhunthan, B. (1992). *General framework for stability analysis of slope*, Geotechnique 42, No. 4, pp. 603-615
- Ferreira, A.J.M (2009), *Matlab codes for Finite Elements analysis*, Springer, Porto
- Fredlund, D.G., and Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, Vol 14: pp. 429-439.
- Guedes de Melo, P. (1993), *Taludes naturais em solos - Técnicas de estabilização e seu dimensionamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa
- Krahn, J., (2004). *Stability Modeling with SLOPE/W – An Engineering Methodology*, GEO-SLOPE, Alberta, Canada
- Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B., Curran, J., *A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation*, Rocscience, Toronto, Canada
- Krahn, J. (2003). *The 2001 R.M Hardy Lecture: The Limits of Limit equilibrium Analyses*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40. pp. 643-660
- Martins, J. B. (2006). *Limit equilibrium of ground loaded masses. a general pc program for the factor of safety by rigid-plastic methods*, 5th Int. Conf. Mech. & M. Design, FEUP, Porto, Portugal.
- Matos Fernandes, (2006), M. *Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais*, Volume 1. FEUP Edições, Porto
- Morgenstern, N.R., and Price, V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, Vol 15(1): pp 79-93.
- Spencer, E. (1967). *A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Inter-slice Forces*, Vol 17(1), pp 11-26
- US Army Corps of Engineers, (1967). *Stability of slopes and foundations: engineering manual*. US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss.

Zhu, D. Y., Lee C. F. & Jiang H. D.(2003). *Generalized framework of limit equilibrium methods for the stability analysis*, *Géotechnique* 53, N°.4, pp. 77-395.

<http://www.geo-slope.com/> , 03/2010

<http://www.roscience.com/>, 03/2010

<http://daveslandslideblog.blogspot.com/>, 03/2010

<http://www.mathworks.com/>, 04/2010

ANEXO A – RESULTADOS COMPLEMENTARES (SLOPE/W, SLIDE , TALUDES E TALUDE_MRC)

A1 -EXEMPLO 1

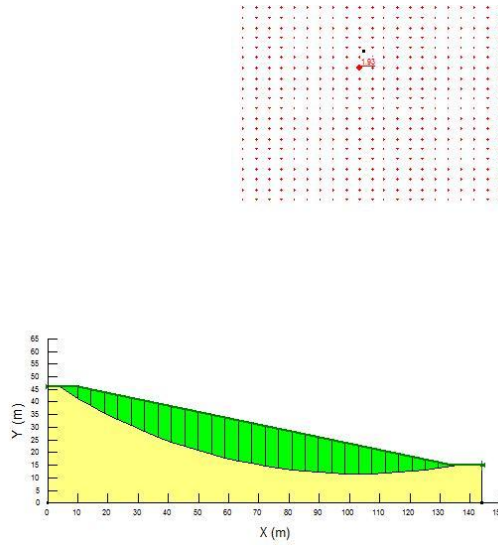


Fig.A.1.1 - Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.

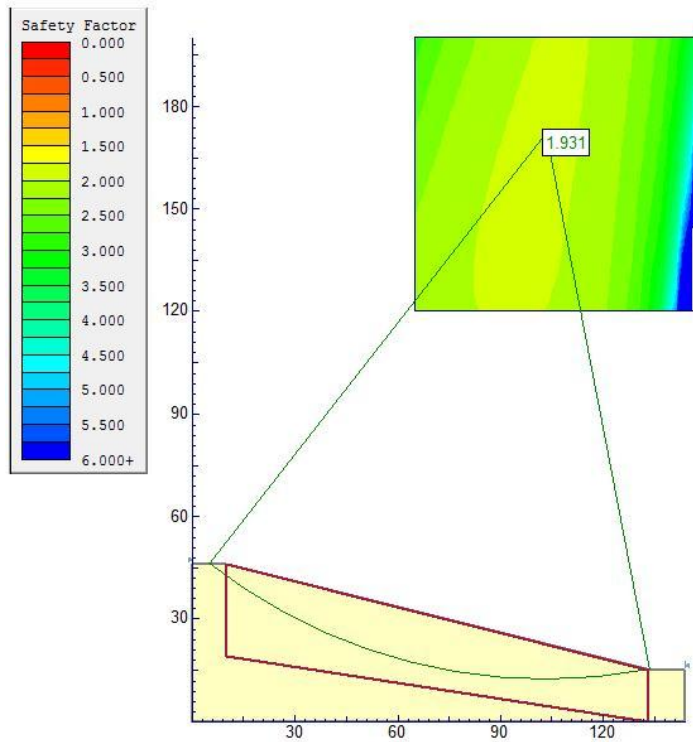


Fig.A.1.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.

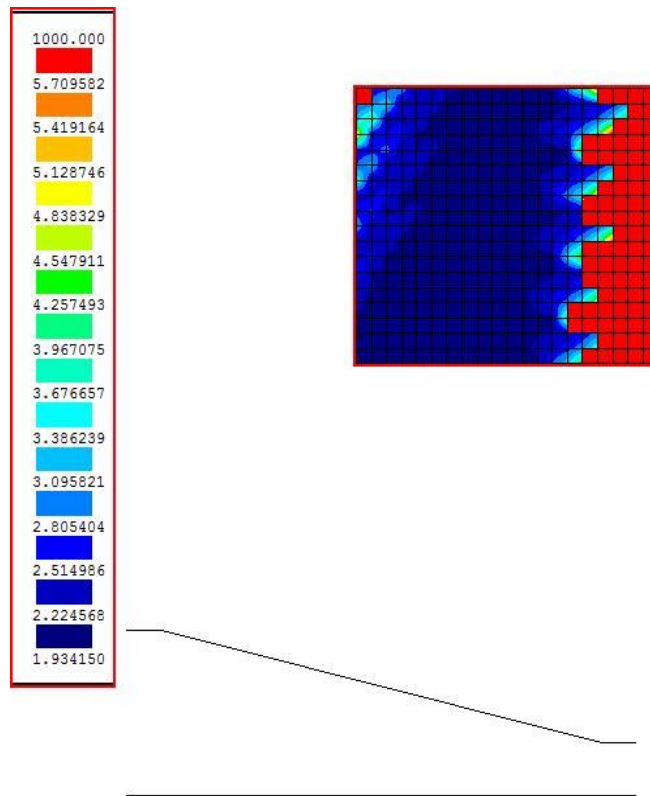


Fig.A.1.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado

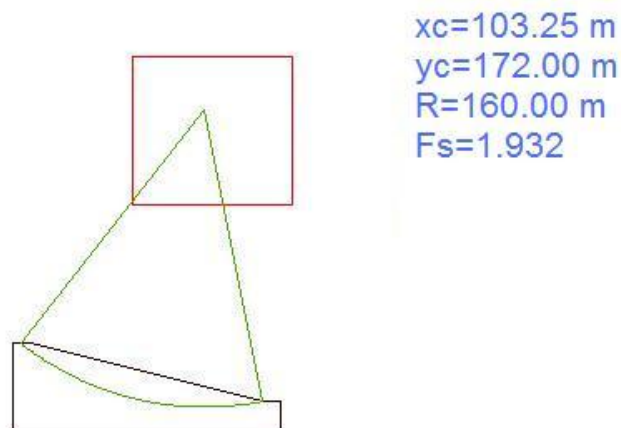


Fig.A.1.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)

Quadro A.1.1- Informação complementar das superfícies críticas determinadas

	(MP ¹ /MEF ² / Correia*)					(Fellenius)			(Bishop ou B. Simplificado ³)		
	xc(m)	yc(m)	R(m)	λ	f(x)	xc(m)	yc(m)	R(m)	xc(m)	yc(m)	R(m)
Slope/W ¹	103,25	172	160,4	0,273	sen(θ)	94,75	132	123,596	103,25	172	160,384
Slope/W+Sigma/W ²	99	156	145								
Slide ¹³	103,25	172	159,8			94	132	123,64	103,25	172	160,554
Taludes ³						94,75	132,75		103,25	172	160
TALUDE_MRC*	99	120	109,1								

Quadro A.1.2 – Códigos de identificação das superfícies potenciais

CODIGO IDENTIFICAÇÃO		
1	Válida	29
2	Não cumpre profund.mínima (1m)	5
3	Não intersecta o talude	54
4	Intersecta fronteiras do talude	128
	Nº total de superfícies	216
	Fatias	30
	Tempo de processamento	7min23s

Quadro A.1.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 1)

Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 1)						
Sup	Xc(m)	Yc(m)	R(m)	Fs	X _{max} (kN/m)	COD.
85	99	120	109,12	1,782	495,7	1
86	99	136	124,15	1,788	465,8	1
87	99	152	139,40	1,791	452,4	1
88	99	168	154,80	1,805	439,5	1
193	99	120	107,14	1,825	376,3	1
195	99	152	137,86	1,829	359,6	1
194	99	136	122,42	1,829	363,5	1
196	99	168	153,41	1,829	364,7	1
197	99	184	169,05	1,849	358,9	1
125	99	184	166,30	1,913	234,7	1
126	99	200	182,24	1,922	244,1	1
161	99	184	165,87	1,929	216,3	1
124	99	168	150,37	1,930	213,4	1
162	99	200	181,84	1,932	229,0	1

123	99	152	134,46	1,950	197,2	1
160	99	168	149,90	1,952	193,8	1
91	116	120	108,46	1,960	227,5	1
122	99	136	118,58	1,969	182,5	1
159	99	152	133,93	1,976	176,2	1
92	116	136	122,38	1,987	170,2	1
121	99	120	102,73	1,989	169,7	1
158	99	136	117,98	2,003	159,7	1
157	99	120	102,03	2,031	144,6	1
93	116	152	136,75	2,056	129,9	1
94	116	168	151,45	2,120	104,4	1
95	116	184	166,39	2,175	88,0	1
96	116	200	181,52	2,219	77,6	1
99	133	152	136,81	2,633	31,0	1
100	133	168	150,53	3,529	9,3	1
1	65	120	132,00	NaN	0	4
2	65	136	146,70	NaN	0	4
3	65	152	161,64	NaN	0	4
4	65	168	176,77	NaN	0	4
5	65	184	192,04	NaN	0	4
6	65	200	207,42	NaN	0	4
7	82	120	132,14	NaN	0	4
8	82	136	145,82	NaN	0	4
9	82	152	159,92	NaN	0	4
10	82	168	174,36	NaN	0	4
11	82	184	189,05	NaN	0	4
12	82	200	203,93	NaN	0	4
13	99	120	135,07	NaN	0	4
14	99	136	147,48	NaN	0	4
15	99	152	160,53	NaN	0	4
16	99	168	174,07	NaN	0	4
17	99	184	188,00	NaN	0	4
18	99	200	202,24	NaN	0	4
19	116	120	140,62	NaN	0	4
20	116	136	151,61	NaN	0	4
21	116	152	163,44	NaN	0	4
22	116	168	175,92	NaN	0	4
23	116	184	188,94	NaN	0	4
24	116	200	202,38	NaN	0	4
25	133	120	148,50	NaN	0	4
26	133	136	158,02	NaN	0	4
27	133	152	168,52	NaN	0	4
28	133	168	179,84	NaN	0	4

29	133	184	191,83	NaN	0	4
30	133	200	204,36	NaN	0	4
31	150	120	158,35	NaN	0	4
32	150	136	166,43	NaN	0	4
33	150	152	175,60	NaN	0	4
34	150	168	185,70	NaN	0	4
35	150	184	196,58	NaN	0	4
36	150	200	208,12	NaN	0	4
37	65	120	123,79	NaN	0	4
38	65	136	139,36	NaN	0	4
39	65	152	155,01	NaN	0	4
40	65	168	170,73	NaN	0	4
41	65	184	186,49	NaN	0	4
42	65	200	202,30	NaN	0	4
43	82	120	120,51	NaN	0	4
44	82	136	135,37	NaN	0	4
45	82	152	150,46	NaN	0	4
46	82	168	165,72	NaN	0	4
47	82	184	181,11	NaN	0	4
48	82	200	196,60	NaN	0	4
49	99	120	120,29	NaN	0	4
50	99	136	134,08	NaN	0	4
51	99	152	148,31	NaN	0	4
52	99	168	162,87	NaN	0	4
53	99	184	177,68	NaN	0	4
54	99	200	192,68	NaN	0	4
55	116	120	123,14	NaN	0	4
56	116	136	135,56	NaN	0	4
57	116	152	148,67	NaN	0	4
58	116	168	162,29	NaN	0	4
59	116	184	176,31	NaN	0	4
60	116	200	190,65	NaN	0	4
61	133	120	128,86	NaN	0	4
62	133	136	139,73	NaN	0	4
63	133	152	151,50	NaN	0	4
64	133	168	164,00	NaN	0	4
65	133	184	177,06	NaN	0	4
66	133	200	190,57	NaN	0	4
67	150	120	137,09	NaN	0	4
68	150	136	146,35	NaN	0	4
69	150	152	156,69	NaN	0	4
70	150	168	167,93	NaN	0	4
71	150	184	179,89	NaN	0	4

72	150	200	192,44	NaN	0	4
73	65	120	120,14	NaN	0	4
74	65	136	136,12	NaN	0	4
75	65	152	152,11	NaN	0	4
76	65	168	168,10	NaN	0	4
77	65	184	184,09	NaN	0	4
78	65	200	200,08	NaN	0	4
79	82	120	113,12	NaN	0	4
80	82	136	128,83	NaN	0	4
81	82	152	144,61	NaN	0	4
82	82	168	160,43	NaN	0	4
83	82	184	176,28	NaN	0	4
84	82	200	192,16	NaN	0	4
89	99	184	170,32	NaN	0	4
90	99	200	185,91	NaN	0	4
97	133	120	111,21	NaN	0	4
98	133	136	123,64	NaN	0	4
101	133	184	164,66	NaN	0	2
102	133	200	179,11	NaN	0	3
103	150	120	117,14	NaN	0	4
104	150	136	127,85	NaN	0	4
105	150	152	139,57	NaN	0	4
106	150	168	152,08	NaN	0	3
107	150	184	165,19	NaN	0	3
108	150	200	178,78	NaN	0	3
109	65	120	121,46	NaN	0	4
110	65	136	137,29	NaN	0	4
111	65	152	153,16	NaN	0	4
112	65	168	169,05	NaN	0	4
113	65	184	184,96	NaN	0	4
114	65	200	200,88	NaN	0	4
115	82	120	110,81	NaN	0	4
116	82	136	126,81	NaN	0	4
117	82	152	142,81	NaN	0	4
118	82	168	158,81	NaN	0	4
119	82	184	174,81	NaN	0	4
120	82	200	190,81	NaN	0	4
127	116	120	97,85	NaN	0	2
128	116	136	113,08	NaN	0	2
129	116	152	128,50	NaN	0	3
130	116	168	144,05	NaN	0	3
131	116	184	159,68	NaN	0	2
132	116	200	175,38	NaN	0	2

133	133	120	96,66	NaN	0	3
134	133	136	110,73	NaN	0	3
135	133	152	125,27	NaN	0	3
136	133	168	140,12	NaN	0	3
137	133	184	155,20	NaN	0	3
138	133	200	170,45	NaN	0	3
139	150	120	99,29	NaN	0	3
140	150	136	111,72	NaN	0	3
141	150	152	124,97	NaN	0	3
142	150	168	138,80	NaN	0	3
143	150	184	153,06	NaN	0	3
144	150	200	167,63	NaN	0	3
145	65	120	127,61	NaN	0	4
146	65	136	142,76	NaN	0	4
147	65	152	158,07	NaN	0	4
148	65	168	173,52	NaN	0	4
149	65	184	189,05	NaN	0	4
150	65	200	204,65	NaN	0	4
151	82	120	113,90	NaN	0	4
152	82	136	129,52	NaN	0	4
153	82	152	145,22	NaN	0	4
154	82	168	160,98	NaN	0	4
155	82	184	176,78	NaN	0	4
156	82	200	192,62	NaN	0	4
163	116	120	92,71	NaN	0	3
164	116	136	108,67	NaN	0	3
165	116	152	124,63	NaN	0	3
166	116	168	140,61	NaN	0	3
167	116	184	156,58	NaN	0	3
168	116	200	172,57	NaN	0	3
169	133	120	86,76	NaN	0	3
170	133	136	102,20	NaN	0	3
171	133	152	117,80	NaN	0	3
172	133	168	133,49	NaN	0	3
173	133	184	149,24	NaN	0	3
174	133	200	165,04	NaN	0	3
175	150	120	84,89	NaN	0	3
176	150	136	99,15	NaN	0	3
177	150	152	113,87	NaN	0	3
178	150	168	128,90	NaN	0	3
179	150	184	144,13	NaN	0	3
180	150	200	159,52	NaN	0	3
181	65	120	137,93	NaN	0	4

182	65	136	152,05	NaN	0	4
183	65	152	166,52	NaN	0	4
184	65	168	181,24	NaN	0	4
185	65	184	196,16	NaN	0	4
186	65	200	211,24	NaN	0	4
187	82	120	121,97	NaN	0	4
188	82	136	136,67	NaN	0	4
189	82	152	151,63	NaN	0	4
190	82	168	166,79	NaN	0	4
191	82	184	182,09	NaN	0	4
192	82	200	197,50	NaN	0	4
198	99	200	184,76	NaN	0	4
199	116	120	93,95	NaN	0	3
200	116	136	109,72	NaN	0	3
201	116	152	125,56	NaN	0	3
202	116	168	141,43	NaN	0	3
203	116	184	157,32	NaN	0	3
204	116	200	173,24	NaN	0	3
205	133	120	83,20	NaN	0	3
206	133	136	99,20	NaN	0	3
207	133	152	115,20	NaN	0	3
208	133	168	131,20	NaN	0	3
209	133	184	147,20	NaN	0	3
210	133	200	163,20	NaN	0	3
211	150	120	75,93	NaN	0	3
212	150	136	91,59	NaN	0	3
213	150	152	107,35	NaN	0	3
214	150	168	123,18	NaN	0	3
215	150	184	139,04	NaN	0	3
216	150	200	154,94	NaN	0	3

A2 -EXEMPLO 2

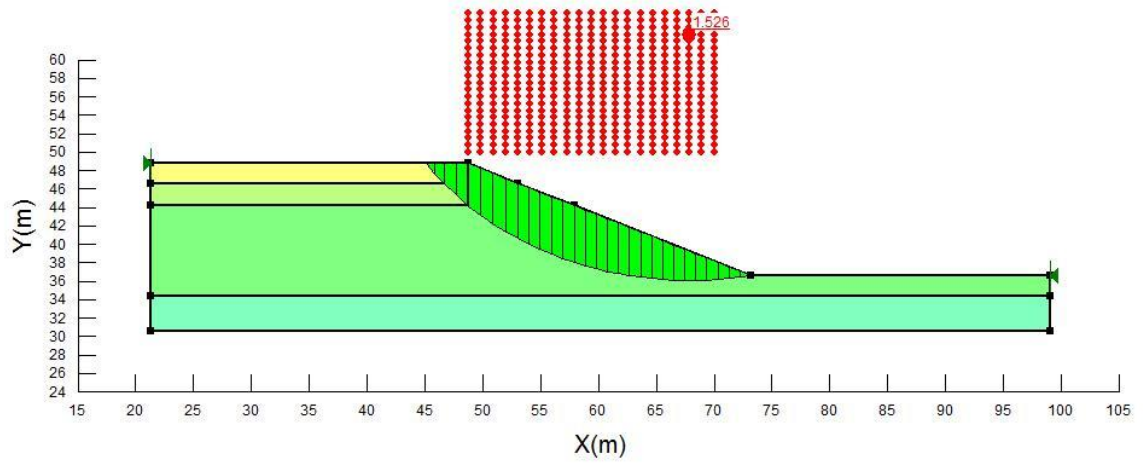


Fig.A.2.1- Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.

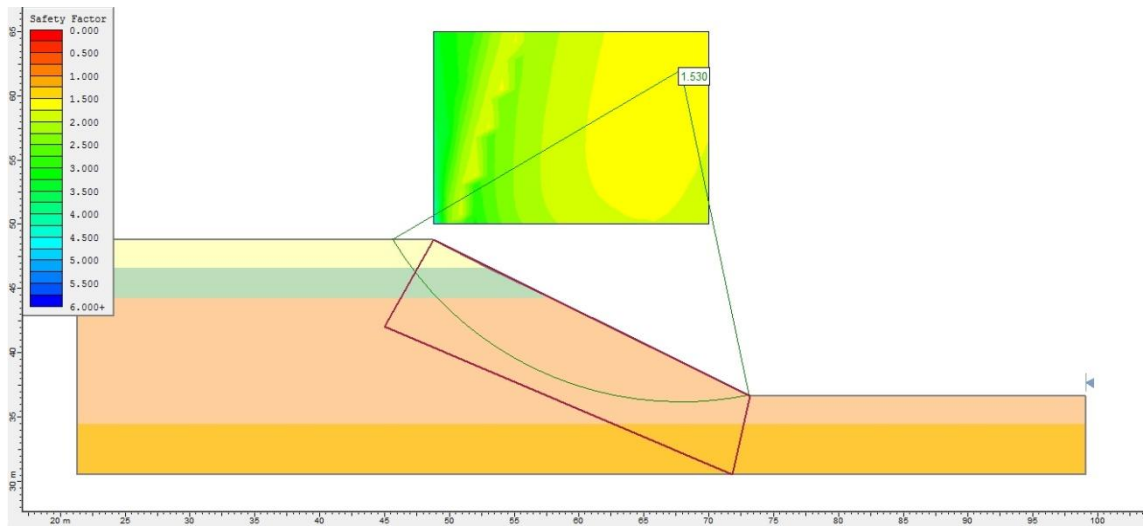


Fig.A.2.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.

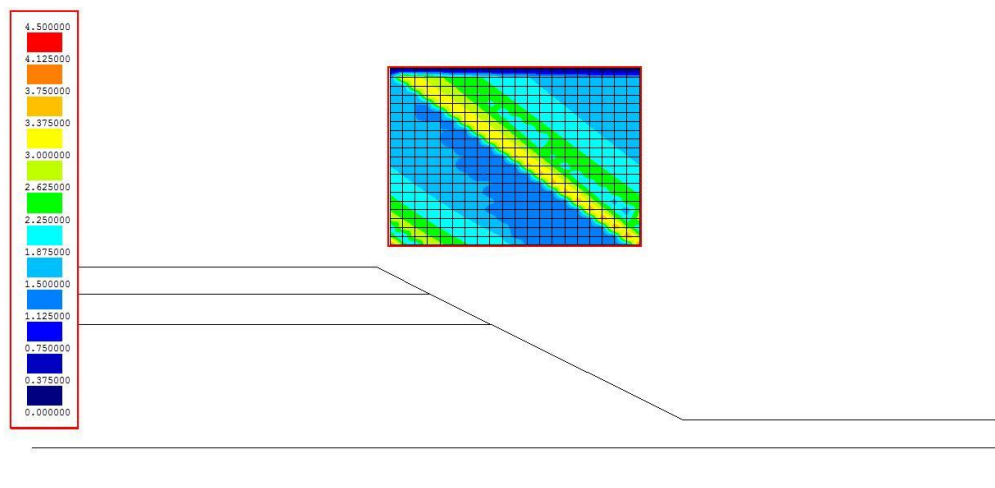


Fig.A.2.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado

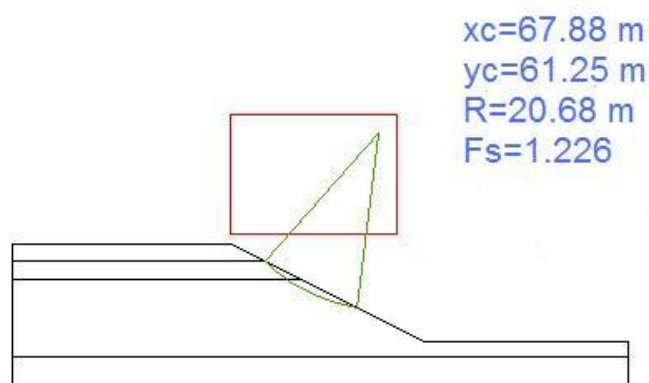


Fig.A.2.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)

Quadro A.2.1- Informação complementar das superfícies críticas determinadas

	(MP ¹ /MEF ² / Correia*)					(Fellenius)			(Bishop ou B. Simplificado ³)		
	xc(m)	yc(m)	R(m)	λ	f(x)	xc(m)	yc(m)	R(m)	xc(m)	yc(m)	R(m)
Slope/W ¹	67,88	62,75	26,679	0,445	sen(θ)	65,76	57,50	22,43	67,88	62,75	26,679
Slope/W+Sigma/W ²	66,82	62	26,275								
Slide ¹³	67,88	62	25,895			65,67	57,50	22,14	67,88	62	25,895
Taludes ³						67,88	61,25	20,68	67,88	61,25	20,68
TALUDE_MRC*	65,76	59,6	25,07								

Quadro A.2.2 – códigos de identificação das superfícies potenciais no TALUDE_MRC

CODIGO IDENTIFICAÇÃO		
1	Válida	136
2	Não cumpre profund.mínima (1m)	0
3	Não intersecta o talude	61
4	Intersecta fronteiras do talude	19
	Nº total de superfícies	216
	Fatias	30
	Tempo de processamento	1h25min4s

Quadro A.2.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 2)

Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 2)						
Sup	xc(m)	yc(m)	R(m)	Fs	Xmax(kN/m)	COD.
28	65,76	59,6	25,017	1,304	159,19	1
29	65,76	62,3	26,618	1,336	126,60	1
61	65,76	51,5	16,216	1,361	106,39	1
55	61,52	51,5	14,133	1,366	107,19	1
200	61,52	54,2	16,546	1,369	105,00	1
21	61,52	56,9	21,928	1,374	180,49	1
56	61,52	54,2	15,992	1,393	90,39	1
36	70	65	29,790	1,395	105,41	1
30	65,76	65	28,386	1,402	98,34	1
62	65,76	54,2	17,375	1,418	75,31	1
22	61,52	59,6	23,791	1,429	147,78	1
201	61,52	56,9	18,557	1,431	85,85	1
57	61,52	56,9	18,064	1,455	74,82	1
20	61,52	54,2	20,255	1,486	259,18	1
23	61,52	62,3	25,802	1,490	122,91	1
49	57,28	51,5	13,872	1,512	124,85	1
63	65,76	56,9	18,852	1,514	53,90	1
121	57,28	51,5	13,034	1,517	104,33	1
27	65,76	56,9	23,617	1,522	258,35	1
85	57,28	51,5	12,221	1,524	86,85	1
157	57,28	51,5	15,938	1,532	180,26	1
24	61,52	65	27,930	1,557	103,57	1
199	61,52	51,5	14,757	1,558	70,01	1
158	57,28	54,2	18,086	1,559	163,53	1
50	57,28	54,2	16,294	1,561	115,45	1

35	70	62,3	28,412	1,561	178,97	1
202	61,52	59,6	20,725	1,566	61,72	1
122	57,28	54,2	15,587	1,568	98,48	1
86	57,28	54,2	14,914	1,581	83,62	1
203	61,52	62,3	23,006	1,586	60,45	1
69	70	56,9	20,986	1,586	45,57	1
19	61,52	51,5	18,822	1,588	342,22	1
58	61,52	59,6	20,285	1,608	52,20	1
159	57,28	56,9	20,365	1,613	146,31	1
59	61,52	62,3	22,610	1,614	53,56	1
51	57,28	56,9	18,792	1,629	105,35	1
13	57,28	51,5	17,296	1,635	253,61	1
64	65,76	59,6	20,579	1,636	40,35	1
123	57,28	56,9	18,182	1,641	91,25	1
87	57,28	56,9	17,608	1,656	79,09	1
68	70	54,2	20,099	1,665	115,07	1
16	57,28	59,6	23,708	1,667	158,70	1
204	61,52	65	25,369	1,670	52,00	1
160	57,28	59,6	22,737	1,678	131,33	1
14	57,28	54,2	19,293	1,691	156,22	1
60	61,52	65	25,010	1,700	46,38	1
52	57,28	59,6	21,339	1,704	96,66	1
124	57,28	59,6	20,804	1,718	84,89	1
15	57,28	56,9	21,444	1,724	142,07	1
34	70	59,6	27,233	1,732	261,31	1
88	57,28	59,6	20,305	1,734	74,73	1
17	57,28	62,3	26,055	1,739	140,27	1
26	65,76	54,2	22,456	1,740	292,14	1
161	57,28	62,3	25,175	1,746	118,94	1
198	57,28	65	30,214	1,766	179,13	1
53	57,28	62,3	23,920	1,779	89,41	1
65	65,76	62,3	22,498	1,779	31,51	1
197	57,28	62,3	27,956	1,782	212,28	1
125	57,28	62,3	23,444	1,795	79,44	1
18	57,28	65	28,465	1,811	125,41	1
162	57,28	65	27,661	1,841	103,76	1
54	57,28	65	26,525	1,852	83,29	1
165	61,52	56,9	15,634	1,858	28,60	1
70	70	59,6	22,169	1,858	17,79	1
166	61,52	59,6	18,154	1,859	29,15	1
33	70	56,9	26,279	1,865	351,50	1
126	57,28	65	26,096	1,870	74,69	1
89	57,28	62,3	23,002	1,874	62,91	1

90	57,28	65	25,699	1,889	67,18	1
195	57,28	56,9	23,717	1,903	308,63	1
167	61,52	62,3	20,720	1,904	27,66	1
67	70	51,5	19,547	1,913	219,07	1
194	57,28	54,2	21,791	1,923	359,81	1
43	53,04	51,5	15,527	1,925	173,31	1
9	53,04	56,9	22,244	1,927	218,91	1
8	53,04	54,2	19,751	1,933	219,79	1
66	65,76	65	24,565	1,934	25,75	1
80	53,04	54,2	18,329	1,941	176,30	1
44	53,04	54,2	18,199	1,942	172,62	1
94	61,52	59,6	17,904	1,947	26,02	1
193	57,28	51,5	20,045	1,962	412,77	1
196	57,28	59,6	25,782	1,964	230,38	1
168	61,52	65	23,316	1,967	25,76	1
10	53,04	59,6	24,781	1,968	208,77	1
95	61,52	62,3	20,501	1,970	25,43	1
164	61,52	54,2	13,185	1,971	21,51	1
81	53,04	56,9	20,992	1,984	171,14	1
45	53,04	56,9	20,878	1,985	167,85	1
93	61,52	56,9	15,343	1,996	23,49	1
118	53,04	59,6	25,066	2,010	207,03	1
96	61,52	65	23,122	2,022	24,03	1
82	53,04	59,6	23,663	2,037	164,40	1
46	53,04	59,6	23,563	2,040	161,54	1
119	53,04	62,3	27,607	2,061	195,58	1
11	53,04	62,3	27,349	2,067	187,52	1
116	53,04	54,2	20,107	2,073	265,28	1
83	53,04	62,3	26,340	2,094	157,78	1
79	53,04	51,5	15,678	2,094	138,09	1
47	53,04	62,3	26,250	2,097	155,22	1
120	53,04	65	30,176	2,115	185,13	1
12	53,04	65	29,940	2,122	177,99	1
115	53,04	51,5	17,725	2,133	283,90	1
163	61,52	51,5	10,856	2,143	12,56	1
84	53,04	65	29,021	2,151	151,45	1
48	53,04	65	28,940	2,154	149,20	1
117	53,04	56,9	22,561	2,160	199,98	1
7	53,04	51,5	17,319	2,228	204,77	1
132	61,52	65	22,524	2,260	19,55	1
131	61,52	62,3	19,824	2,288	19,51	1
92	61,52	54,2	12,838	2,402	7,79	1
152	53,04	54,2	23,158	2,425	424,09	1

71	70	62,3	23,602	2,436	3,36	1
130	61,52	59,6	17,125	2,440	17,13	1
153	53,04	56,9	25,318	2,440	387,78	1
154	53,04	59,6	27,573	2,468	355,45	1
91	61,52	51,5	10,432	2,478	5,02	1
155	53,04	62,3	29,902	2,500942	327,282	1
156	53,04	65	32,289	2,535734	302,986	1
38	48,8	54,2	21,280	2,883218	313,248	1
2	48,8	54,2	21,538	2,906159	326,082	1
39	48,8	56,9	23,971	2,909971	307,026	1
1	48,8	51,5	18,886	2,928391	327,091	1
3	48,8	56,9	24,200	2,931188	318,117	1
40	48,8	59,6	26,664	2,952315	299,289	1
4	48,8	59,6	26,870	2,971577	308,881	1
75	48,8	56,9	25,043	2,990998	358,081	1
41	48,8	62,3	29,358	3,001276	291,183	1
73	48,8	51,5	19,955	3,003779	376,953	1
129	61,52	56,9	14,426	3,007148	8,256	1
5	48,8	62,3	29,545	3,019093	299,730	1
76	48,8	59,6	27,632	3,027526	344,290	1
77	48,8	62,3	30,240	3,071283	331,250	1
74	48,8	54,2	22,481	3,104228	338,790	1
37	48,8	51,5	18,591	3,107703	270,927	1
72	70	65	25,244	3,663254	-2,576	1
128	61,52	54,2	11,727	4,211582	-0,545	1
6	48,8	65	32,225	NaN	0	4
25	65,76	51,5	21,571	NaN	0	4
31	70	51,5	25,145	NaN	0	4
32	70	54,2	25,577	NaN	0	4
42	48,8	65	32,053	NaN	0	4
78	48,8	65	32,863	NaN	0	4
97	65,76	51,5	11,145	NaN	0	3
98	65,76	54,2	12,773	NaN	0	3
99	65,76	56,9	14,719	NaN	0	3
100	65,76	59,6	16,875	NaN	0	3
101	65,76	62,3	19,168	NaN	0	3
102	65,76	65	21,556	NaN	0	3
103	70	51,5	13,983	NaN	0	3
104	70	54,2	14,744	NaN	0	3
105	70	56,9	15,933	NaN	0	3
106	70	59,6	17,461	NaN	0	3
107	70	62,3	19,248	NaN	0	3
108	70	65	21,229	NaN	0	3

109	48,8	51,5	22,680	NaN	0	4
110	48,8	54,2	24,931	NaN	0	4
111	48,8	56,9	27,264	NaN	0	4
112	48,8	59,6	29,660	NaN	0	4
113	48,8	62,3	32,103	NaN	0	3
114	48,8	65	34,585	NaN	0	3
127	61,52	51,5	9,029	NaN	0	3
133	65,76	51,5	7,006	NaN	0	3
134	65,76	54,2	9,382	NaN	0	3
135	65,76	56,9	11,897	NaN	0	3
136	65,76	59,6	14,479	NaN	0	3
137	65,76	62,3	17,097	NaN	0	3
138	65,76	65	19,737	NaN	0	3
139	70	51,5	8,519	NaN	0	3
140	70	54,2	9,718	NaN	0	3
141	70	56,9	11,441	NaN	0	3
142	70	59,6	13,488	NaN	0	3
143	70	62,3	15,733	NaN	0	3
144	70	65	18,103	NaN	0	3
145	48,8	51,5	26,347	NaN	0	4
146	48,8	54,2	28,309	NaN	0	4
147	48,8	56,9	30,383	NaN	0	3
148	48,8	59,6	32,550	NaN	0	3
149	48,8	62,3	34,791	NaN	0	3
150	48,8	65	37,094	NaN	0	3
151	53,04	51,5	21,122	NaN	0	4
169	65,76	51,5	6,130	NaN	0	3
170	65,76	54,2	8,747	NaN	0	3
171	65,76	56,9	11,403	NaN	0	3
172	65,76	59,6	14,076	NaN	0	3
173	65,76	62,3	16,757	NaN	0	3
174	65,76	65	19,443	NaN	0	3
175	70	51,5	3,639	NaN	0	3
176	70	54,2	5,926	NaN	0	3
177	70	56,9	8,460	NaN	0	3
178	70	59,6	11,072	NaN	0	3
179	70	62,3	13,719	NaN	0	3
180	70	65	16,383	NaN	0	3
181	48,8	51,5	30,620	NaN	0	3
182	48,8	54,2	32,323	NaN	0	3
183	48,8	56,9	34,155	NaN	0	3
184	48,8	59,6	36,096	NaN	0	3
185	48,8	62,3	38,129	NaN	0	3

186	48,8	65	40,241	NaN	0	3
187	53,04	51,5	25,333	NaN	0	4
188	53,04	54,2	27,053	NaN	0	4
189	53,04	56,9	28,924	NaN	0	4
190	53,04	59,6	30,917	NaN	0	4
191	53,04	62,3	33,011	NaN	0	4
192	53,04	65	35,188	NaN	0	4
205	65,76	51,5	9,471	NaN	0	3
206	65,76	54,2	11,341	NaN	0	3
207	65,76	56,9	13,496	NaN	0	3
208	65,76	59,6	15,819	NaN	0	3
209	65,76	62,3	18,246	NaN	0	3
210	65,76	65	20,740	NaN	0	3
211	70	51,5	4,187	NaN	0	3
212	70	54,2	6,277	NaN	0	3
213	70	56,9	8,709	NaN	0	3
214	70	59,6	11,264	NaN	0	3
215	70	62,3	13,874	NaN	0	3
216	70	65	16,513	NaN	0	3

A3- EXEMPLO 3

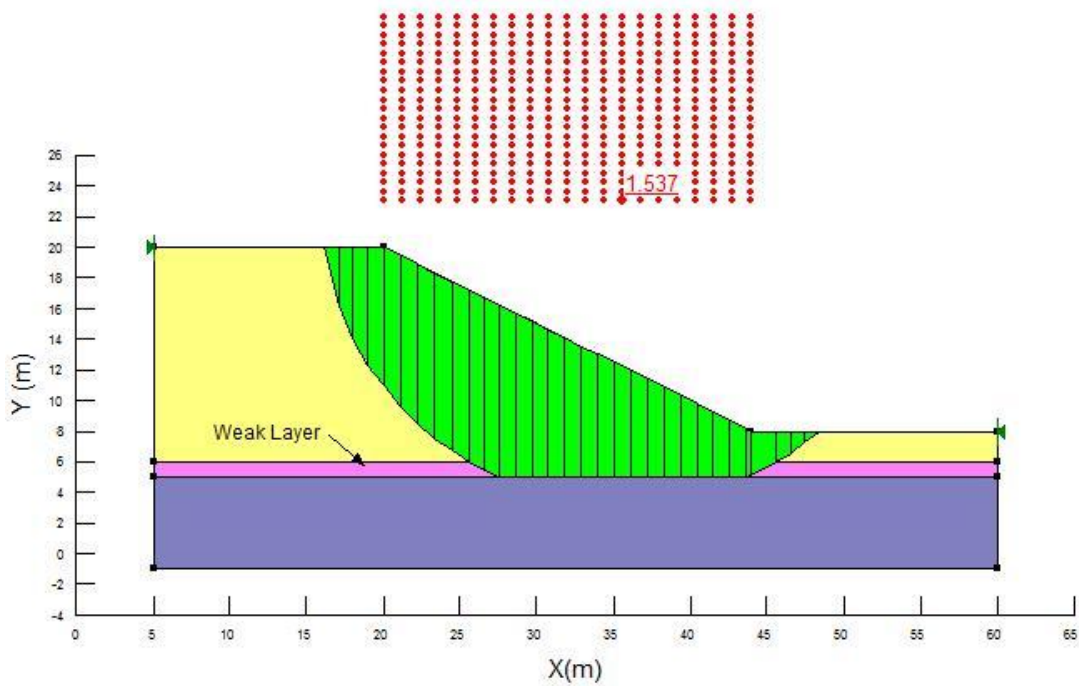


Fig.A.3.1- Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.

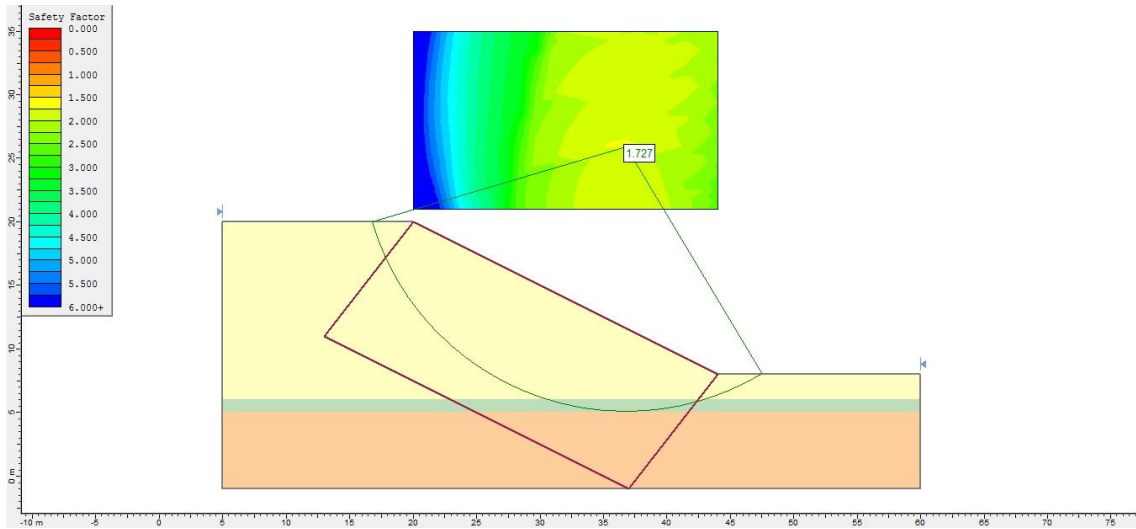


Fig.A.3.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price.

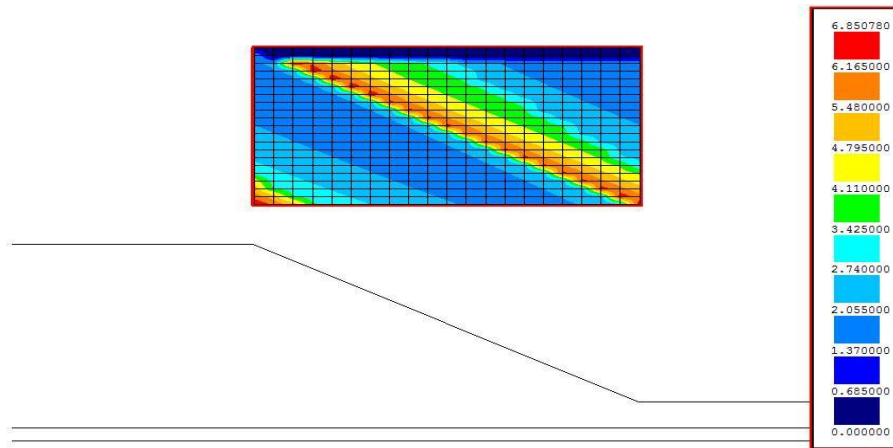


Fig.A.3.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado

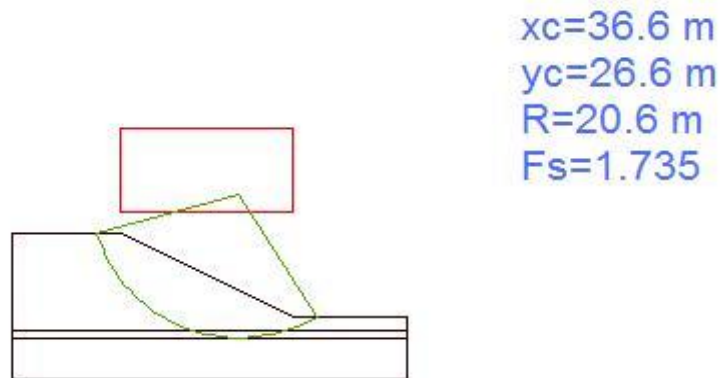


Fig.A.3.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)

Quadro A.3.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas

	(MP ¹ /MEF ² / Correia*)					(Fellenius)			(Bishop ou B. Simplificado ³)		
	xc(m)	yc(m)	R(m)	λ	f(x)	xc(m)	yc(m)	R(m)	xc(m)	yc(m)	R(m)
Slope/W ¹	35,6	23	19,722	0,182	sen(θ)	36,8	23	21,377	35,6	23	19,722
Slope/W+Sigma/W ²	35,6	24,2	21,913								
Slide ¹³	36,8	25,9	20,864			36,8	25,9	20,864	36,8	25,9	20,864
Taludes ³						36,6	25,6	20,60	36,6	25,6	20,60
TALUDE_MRC*	32	35	29,449								

Quadro A.3.2 - Códigos de identificação das superfícies potenciais

CODIGO IDENTIFICAÇÃO		
1	Válida	10
2	Não cumpre profund.mínima (1m)	0
3	Não intersecta o talude	5
4	Intersecta fronteiras do talude	12
	Nº total de superfícies	27
	Fatias	30
	Tempo de processamento	4min17s

Quadro A.3.3 - Resultados globais TALUDE_MRC (Exemplo 3)

Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 3)						
Sup	xc(m)	yc(m)	R(m)	Fs	Xmax(KN/m)	COD.
6	32	35	29,449	2,022	105,93	1
22	32	23	15,945	2,188	134,01	1
23	32	29	20,402	2,334	93,67	1
24	32	35	25,500	2,573	68,29	1
14	32	29	16,867	2,679	30,26	1
15	32	35	22,771	2,857	27,73	1
13	32	23	11,068	2,942	20,12	1
16	44	23	15,788	3,710	16,92	1
5	32	29	25,164	4,877	433,46	1
4	32	23	21,7	6,669	671,36	1
1	20	23	19,3	NaN	0	4
2	20	29	25,0	NaN	0	4
3	20	35	30,8	NaN	0	4
7	44	23	31,1	NaN	0	4
8	44	29	32,3	NaN	0	4
9	44	35	34,4	NaN	0	4

10	20	23	19,9	NaN	0	4
11	20	29	25,5	NaN	0	4
12	20	35	31,2	NaN	0	4
17	44	29	17,9	NaN	0	3
18	44	35	21,6	NaN	0	3
19	20	23	30,0	NaN	0	4
20	20	29	33,9	NaN	0	4
21	20	35	38,4	NaN	0	4
25	44	23	3,0	NaN	0	3
26	44	29	9,0	NaN	0	3
27	44	35	15,0	NaN	0	3

A4 - EXEMPLO 4

(Fase final de construção)

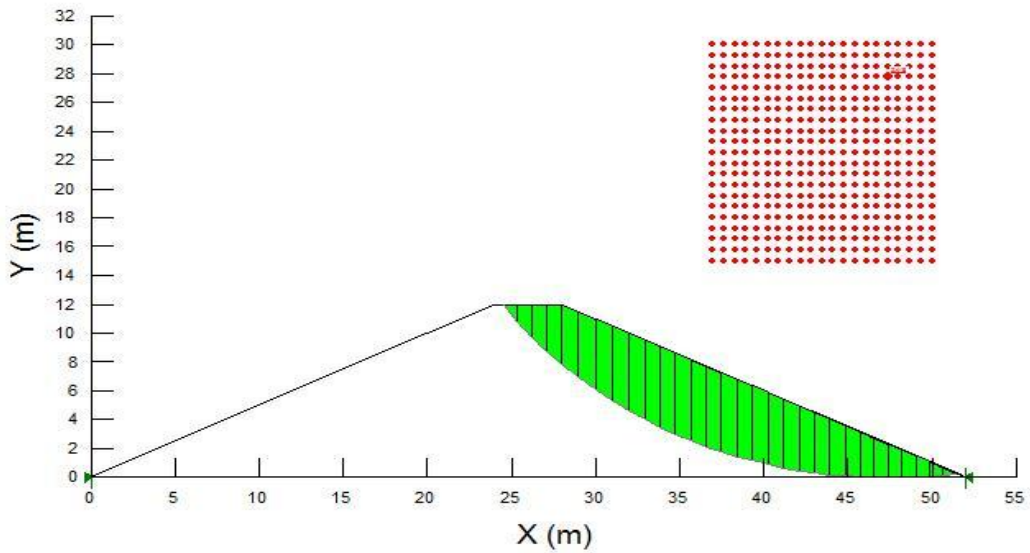


Fig.A.4.1 - Superfície crítica determinada em SLOPE/W através de Morgenstern-Price.

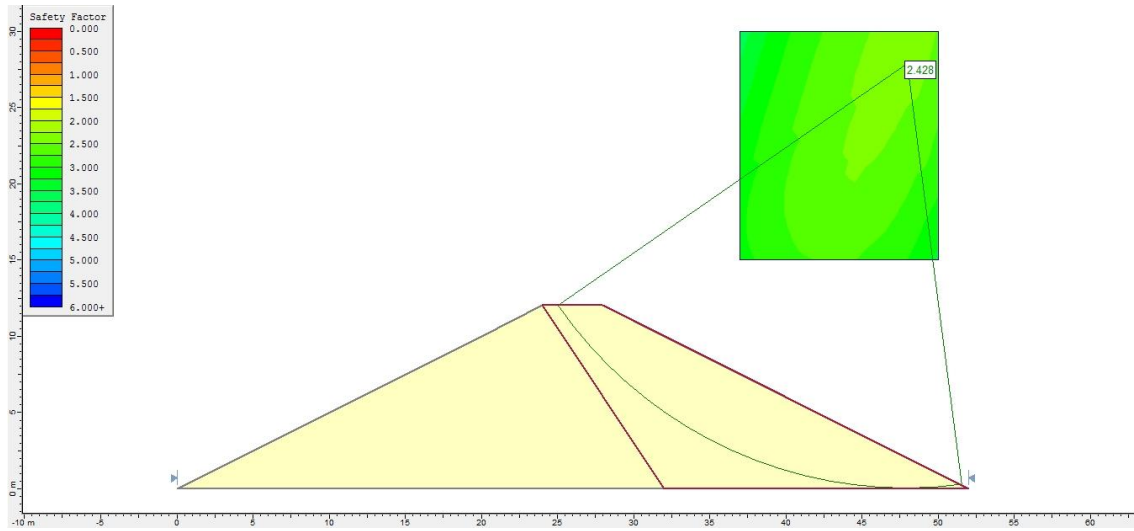


Fig.A.4.2 - Superfície crítica determinada em SLIDE através de Morgenstern-Price

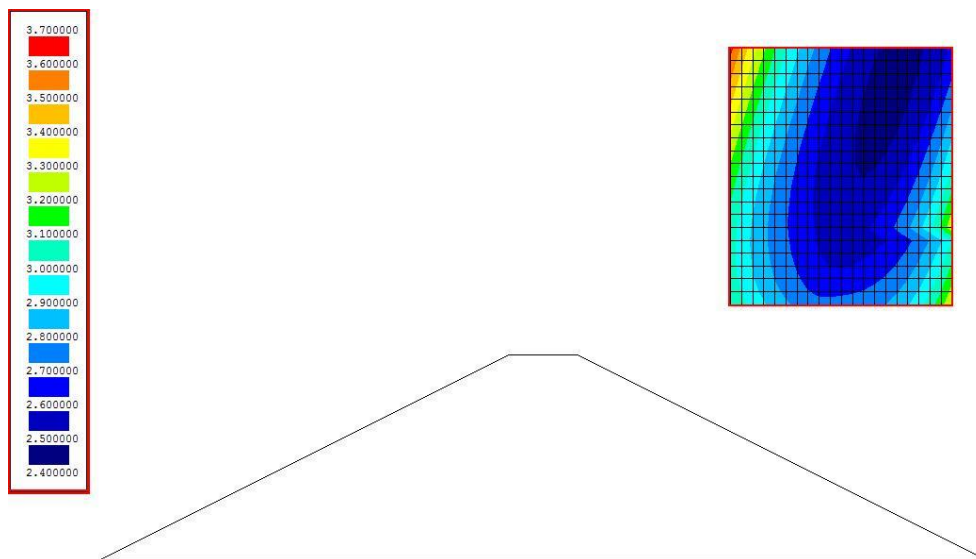


Fig.A.4.3 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de Bishop simplificado

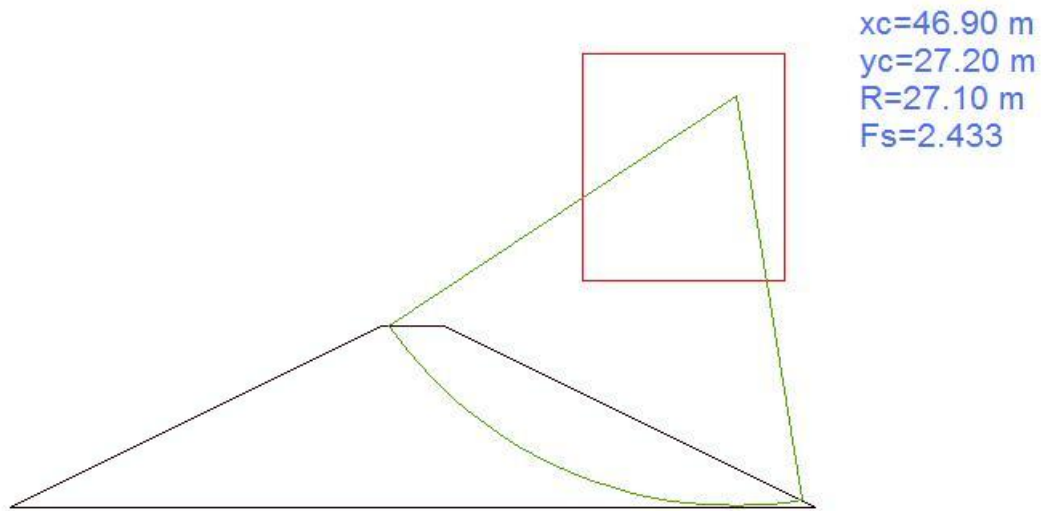


Fig.A.4.4 - Superfície crítica determinada em TALUDES através de BISHOP simplificado (adaptado em Autocad 2010)

Quadro A.4.1 - Informação complementar das superfícies críticas determinadas

	(MP ¹ /MEF ² / Correia*)					(Fellenius)			(Bishop ou B. Simplificado ³)		
	xc(m)	yc(m)	R(m)	λ	f(x)	xc(m)	yc(m)	R(m)	xc(m)	yc(m)	R(m)
Slope/W ¹	47,4	24,25	27,799	0,434	sen(θ)	46,1	24	24,441	48,05	29,25	29,434
Slope/W+Sigma/W ²	47,4	27,75	27,779								
Slide ¹³	47,95	27,86	27,857			45,21	22,14	22,143	47,95	27,86	27,857
Taludes ³						46,9	27,20	27,10	46,90	27,20	27,10
TALUDE_MRC*	42,2	18	17,940								

Quadro A.4.2 -Códigos de identificação das superfícies potenciais

CODIGO IDENTIFICAÇÃO		
1	Válida	99
2	Não cumpre profund.mínima (1m)	7
3	Não intersecta o talude	59
4	Intersecta fronteiras do talude	51
	Nº total de superfícies	216
	Fatias	30
	Tempo de processamento	1h13min16s

Quadro A.4.3 – Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 4)

Resultados Globais TALUDE_MRC (Exemplo 4)						
Sup	xc(m)	yc(m)	R(m)	Fs	Xmax(KN/m)	COD.
50	42,2	18	17,940	2,090	131,436	1
57	44,8	21	20,647	2,122	98,883	1
51	42,2	21	20,026	2,181	103,347	1
44	39,6	18	17,492	2,213	136,668	1
58	44,8	24	22,629	2,254	72,559	1
187	39,6	15	12,927	2,286	83,101	1
52	42,2	24	22,322	2,289	83,729	1
64	47,4	24	23,381	2,290	63,544	1
188	39,6	18	15,483	2,309	78,049	1
45	39,6	21	19,914	2,335	113,250	1
80	39,6	18	15,031	2,357	66,472	1
145	37	15	13,617	2,381	120,306	1
79	39,6	15	12,382	2,381	64,839	1
73	37	15	13,065	2,387	105,773	1
109	37	15	12,526	2,403	91,317	1
189	39,6	21	18,175	2,403	70,127	1
59	44,8	27	24,817	2,404	54,776	1
53	42,2	27	24,768	2,416	68,964	1
81	39,6	21	17,791	2,444	61,209	1
110	37	18	15,521	2,476	91,768	1
74	37	18	15,959	2,480	101,425	1
146	37	18	16,414	2,492	111,328	1
46	39,6	24	22,476	2,493	92,886	1
18	42,2	30	29,882	2,513	102,942	1
65	47,4	27	25,279	2,520	42,407	1
190	39,6	24	20,950	2,524	63,588	1
82	39,6	24	20,618	2,549	57,255	1
38	37	18	17,630	2,553	136,780	1
54	42,2	30	27,325	2,561	56,977	1
60	44,8	30	27,160	2,565	42,314	1
153	39,6	21	16,834	2,587	42,207	1
152	39,6	18	13,885	2,590	39,681	1
85	42,2	15	12,518	2,611	38,675	1
117	39,6	21	16,697	2,618	39,592	1
116	39,6	18	13,719	2,649	35,837	1
91	44,8	15	13,446	2,662	34,490	1
47	39,6	27	25,135	2,669	76,881	1

154	39,6	24	19,799	2,669	40,994	1
111	37	21	18,517	2,676	81,315	1
191	39,6	27	23,781	2,687	55,438	1
75	37	21	18,886	2,688	87,645	1
71	50	27	26,134	2,693	30,668	1
118	39,6	24	19,682	2,695	38,666	1
83	39,6	27	23,489	2,703	50,987	1
147	37	21	19,272	2,705	94,233	1
86	42,2	18	14,761	2,714	31,112	1
87	42,2	21	17,236	2,736	30,463	1
39	37	21	20,318	2,765	112,325	1
88	42,2	24	19,857	2,772	29,868	1
155	39,6	27	22,773	2,773	40,092	1
119	39,6	27	22,672	2,788	38,574	1
66	47,4	30	27,376	2,793	29,330	1
151	39,6	15	10,964	2,804	28,884	1
48	39,6	30	27,863	2,853	64,457	1
89	42,2	27	22,572	2,858	27,295	1
192	39,6	30	26,648	2,867	48,115	1
104	50	18	17,839	2,878	23,915	1
84	39,6	30	26,388	2,879	44,755	1
115	39,6	15	10,752	2,901	24,895	1
112	37	24	21,515	2,912	70,194	1
12	39,6	30	29,979	2,919	95,651	1
76	37	24	21,833	2,925	74,777	1
156	39,6	30	25,753	2,928	36,798	1
120	39,6	30	25,663	2,938	35,707	1
148	37	24	22,168	2,942	79,535	1
90	42,2	30	25,351	2,966	24,417	1
40	37	24	23,083	2,995	93,189	1
184	37	24	23,712	3,039	102,743	1
92	44,8	18	15,186	3,133	17,401	1
113	37	27	24,513	3,160	60,604	1
77	37	27	24,793	3,172	64,107	1
149	37	27	25,088	3,185	67,940	1
98	47,4	18	16,250	3,198	16,100	1
41	37	27	25,900	3,232	78,423	1
185	37	27	26,462	3,269	86,086	1
72	50	30	27,964	3,297	14,344	1
114	37	30	27,512	3,409	52,942	1
78	37	30	27,761	3,419	55,651	1
150	37	30	28,025	3,432	58,597	1
42	37	30	28,754	3,471	67,057	1

186	37	30	29,262	3,504	73,076	1
198	42,2	30	24,181	3,724	11,759	1
93	44,8	21	17,274	3,733	9,375	1
126	42,2	30	24,105	3,814	11,054	1
197	42,2	27	21,249	3,961	9,894	1
125	42,2	27	21,162	4,125	8,821	1
94	44,8	24	19,601	4,358	5,700	1
162	42,2	30	23,701	4,495	7,481	1
196	42,2	24	18,339	4,611	4,783	1
99	47,4	21	17,901	4,843	4,112	1
105	50	21	19,059	4,849	4,101	1
95	44,8	27	22,091	4,860	4,092	1
124	42,2	24	18,239	4,902	3,973	1
96	44,8	30	24,694	5,060	4,164	1
195	42,2	21	15,464	5,240	3,244	1
161	42,2	27	20,701	5,697	2,876	1
123	42,2	21	15,344	5,739	2,494	1
194	42,2	18	12,646	5,846	2,345	1
193	42,2	15	9,936	6,039	2,114	1
1	37	15	18,035	NaN	0	4
2	37	18	20,230	NaN	0	4
3	37	21	22,611	NaN	0	4
4	37	24	25,125	NaN	0	4
5	37	27	27,735	NaN	0	4
6	37	30	30,418	NaN	0	4
7	39,6	15	18,861	NaN	0	4
8	39,6	18	20,696	NaN	0	4
9	39,6	21	22,780	NaN	0	4
10	39,6	24	25,050	NaN	0	4
11	39,6	27	27,461	NaN	0	4
13	42,2	15	20,173	NaN	0	4
14	42,2	18	21,636	NaN	0	4
15	42,2	21	23,395	NaN	0	4
16	42,2	24	25,388	NaN	0	4
17	42,2	27	27,563	NaN	0	4
19	44,8	15	21,883	NaN	0	4
20	44,8	18	22,993	NaN	0	4
21	44,8	21	24,423	NaN	0	4
22	44,8	24	26,120	NaN	0	4
23	44,8	27	28,037	NaN	0	4
24	44,8	30	30,131	NaN	0	4
25	47,4	15	23,908	NaN	0	4
26	47,4	18	24,698	NaN	0	4

27	47,4	21	25,814	NaN	0	4
28	47,4	24	27,217	NaN	0	4
29	47,4	27	28,865	NaN	0	4
30	47,4	30	30,718	NaN	0	4
31	50	15	26,173	NaN	0	4
32	50	18	26,683	NaN	0	4
33	50	21	27,514	NaN	0	4
34	50	24	28,636	NaN	0	4
35	50	27	30,017	NaN	0	4
36	50	30	31,623	NaN	0	4
37	37	15	15,060	NaN	0	4
43	39,6	15	15,276	NaN	0	4
49	42,2	15	16,145	NaN	0	4
55	44,8	15	17,569	NaN	0	4
56	44,8	18	18,934	NaN	0	4
61	47,4	15	19,428	NaN	0	4
62	47,4	18	20,392	NaN	0	4
63	47,4	21	21,731	NaN	0	4
67	50	15	21,609	NaN	0	4
68	50	18	22,225	NaN	0	4
69	50	21	23,216	NaN	0	4
70	50	24	24,535	NaN	0	4
97	47,4	15	15,022	NaN	0	4
100	47,4	24	19,871	NaN	0	2
101	47,4	27	22,074	NaN	0	3
102	47,4	30	24,447	NaN	0	3
103	50	15	17,066	NaN	0	4
106	50	24	20,646	NaN	0	2
107	50	27	22,522	NaN	0	3
108	50	30	24,622	NaN	0	3
121	42,2	15	9,749	NaN	0	2
122	42,2	18	12,500	NaN	0	2
127	44,8	15	9,759	NaN	0	3
128	44,8	18	12,043	NaN	0	3
129	44,8	21	14,589	NaN	0	3
130	44,8	24	17,281	NaN	0	3
131	44,8	27	20,061	NaN	0	3
132	44,8	30	22,896	NaN	0	3
133	47,4	15	10,778	NaN	0	3
134	47,4	18	12,433	NaN	0	3
135	47,4	21	14,525	NaN	0	3
136	47,4	24	16,893	NaN	0	3
137	47,4	27	19,436	NaN	0	3

138	47,4	30	22,095	NaN	0	3
139	50	15	12,563	NaN	0	2
140	50	18	13,596	NaN	0	3
141	50	21	15,160	NaN	0	3
142	50	24	17,113	NaN	0	3
143	50	27	19,335	NaN	0	3
144	50	30	21,745	NaN	0	3
157	42,2	15	8,702	NaN	0	3
158	42,2	18	11,702	NaN	0	3
159	42,2	21	14,701	NaN	0	2
160	42,2	24	17,701	NaN	0	2
163	44,8	15	7,211	NaN	0	3
164	44,8	18	10,090	NaN	0	3
165	44,8	21	13,023	NaN	0	3
166	44,8	24	15,981	NaN	0	3
167	44,8	27	18,953	NaN	0	3
168	44,8	30	21,932	NaN	0	3
169	47,4	15	7,001	NaN	0	3
170	47,4	18	9,349	NaN	0	3
171	47,4	21	11,992	NaN	0	3
172	47,4	24	14,772	NaN	0	3
173	47,4	27	17,624	NaN	0	3
174	47,4	30	20,519	NaN	0	3
175	50	15	8,171	NaN	0	3
176	50	18	9,683	NaN	0	3
177	50	21	11,780	NaN	0	3
178	50	24	14,204	NaN	0	3
179	50	27	16,815	NaN	0	3
180	50	30	19,539	NaN	0	3
181	37	15	16,008	NaN	0	4
182	37	18	18,446	NaN	0	4
183	37	21	21,030	NaN	0	4
199	44,8	15	7,147	NaN	0	3
200	44,8	18	10,044	NaN	0	3
201	44,8	21	12,988	NaN	0	3
202	44,8	24	15,952	NaN	0	3
203	44,8	27	18,928	NaN	0	3
204	44,8	30	21,911	NaN	0	3
205	47,4	15	4,916	NaN	0	3
206	47,4	18	7,910	NaN	0	3
207	47,4	21	10,907	NaN	0	3
208	47,4	24	13,906	NaN	0	3
209	47,4	27	16,905	NaN	0	3

210	47,4	30	19,904	NaN	0	3
211	50	15	4,243	NaN	0	3
212	50	18	6,708	NaN	0	3
213	50	21	9,487	NaN	0	3
214	50	24	12,369	NaN	0	3
215	50	27	15,297	NaN	0	3
216	50	30	18,248	NaN	0	3

Quadro A.4.5 - Factores de segurança registados nos diversos programas e métodos (fase de serviço a montante)

Métodos	Slope/W+Seep/W	Slide*
Fellenius	2,606	2,658
Bishop	3,082	
Bishop Simplificado		3,067
Spencer		3,066
Janbu	2,837	2,846
Morgenstern-Price	3,078	3,066

Estes dados complementares de coeficientes de segurança confirmam o acréscimo de estabilidade no talude montante da barragem durante a fase de serviço da barragem aquando do NPA.

ANEXO B – GEOMETRIA DOS EXEMPLOS NUMÉRICOS

B1 -EXEMPLO 1

Quadro B.1.1-Pontos característicos da geometria do talude

Ponto	X(m)	Y(m)
1	0	46
2	10	46
3	134	15
4	144	15
5	144	0
6	0	0

Quadro B.1.2- Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais

Malha de centros		Malha de Raios	
xc(m)	yc(m)	xr(m)	yr(m)
65	120	10	46
65	200	10	19
150	120	133	0
150	200	133	15

Nos programas SLOPE/W, SLIDE e TALUDES adoptaram-se divisões da malha de 20 na direcção vertical e horizontal. Entretanto, o programa TALUDES foi adaptado para efectuar as mesmas divisões, embora na malha de raios sejam indicados apenas linhas horizontais que variam entre yRmin e yRmax, estabelecendo assim os incrementos sucessivos dos raios das circunferências.

A localização das malhas de busca permanece igual à indicada para SLOPE/W e SLIDE.

Quadro B.1.3- Caracterização das malhas de busca em TALUDES

Div. xc	Div. yc	yRmin(m)	yRmax(m)	Div. yR(m)
20	20	0	45	45

B2 -Exemplo 2

Quadro B.2.1 -Pontos característicos da geometria do talude

Ponto	X(m)	Y(m)
1	21,3	48,8
2	48,8	48,8
3	53	46,6
4	57,9	44,2
5	73,2	36,6
6	99,1	36,6
7	99,1	34,4
8	99,1	30,5
9	21,3	30,5
10	21,3	34,4
11	21,3	44,2
12	21,3	46,6

Quadro B.2.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais

Malha de centros		Malha de Raios	
xc(m)	yc(m)	xr(m)	yr(m)
48,8	65	48,8	48,8
48,8	50	45,0	42,0
70	65	71,8	30,5
70	50	73,2	36,6

Quadro B.2.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES

Div. xc	Div. yc	yRmin(m)	yRmax(m)	Div. yR(m)
20	20	30,5	48,8	20

B3 -Exemplo 3

Quadro B.3.1 -Pontos característicos da geometria do talude

Ponto	X(m)	Y(m)
1	5	20
2	20	20
3	44	8
4	60	8
5	60	6
6	60	5
7	60	-1
8	5	-1
9	5	6
10	5	5

Quadro B.3.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais

Malha de centros		Malha de Raios	
xc(m)	yc(m)	xr(m)	yr(m)
20	23	20,0	20,0
20	35	13,0	11,0
44	23	37,0	-1,0
44	35	44,0	8,0

Quadro B.3.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES

Div. xc	Div. yc	yRmin(m)	yRmax(m)	Div. yR(m)
20	20	-1	20	20

B4 - Exemplo 4

Quadro B.4.1 -Pontos característicos da geometria do talude

Ponto	X(m)	Y(m)
1	0	0
2	20	10
3	24	12
4	28	12
5	32	10
6	52	0
7	26	0

Quadro B.4.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais

Malha de centros		Malha de Raios	
xc(m)	yc(m)	xr(m)	yr(m)
37	15	28,0	12,0
37	30	24,0	12,0
50	15	52,0	0,0
50	30	32,0	0,0

Quadro B.4.3 - Caracterização das malhas de busca em TALUDES

Div. xc	Div. yc	yRmin(m)	yRmax(m)	Div. yR(m)
20	20	0	12	20

Como a exemplo 4 apresenta uma barragem de aterro com geometria simétrica, a localização das malhas de busca a montante serão simétricas aquelas que se verificam a jusante, tendo como eixo o próprio eixo de simetria da barragem.

B5 - Exemplo 5

Quadro B.5.1 -Pontos característicos da geometria do talude

Ponto	X(m)	Y(m)
1	2	0
2	2	20
3	20	20
4	20	17
5	20	16
6	20	14
7	20	13
8	20	11
9	44	11
15	44	0
14	20	0

Quadro B.5.2 - Vértices das malhas de busca de superfícies potenciais

Malha de centros		Malha de Raios	
xc(m)	yc(m)	xr(m)	yr(m)
20	20	14	20
20	30	14	3
35	20	20	3
35	30	20	20

B6 - Caso 1 de Correia

Quadro B.6.1 - Pontos característicos da geometria do talude e da superfície de rotura

Ponto	X(m)	Y(m)	Descrição
1	-2	-0,5	
2	2	2,5	
3	6	5	
4	10	7	
5	18	9	
6	0	1	Pontos da sup.rotura
7	2	0,5	Pontos da sup.rotura
8	4	0,5	Pontos da sup.rotura
9	6	1	Pontos da sup.rotura
10	8	2	Pontos da sup.rotura
11	10	3,5	Pontos da sup.rotura
12	12	5,5	Pontos da sup.rotura
13	14	8	Pontos da sup.rotura
14	-10	-0,5	
15	-10	-10	
16	25	9	
17	25	-10	

B7 - Caso 2 de Correia

Quadro B.7.1 - Pontos característicos da geometria do talude e da superfície de rotura

Ponto	X(m)	Y(m)	Descrição
1	0	12	
2	6	12	
3	19,2	6	
4	30	6	
5	0	6	
6	30	4	
7	0	8	
8	3,8	12	Pontos da sup.rotura
9	3,8	10	Pontos da sup.rotura
10	5	8,2	Pontos da sup.rotura
11	6	7,1	Pontos da sup.rotura
12	7,1	6	Pontos da sup.rotura
13	8,4	5,05	Pontos da sup.rotura
14	0	5,61	
15	30	3,61	
16	0	0	
17	30	0	
18	21,9	4,15	Pontos da sup.rotura
19	23,4	4,9	Pontos da sup.rotura
20	24,775	6	Pontos da sup.rotura

Quadro B.7.2 - Pontos característicos do nível freático

Pontos	Xw(m)	Yw(m)
21	0	8
22	19,2	6
23	30	6

ANEXO C – PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO EXEMPLO NUMÉRICO 4

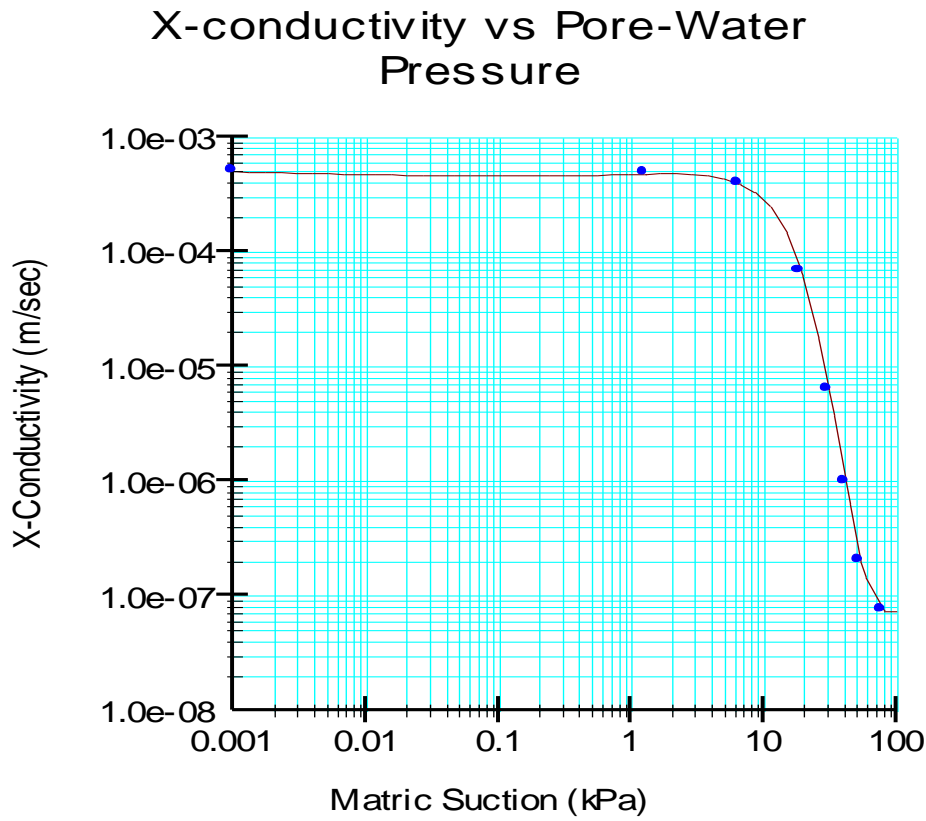


Fig.C.1.1 – Função de condutividade hidráulica do solo homogêneo da barragem

K ratio =1
K direction=0
Model = Saturated/Unsaturated
NPA=10 m

ANEXO D – CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE SUPORTE (SLOPE/W)

Neste anexo serão indicados os dados relativos à cortina de estacas e ancoragens existentes no quinto exemplo numérico, valores introduzidos e agora transpostos de SLOPE/W.

Ancoragens superiores

Reinforcement 1

Type Anchor
Outside Point (20, 17) m
Inside Point (12, 14.5) m
Total Length 8.3815273 m
Reinforcement Direction 17.354 °
Applied Load Option Constant
F of S Dependent No
Bond Length 3 m
Bond Diameter 0.31830989 m
Bond Safety Factor 1
Bond Skin Friction 1 kPa
Bond Resistance 1 kN/m
Anchor Spacing 1 m
Bar Capacity 250 kN
Bar Safety Factor 1
Bar Load 250 kN
Load Distribution Conc. in 1 slice
Shear Capacity 150 kN
Shear Safety Factor 1
Shear Option Parallel to Slip
Shear Load 150 kN
Applied Load 100 kN

Ancoragens inferiores

Reinforcement 2

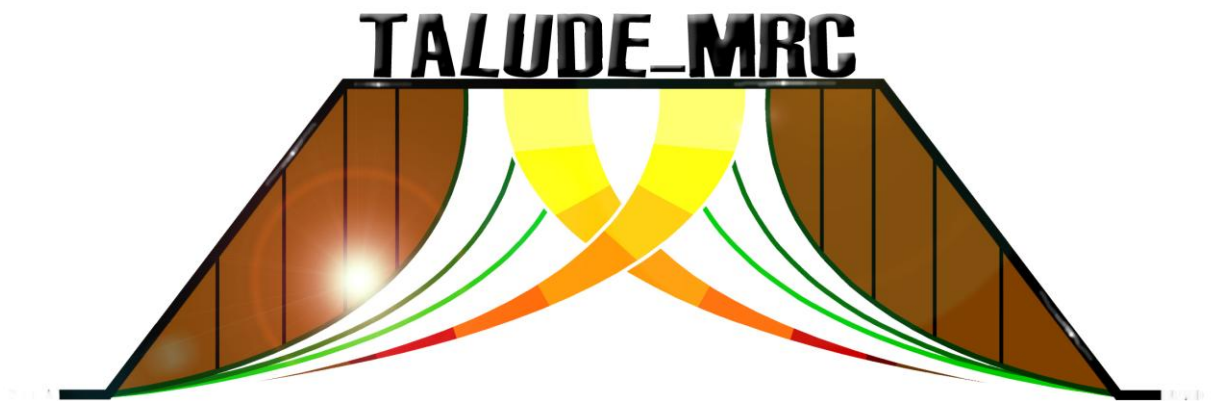
Type Anchor
Outside Point (20, 14) m
Inside Point (13, 12) m
Total Length 7.2801099 m
Reinforcement Direction 15.945 °
Applied Load Option Constant
F of S Dependent No
Bond Length 3 m
Bond Diameter 0.31830989 m
Bond Safety Factor 1
Bond Skin Friction 1 kPa
Bond Resistance 1 kN/m
Anchor Spacing 1 m
Bar Capacity 250 kN
Bar Safety Factor 1
Bar Load 250 kN
Load Distribution Conc. in 1 slice
Shear Capacity 150 kN
Shear Safety Factor 1
Shear Option Parallel to Slip
Shear Load 150 kN
Applied Load 100 kN

Cortina de estacas

Reinforcement 3

Type Pile
Outside Point (20, 20) m
Inside Point (20, 8) m
Total Length 12 m
Reinforcement Direction 90 °
Applied Load Option Variable
F of S Dependent No
Pile Spacing 1 m
Shear Capacity 270 kN
Shear Safety Factor 1
Shear Load Used 270 kN
Shear Option Parallel to Slip

ANEXO E – TUTORIAL TALUDE_MRC



ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELO MÉTODO DE CORREIA

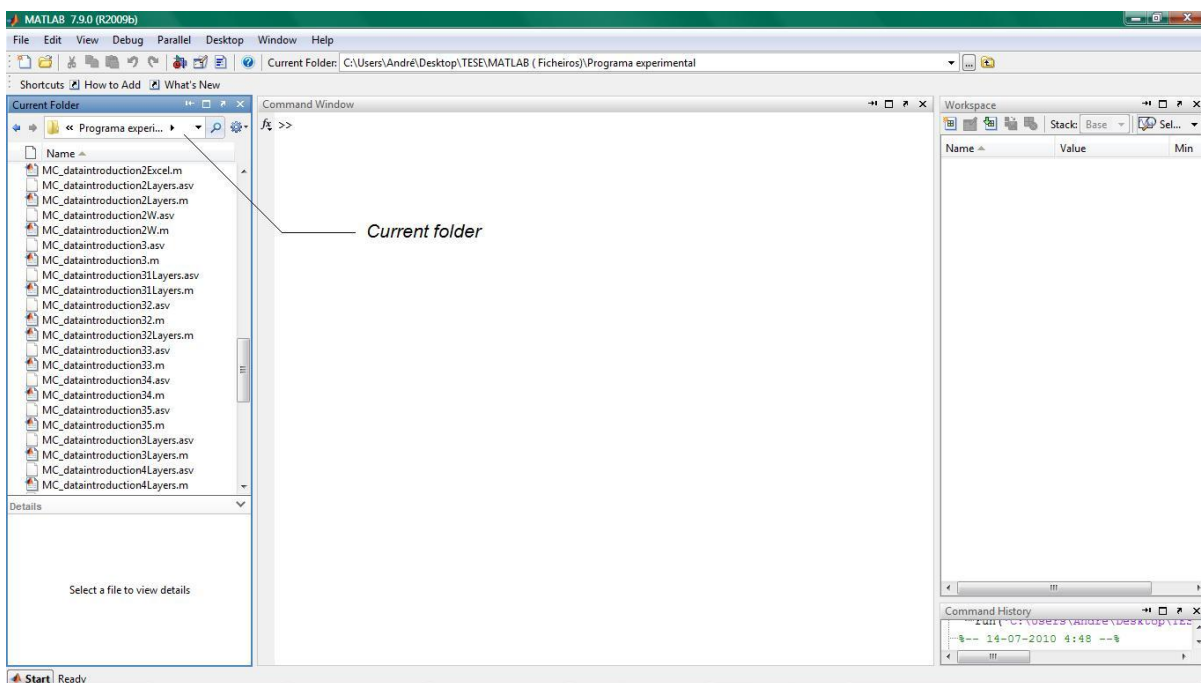
Como TALUDE_MRC se trata de um programa de uso livre possui, naturalmente, particularidades que devem ser explicadas ao utilizador para este se familiarizar rapidamente com o modo como este lida com problemas de estabilidade.

No tutorial consta um exemplo prático (EXEMPLO 1), a partir do qual o utilizador poderá acompanhar as diversas etapas, desde a introdução dos dados iniciais até à leitura dos resultados finais.

E.1 - IMPOSIÇÕES PRÉVIAS

Antes de iniciar o programa, existem aspectos logísticos essenciais sem os quais o programa não funciona.

Após iniciação do Matlab é obrigatório que seja especificada a localização do programa no PC no "Current folder"



Certifique-se que na pasta especificada se encontra o programa TALUDE_MRC juntamente com as funções auxiliares "areaprop.m", "circleAsPolygon.m" e "curveintersect.m".

Apesar de não ser obrigatório, convém que o ficheiro Excel de introdução de dados também se encontre nesta pasta para facilitar a sua localização por parte do Matlab.

E.2 – INTRODUÇÃO DOS DADOS INICIAIS NUM FICHEIRO DE DADOS EXCEL

A introdução dos dados iniciais será feita num ficheiro Excel devidamente formatado para o efeito e que possibilita a previsão da geometria que se está a inserir no programa



O ficheiro encontra-se dividido em várias secções entre as quais se podem nomear 7 de acordo com a numeração da figura anterior onde:

- 1- Introdução de dados genéricos como
 - "NLayers" - nº de estratos (máximo 4)
 - "Ainf"- a requisição de informação detalhada da superfície crítica (Sim=1 Não =0)
 - "RLorLR"- "Right Left or LeftRight" indica se o sentido do deslizamento se verifica da direita para a esquerda ou vice-versa (R to L=1, L to R= -1)
 - "N° of slices" - número de fatias da superfície
 - "Dmin" - profundidade mínima das fatias

- 2- Introdução das propriedades mecânicas dos vários estratos (peso volúmico, ângulo de atrito e coesão)

- 3- Introdução da geometria de cada estrato
 - Indicação das coordenadas (xx,yy) de cada ponto no sentido horário ou anti-horário de modo a formar um polígono "praticamente fechado".(Nº máximo de pontos possíveis =16 por estrato)
 - O polígono não será totalmente fechado de modo evitar a repetição de pontos, que pode fomentar a erros do programa, logo para contornar essa situação convém indicar um ponto de coordenadas muito próximas do ponto inicial do polígono

- 4- Definição da linha de superfície (ou superior) de cada estrato para facilitar a identificação de intersecções entre superfícies potenciais e os diferentes estratos

- 5- Definição do nível freático
 - Indicação da existência de nível freático (Sim=1, Não=0)
 - Indicação das coordenadas (xw,yw) dos pontos constituintes

- 6- Determinação da malha de busca de centros
 - Indicação dos 4 vértices da malha de busca

- Indicação do número de divisões (por limitações do programa esse número de divisões deve ser igual em ambas as direcções)

7- Determinação da malha de busca de raios

- Indicação dos 4 vértices da malha de busca
- Indicação do número de divisões (por limitações do programa esse número de divisões deve ser igual em ambas as direcções)

No ponto 6 e 7, independentemente da colocação dos vértices das malhas de busca, o programa internamente irá criar sempre quadriláteros com as divisões especificadas e nunca malhas de busca poligonais como pode aparentar no "Preview" do ficheiro EXCEL. Ou seja, o programa utiliza as coordenadas impostas e reconhece o valor máximo e mínimo das abcissas e ordenadas para formar um quadrilátero tanto para malhas de raios como de centros de circunferência.

Recomenda-se ao utilizador que a geração das malhas de busca tenha em consideração este facto e que este crie previamente malhas de busca com a forma de quadriláteros para evitar mal-entendidos futuros durante a leitura de resultados.

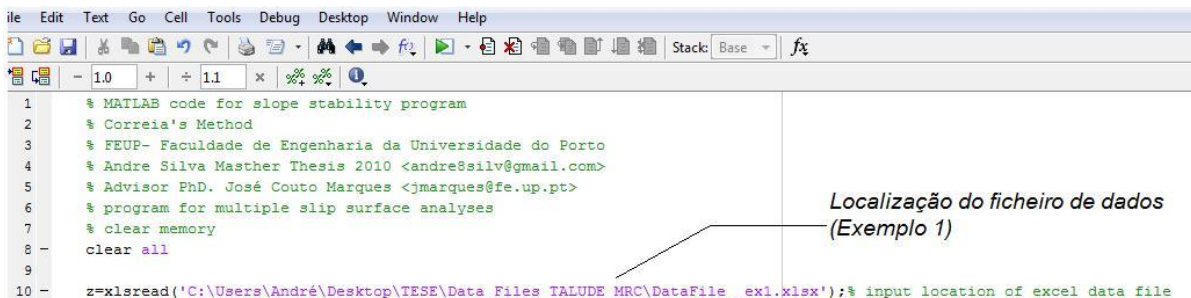
No lado direito do ficheiro de dados, encontra-se disponibilizado uma janela, devidamente legendada, onde se pode pré-visualizar os dados introduzidos. A janela trata-se de um simples gráfico em Excel, o qual pode ser manipulado pelo utilizador da maneira mais útil para análise em causa, sem qualquer interferência nos inputs.

No final deve-se salvar o ficheiro sob o nome que o utilizador determinar.

No caso de o utilizador pretender resultados acerca de uma superfície circular especifica basta definir o centro da circunferência na coluna de "Center Grid" com os 4 pontos iguais e um outro ponto na "Radius Grid" que proporcione o raio pretendido também com os 4 pontos iguais. O programa irá executar (por defeito) 8 superfícies exactamente iguais que correspondem a essa superfície circular especificada pelo utilizador.

No caso de o utilizador estiver a usar a versão do TALUDE_MRCsingle aplicam-se os mesmos princípios indicados para o TALUDE_MRCmultiple à excepção que neste terá de se especificar as coordenadas da superfície crítica a estudar, entretanto dados referentes às malhas de busca e profundidade mínima já não se aplicam.

E.3 – LEITURA DO FICHEIRO DE DADOS PELO MATLAB



```

1  % MATLAB code for slope stability program
2  % Correia's Method
3  % FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
4  % Andre Silva Master Thesis 2010 <andre@silv@gmail.com>
5  % Advisor PhD. José Couto Marques <jmarques@fe.up.pt>
6  % program for multiple slip surface analyses
7  % clear memory
8  clear all
9
10 z=xlsread('C:\Users\André\Desktop\TESE\Data_Files TALUDE_MRC\DataFile_ex1.xlsx');% input location of excel data file

```

Localização do ficheiro de dados (Exemplo 1)

Após iniciação de Matlab e especificação da localização do programa TALUDE_MRC no "current folder" deve-se clicar 2 vezes sobre o ficheiro de nome "TALUDE_MRCmultiple" para abrir o respectivo M-File.

Aberto o M-File, na linha 10 do algoritmo, a roxo, encontra-se o local onde se deve especificar a localização do ficheiro de dados.

Após a indicação da localização do ficheiro de dados deve-se salvar o M-File.

O mesmo se aplica na análise de superfícies específicas com o "TALUDE_MRCsingle"

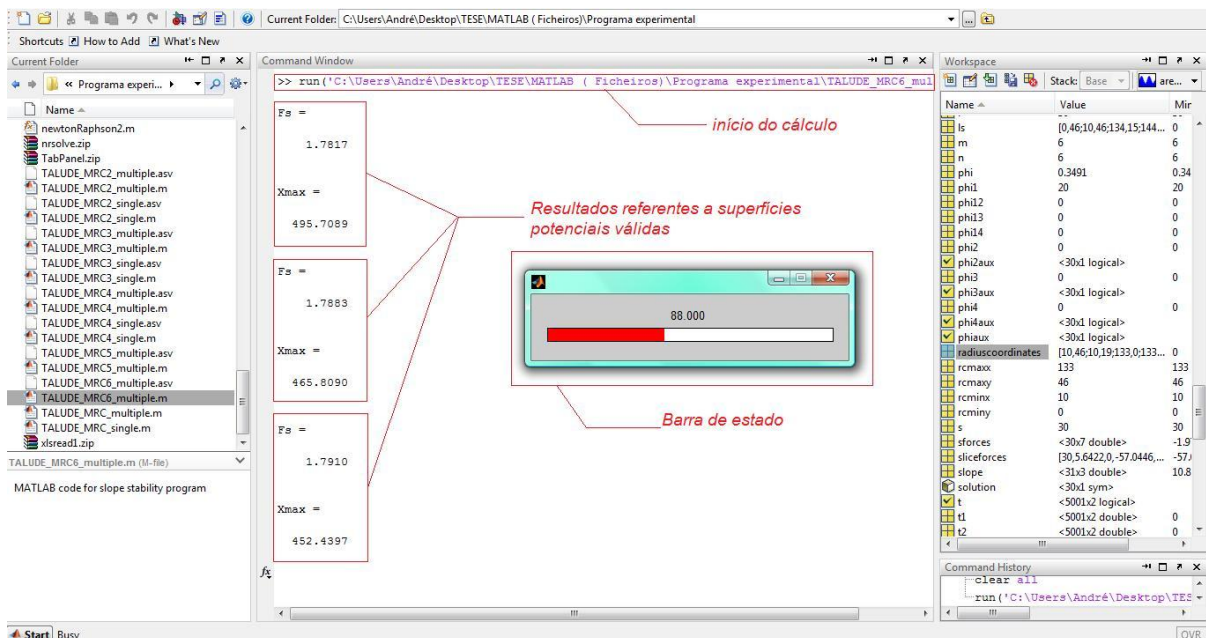
Nota: a cada alteração feita no ficheiro de dados este deve ser salvo para que essas alterações tenham efeito e sejam lidas pelo Matlab.

TALUDE_MRC funciona com o M-File e o ficheiro de dados abertos simultaneamente no seu desktop.

Em cada ficheiro de dados distinto deve-se especificar sempre a localização desse mesmo ficheiro no M-File da variante (single ou multiple) do TALUDE_MRC em uso.

E.4 – EXECUÇÃO DO TALUDE_MRC

Após da total definição das características geométricas e mecânicas do Exemplo 1 e guardados os respectivos ficheiros, basta arrastar o ficheiro "TALUDE_MRCmultiple" do "current folder" para o "command window" e processo de cálculo inicia-se.



Tal como é perceptível pela figura anterior, durante o processo de cálculo, na "command window" vão surgindo os resultados (F_s e $X_{máx}$) relativos a superfícies potenciais válidas. Em simultâneo, será visível uma barra de estado que dita a evolução do processo de cálculo associado o número da superfície que está a ser analisada.

Durante o cálculo, a barra de estado pode evoluir a duas velocidades distintas, isto é, passagem por zonas de superfícies inválidas produz uma evolução da barra muito rápida porque as superfícies estão a ser desprezadas, entretanto a passagem por zonas válidas é responsável por uma evolução mais lenta devido ao processo de cálculo que essas superfícies estão a ser sujeitas.

Se desejar interromper o cálculo, prima CTRL+C.

E.5 – TEMPO DE CÁLCULO

O tempo que um determinado exemplo pode demorar a ser processado na totalidade varia devido:

- N° de fatias das superfícies
- N° total de superfícies a analisar
- N° de estratos
- N° de superfícies potenciais válidas

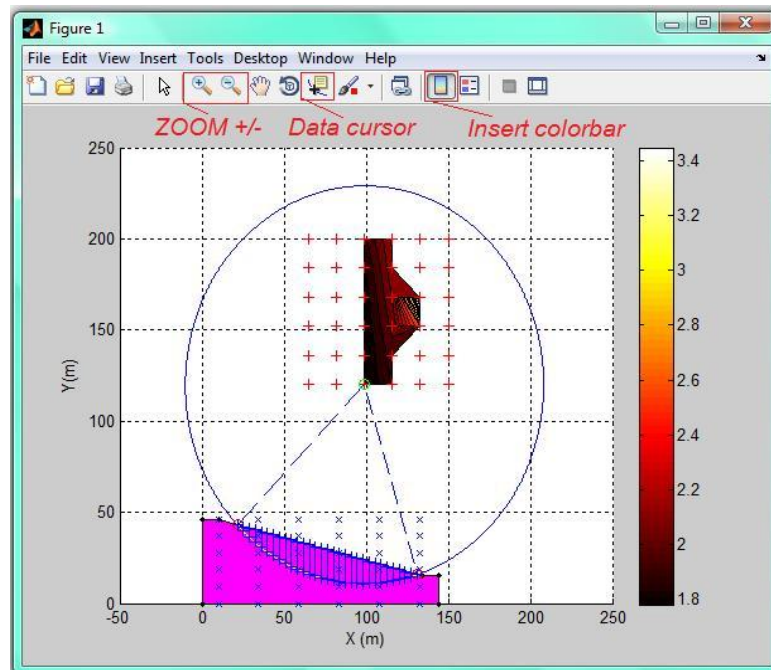
O Exemplo 1 tem um tempo de processamento aproximado de 7 minutos porque possui apenas 29 superfícies válidas entre um total de 216 e apenas um estrato.

Contudo, outros exemplos com n° de fatias considerável (acima das 30), estratificado, e um número de superfícies válidas considerável pode tornar o processo de cálculo prolongado portanto recomenda-se, vivamente, que os primeiros processos de cálculo sejam realizados com um n° de fatias mais reduzido (entre 10 a 15 fatias) e um n° total de superfícies mais baixo (divisões das malhas de busca de 2 por 2 ou 3 por 3).

A partir daí, depois de localizadas zonas mais relevantes em termos de coeficientes de segurança poder-se-ão concretizar processos de cálculo mais rigorosos e demorados.

E.6 – LEITURA DE RESULTADOS

Após o processo de cálculo, o TALUDE_MRC dispõe imediatamente uma figura com a geometria do talude, a superfície crítica dividida em fatias e malha de centros com a respectiva coloração.



Nessa janela é possível analisar os resultados com maior pormenor através:

- Ferramenta de "zoom" que possibilita ampliar zonas relevantes
- Opção "Data cursor" torna possível a leitura das coordenadas (x,y) dos diversos pontos introduzidos tal como diversos FS associados aos pontos da malha de busca
- Opção "Insert colorbar" insere uma barra de cores com escala automática, adaptada aos FS registados.

Para além deste resultado esquemático, o "workspace" do Matlab armazena todas as variáveis utilizadas no processo de cálculo e clicando duas vezes sobre qualquer variável, abre-se uma nova janela com a informação detalhada.

Name	Value	Mem
A	<30x1 double>	0.41
A2	0	0
A3	0	0
A4	0	0
AA1	<30x1 double>	-0.0

No mesmo "workspace" é possível guardar todos os resultados para posteriormente aceder a estes novamente (menus dentro do retângulo vermelho).

Seguidamente, é feita uma lista das variáveis mais relevantes e seus significados.

A, A2, A3, A4 – áreas dos 4 estratos existentes numa superfície potencial (m^2)

AInf – Requisição de informação extra relativa à superfície crítica ou especificada previamente (Sim=1, Não=0)

AI – comprimento dos segmentos de arco de uma fatia (m)

Aw – área ocupada pelo nível freático em cada fatia (m^2)

CH – compilação das diversas coesões verificadas ao longo da superfície potencial (kPa)

Dmin – profundidade mínima das superfícies potenciais (m)

FSMatrix – matriz compiladora dos FS mínimos de cada ponto e que possibilita a coloração da malha de busca

GLOBAL1 – matriz compiladora de todos os resultados processados pelo programa, isto é, cada linha fornece informação acerca: nº da superfície, xc, yc, raio, Fs, X_{máx} e código de identificação da superfície.

Códigos de identificação das superfícies:

- 1-Válida
- 2-Não cumpre profundidade mínima estipulada
- 3-Não intersecta o talude
- 4-Intersecta as fronteiras do talude

INT – intersecções detectadas entre a circunferência e os estratos do terreno

LRorRL- define o sentido do deslizamento (Left to right = -1, Right to left = 1)

NLayers – nº de estratos introduzidos

[Nkpa, Skpa]- reacção normal e tangencial na base das fatias (kPa)

NoS – nº de fatias

PHI- compilação dos diversos ângulos de atrito verificados ao longo da superfície potencial (radianos)

PL- coordenadas das características do nível freático (m)

PLcheck- verificação da existência ou não de nível freático (Sim=1, Não=0)

Sa – ângulo da base das fatias (graus)

Sa1- ângulo da base das fatias (radianos)

SoilCharacteristics – matriz compiladora das características mecânicas dos 4 estratos do terreno [Peso volúmico, ângulo de atrito, coesão]

SurfTOT – Nº total de superfícies

Sw – largura das fatias (m)

Xmax – força tangencial máxima (kN/m)

[X,E]- forças tangenciais e normais nas zonas de interacção entre fatias(kN/m)

XX,YY – ordenadas e abcissas da função de interacção de forças

W- peso próprio de cada fatia [kN]

centercoordinates – coordenadas dos centros de circunferência da malha de busca

check1,check2,check3 – condições de verificação do equilíbrio de forças, devem ser nulos ou então muito próximos de zero

coordinatesL1- coordenadas do 1ºestrato

coordinatesL2- coordenadas do 2ºestrato

coordinatesL3- coordenadas do 3ºestrato

coordinatesL4- coordenadas do 4ºestrato

deltaE- ΔE variação da força normal interfatias

deltaX- ΔX variação da força tangencial interfatias

radiuscoordinates- coordenadas malha de busca de raios

sforces- matriz compiladora das forças registadas em cada fatia [N° da fatia, $X_n, X_{n+1}, E_n, E_{n+1}, N_{kpa}, S_{kpa}$]

slope- matriz compiladora das coordenadas da envolvente da superfície de deslizamento [x_s, y_s, y_{ls}]

solution – soluções resultantes da resolução do sistema não linear, para consulta pormenorizada dos resultados recomenda-se inserir na linha de comandos Matlab : **double(solution)**

u – pressões hidrostáticas (kPa)

[xm,ym] – pontos médios da base das fatias (m)

[xleft, xright]- abcissas dos pontos extremos da superfície de deslizamento (m)

[xs,ys]- pontos característicos da base das fatias (m)

[xs,yls]- pontos característicos da superfície das fatias (m)

z- vector criado por Matlab que traduz os dados introduzidos no ficheiro de dados Excel

Nota: Matlab é "case-sensitive" (diferencia maiúsculas e minúsculas) portanto deve-se colocar o nome das variáveis na "command window" tal como este é dado pelo TALUDE_MRC.


```

coordinatesL3=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,9:10);
xx3=coordinatesL3(:,1);%L3 x coordinate
yy3=coordinatesL3(:,2);%L3 y coordinate
%*****L4
if any(isnan(z(11:26,13:14)));% determine how many input points
were inserted in Excel data file #4
Aux20=find(isnan(z(11:26,13:14)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,13:14);
else
Aux20=17;
end
coordinatesL4=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,13:14);
xx4=coordinatesL4(:,1);%L4 x coordinate
yy4=coordinatesL4(:,2);%L4 y coordinate
%define coordinates of a line surface [submatrix of coordinates]
%*****LS1
if any(isnan(z(11:26,3:4)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,3:4)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,3:4);
else
Aux20=17;
end
ls=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,3:4);% line surface coordinates
%*****LS2
if any(isnan(z(11:26,7:8)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,7:8)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,7:8);
else
Aux20=17;
end
ls2=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,7:8);% line surface#2 coordinates
%*****LS3
if any(isnan(z(11:26,11:12)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,11:12)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,11:12);
else
Aux20=17;
end
ls3=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,11:12);% line surface#3 coordinates
%*****LS4
if any(isnan(z(11:26,15:16)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,15:16)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,15:16);
else
Aux20=17;
end
ls4=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,15:16);% line surface#4 coordinates

end
%Phreatic Level Input*****PL
PLcheck=z(27,2);% verify existence of phreatic level
if any(isnan(z(30:44,1:2)));
Aux20=find(isnan(z(30:44,1:2)));
z(30:44-(15-Aux20(1))-1,1:2);
else
Aux20=16;
end
PL=z(30:44-(15-Aux20(1))-1,1:2);% phreatic level coordinates
%*****

```

```

Xbound=[xx;xx2;xx3;xx4];% X boundaries coordinates
Ybound=[yy;yy2;yy3;yy4];% Y boundaries coordinates
%Create a searching grid
centercoordinates=z(29:32,5:6) ;
xcmin=min(centercoordinates(:,1));
ycmin=min(centercoordinates(:,2));
xcmax=max(centercoordinates(:,1));
ycmax=max(centercoordinates(:,2));
%grid spacing in X and Y
gsx1=z(33,6);
gsy1=z(34,6);
x1=linspace(xcmin,xcmax,gsx1+1);
y1=linspace(ycmin,ycmax,gsy1+1);
%create grid for later associate FS critical values to each grid point
gridx=repmat(x1,gsx1+1,1);%
ylaux=y1';ylaux=sort(ylaux,'descend');gridy=repmat(ylaux,1,gsy1+1);
%create grid in plot
[x1,y1]=meshgrid(x1,y1);
x1=x1(:);y1=y1(:);

%Create radius grid
radiuscoordinates= z(29:32,7:8);
rcminx=min(radiuscoordinates(:,1));
rcminy=min(radiuscoordinates(:,2));
rcmaxx=max(radiuscoordinates(:,1));
rcmaxy=max(radiuscoordinates(:,2));
%grid spacing in X and Y
gsx2=z(33,8);
gsy2=z(34,8);
x2=linspace(rcminx,rcmaxx,gsx2+1);
y2=linspace(rcminy,rcmaxy,gsy2+1);
%create radius grid in plot
[x2,y2]=meshgrid(x2,y2);
x2=x2(:);y2=y2(:);
% number of potential slip surfaces
SurfTOT=(gsx1+1)*(gsy1+1)*(gsy2+1);
% *****INPUT LAYERS CHARACTERISTICS*****
if NLayers==1;
% Material properties
%zeros matrix
UW=z(5,2);% UW; unit weight
phil=z(6,2);% phi: friction angle
phi=phil*pi/180;
ch=z(7,2);% c: cohesion
UW2=0;phi2=0;phi12=0;ch2=0;A2=0;UW3=0;phi3=0; phi13=0;
ch3=0;A3=0;UW4=0;phi4=0; phi14=0;ch4=0;A4=0;
elseif NLayers==2;
UW=z(5,2);% UW; unit weight
phil=z(6,2);% phi: friction angle
phi=phil*pi/180;
ch=z(7,2);% c: cohesion
UW2=z(5,6);% UW; unit weight
phi12=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
phi2=phi12*pi/180;
ch2=z(7,6);% c: cohesion
UW3=0;phi3=0; phi13=0; ch3=0;A3=0;UW4=0;phi4=0; phi14=0;ch4=0;A4=0;
elseif NLayers==3;
UW=z(5,2);% UW; unit weight
phil=z(6,2);% phi: friction angle

```

```

phi=phil*pi/180;
ch=z(7,2);% c: cohesion
UW2=z(5,6);% UW; unit weight
phil2=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
phi2=phil2*pi/180;
ch2=z(7,6);% c: cohesion
UW3=z(5,10);% UW; unit weight
phil3=z(6,10);% phi: friction angle[degrees]
phi3=phil3*pi/180;
ch3=z(7,10);% c: cohesion
UW4=0;phi4=0;phil4=0;ch4=0;A4=0;
else NLayers==4;
UW=z(5,2);% UW; unit weight
phil=z(6,2);% phi: friction angle
phi=phil*pi/180;
ch=z(7,2);% c: cohesion
UW2=z(5,6);% UW; unit weight
phil2=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
phi2=phil2*pi/180;
ch2=z(7,6);% c: cohesion
UW3=z(5,10);% UW; unit weight
phil3=z(6,10);% phi: friction angle[degrees]
phi3=phil3*pi/180;
ch3=z(7,10);% c: cohesion
UW4=z(5,14);% UW; unit weight
phil4=z(6,14);% phi: friction angle[degrees]
phi4=phil4*pi/180;
ch4=z(7,14);% c: cohesion
end

SoilCharacteristics=[UW phil ch;UW2 phil2 ch2;UW3 phil3 ch3;UW4 phil4
ch4];%zeros matrix

NoS=z(1,6);%input n° of slices
NoS1=NoS+1;%input NoS slices impose NoS+1 divisions of the segments
Dmin=z(2,6);%input min slice depth
xy1G= repmat([x1 y1],gsx1+1,1);
xy2G= repmat([x2 y2],gsy2+1,1);xy2G=sortrows(xy2G);
R=[sqrt((xy1G(:,1)-xy2G(:,1)).^2+(xy1G(:,2)-xy2G(:,2)).^2)];%create radius
of searching circles
GLOBAL=zeros(SurfTOT,7);
wait=waitbar(0,'Please Wait...');%show waitbar with evolution of
calculation process
tic;% initial time
for SRFC=1:SurfTOT;
    waitbar(SRFC/SurfTOT,wait,sprintf('%.3f',SRFC));%waitbar progression
    P=circleAsPolygon([xy1G(SRFC,1) xy1G(SRFC,2)
R(SRFC,1)],5000);%transform circle to polygon
    Px=P(:,1);%P first column
    Py=P(:,2);%P second column

    if NLayers==1;
        [a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
        INT=[a b];% intersection points
    elseif NLayers==2;
        [a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates

```

```

[a2 b2]=curveintersect (xx2,yy2,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2];% intersection points
elseif NLayers==3;
    [a b]=curveintersect (xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
    [a2 b2]=curveintersect (xx2,yy2,Px,Py);
    [a3 b3]=curveintersect (xx3,yy3,Px,Py);
    INT=[a b;a2 b2;a3 b3];% intersection points
else NLayers==4;
    [a b]=curveintersect (xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
    [a2 b2]=curveintersect (xx2,yy2,Px,Py);
    [a3 b3]=curveintersect (xx3,yy3,Px,Py);
    [a4 b4]=curveintersect (xx4,yy4,Px,Py);
    INT=[a b;a2 b2;a3 b3;a4 b4];% intersection points
end

% elimination of non intersections with soil
if isempty([a b])
    GLOBAL(SRFC,:)= [SRFC xy1G(SRFC,1) xy1G(SRFC,2) R(SRFC) NaN 0 3];
    continue
end
% elimination of intersections with soil boundaries
if any(INT(:,1)==min(Xbound)) || any(INT(:,1)==max(Xbound)) ||
any(INT(:,2)==min(Ybound));
    GLOBAL(SRFC,:)= [SRFC xy1G(SRFC,1) xy1G(SRFC,2) R(SRFC) NaN 0 4];
    continue
end
%correct selection of intersection points
%arc of circumference that matters
t=[P(:,1)>=min(a) & P(:,1)<=max(INT(:,1)) & P(:,1)>=
min(Xbound) , P(:,2)<=max(INT(:,2)) & P(:,2)>= min(Ybound) ];
t1=[t(:,1).*t(:,2),t(:,1).*t(:,2)];% arc of potential slip surface
t2=t1.*P;
[~,~,v]=find(t2(:,1));
[~,~,v1]=find(t2(:,2));
K=INT;% array[a b] with intersection points
if size(K,1)==2&& min(INT(:,2))==min(Ybound);%control
condition_Attention to homogeneous slopes due only the same 2 intersections
possibility
    K1=sortrows(K);
    t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(2,1) K1(2,2);max(xx) min(yy)];%potential
slip surface coordinates[x y]
else
    K1=sortrows(K);%put in ascending order x coordinates
    t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(end,1) K1(end,2)];%potential slip surface
coordinates[x y]
end
xleft=min(t3(:,1));xright=max(t3(:,1));% left border and right border

%adding points of transition from a layer to another
%inclusion of surface points
Aux40=find((Xbound)>xleft & (Xbound)<xright);
LSxpoints=Xbound(Aux40);LSxpoints=unique(LSxpoints);
LSypoints=interp1(ls(:,1),ls(:,2),LSxpoints);
LSpoints=[LSxpoints LSpoints];
%inclusion of intersection with phreatic level
if PLcheck==1;

```

```

[aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),t3(:,1),t3(:,2));
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-length(LSxpoints)-
length(aw)+2)'];%slice division coordinate X , n°of slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints;aw];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
else
%inclusion of intersection points
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-
length(LSxpoints)+2)'];%slice division coordinate X , n°of
slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
end

if isnan(ys(fix(length(ys)/2):end-1));% condition to prevent NaN
situations, maybe isn't working because program reject composed surfaces
AUX1=[find(isnan(ys))];AUX1=AUX1(2:end-1);
AUX2=min(yy);AUX2= repmat(AUX2,length(ys),1);
Ps=[K1(1,1) K1(1,2);xs(2:min(AUX1)-1) ys(2:min(AUX1)-
1);xs(min(AUX1):max(AUX1)) AUX2(min(AUX1):max(AUX1));K1(end,1) K1(end,2)];
ys=Ps(:,2);
else
Ps=[K1(1,1) K1(1,2);xs(2:end-1) ys(2:end-1);K1(end,1) K1(end,2)
];%slice borders coordinate points
ys=Ps(:,2);
end

% particular situation with NaN in second and end-1 in ys vector
if isnan(ys(2,1))||isnan(ys(end-1,1));
ys(2,1)=(ys(1)+ys(3))/2;
ys(end-1,1)=(ys(end)+ys(end-2))/2;
end
yls=interp1(ls(:,1),ls(:,2),xs);%interpolation of surface points

if max(yls-ys)<Dmin;
GLOBAL(SRFC,:)=[SRFC xy1G(SRFC,1) xy1G(SRFC,2) R(SRFC) NaN 0 2];
continue
end
% Geometric slice parameter ( vertex coordinates, slice width, base
% inclination, mean points of slice base.etc.etc.etc
Sw=[];for i=1:(NoS1-1);Sw=[Sw,xs(i+1)-xs(i)];end;Sw=Sw';%slice width
=deltaX
dy=[];for i=1:(NoS1-1);dy=[dy,ys(i+1)-ys(i)];end;dy=dy';%deltaY
Sa=atan(dy./Sw)*180/pi;%slice angle degrees
Sal=atan(dy./Sw);%slice angle radians
slope=[xs yls ys];% slope coordinates compiled
Al=[sqrt(Sw.^2+dy.^2)];%segments of arc length
% mean point slice base coordinates
xm=[];
for s=1:length(xs)-1;
xm=[xm,(xs(s)+xs(s+1))/2];
end
xm=xm';
ysm=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xm)];

```

```

    %slices coordinates - compile slices vertex coordinates on the same
vector
    A=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
        t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
        t6=t5.*t3;
        [~,~,v2]=find(t6(:,1));
        [~,~,v3]=find(t6(:,2));
        t7=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yls(s+2);xs(s+1)
yls(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        %area determination
        [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(t7',[],[],-1);
        A(s+1,1)=Area;%accumulate slice area on vector A
    end

if NLayers>1
    %2nd Layer
        y12=interp1(ls2(:,1),ls2(:,2),xs);% if 2nd layer exists
        A2=zeros(NoS1-1,1);
        for s=0:(NoS1-2);
            %find coordinates of the arc base of each slice
            t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
            t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
            t6=t5.*t3;
            [~,~,v2]=find(t6(:,1));
            [~,~,v3]=find(t6(:,2));
            sl2=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) y12(s+2);xs(s+1)
yl2(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
            if any([ys(s+2);ys(s+1)]<y12(s+1));
                [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl2',[],[],-1);
                A2(s+1,1)=Area;
            else
                A2(s+1,1)=0;
            end
        end
    end
if NLayers>2;
    %3rd Layer
        y13=interp1(ls3(:,1),ls3(:,2),xs);% if 3rd layer exists
        A3=zeros(NoS1-1,1);
        for s=0:(NoS1-2);
            %find coordinates of the arc base of each slice
            t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
            t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
            t6=t5.*t3;
            [~,~,v2]=find(t6(:,1));
            [~,~,v3]=find(t6(:,2));
            sl3=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) y13(s+2);xs(s+1)
yl3(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
            if any([ys(s+2);ys(s+1)]<y13(s+1));
                [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl3',[],[],-1);
                A3(s+1,1)=Area;
            else
                A3(s+1,1)=0;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
if NLayers>3;
    %4th Layer
    y14=interp1(ls4(:,1),ls4(:,2),xs);% if 4th layer exists
    A4=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
        t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
        t6=t5.*t3;
        [~,~,v2]=find(t6(:,1));
        [~,~,v3]=find(t6(:,2));
        sl4=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) y14(s+2);xs(s+1)
y14(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any([ys(s+2);ys(s+1)]<y14(s+1));
            [Area,~,~,~,~]=areaprop(sl4',[],[],-1);
            A4(s+1,1)=Area;
        else
            A4(s+1,1)=0;
        end
    end
end

%*****PHREATIC LEVEL INCLUSION*****
%auxiliary function to obtain intersection coordinates with phreatic
level
if PLcheck==0;
    Aw=zeros(length(xs)-1,1);% empty matrix = no P.L.
else
    [aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),Px,Py);
    ylw=interp1(PL(:,1),PL(:,2),xs);% if P.L exists
    Aw=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
        t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
        t6=t5.*t3;
        [~,~,v2]=find(t6(:,1));
        [~,~,v3]=find(t6(:,2));
        slw=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) ylw(s+2);xs(s+1)
ylw(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any(ys(s+1)<ylw(s+1));
            [Area,~,~,~,~]=areaprop(slw',[],[],-1);
            Aw(s+1,1)=Area;
        else
            Aw(s+1,1)=0;
        end
    end
end

%***** Areas, weights, cohesive forces and friction forces*****
Aw=abs(Aw);%slice's area which contact with Phreatic Level
Ww=Aw*9.81;%water impulse
A=abs(A)-abs(A2);

```

```

A2=abs (A2) -abs (A3) ;
A3=abs (A3) -abs (A4) ;
A4=abs (A4) ;
W=A*UW+A2*UW2+A3*UW3+A4*UW4;% self weight of each slice

CF1=ch*A1;CF1aux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l
CFb=ch*Sw;CFb1aux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'b

CF12=ch2*A1;CF12aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l
CFb2=ch2*Sw;CFb2aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0); % cohesive forces of
each slice = c'b

CF13=ch3*A1;CF13aux=(A-A3~=A & A4==0 );% cohesive forces of each slice
= c'l
CFb3=ch3*Sw;CFb3aux=(A-A3~=A & A4==0 ); % cohesive forces of each slice
= c'b

CF14=ch4*A1;CF14aux=(A-A4~=A );% cohesive forces of each slice = c'l
CFb4=ch4*Sw;CFb4aux=(A-A4~=A ); % cohesive forces of each slice = c'b

CFL=CF1.*(CF1aux)+CF12.*(CF12aux)+CF13.*(CF13aux)+CF14.*(CF14aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'l
CFB=CFb.*(CFb1aux)+CFb2.*(CFb2aux)+CFb3.*(CFb3aux)+CFb4.*(CFb4aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'b

phiaux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);phi2aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0);
phi3aux=(A-A3~=A & A4==0);phi4aux=(A-A4~=A);
PHI=phi.*phiaux+phi2.*phi2aux+phi3.*phi3aux+phi4.*phi4aux;% friction
forces of each slice of 2layers combined
CH=CFL./A1;%cohesion force which compiled all layers contribution[KPa]
if PLcheck==1&& isempty([aw bw])==0;
u=Ww./Sw;% water pressure[KPa]
ylw1aux=interp1 (PL (:, 1) , PL (:, 2) , xm );%introduction of suction effect
u1aux=find(~u);
for s=u1aux (1) :u1aux (end);
u (u1aux (s, 1) )=(ysm (s) -ylw1aux (s) )*-9.81;
end
else
u=zeros (NoS, 1);
end

% _____ CORREIA AUXILIAR CALCULATION _____
for s=0: (NoS1-1) ;
epson=(xs (s+1) -xleft) / (xright-xleft);
Eta (s+1, 1)=epson;
end
%Interslice function direct input [function with a bell shape]

XX=[0;0.071428571;0.142857143;0.214285714;0.25;0.285714286;0.357142857;0.42
8571429;0.5;0.571428571;0.642857143;0.714285714;0.75;0.785714286;0.85714285
7;0.928571429;1];

YY=[0;0.024390318;0.164560362;0.379063161;0.49802326;0.616190772;0.82676074

```

```

9;0.9710101;1;0.9710101;0.826760749;0.616190772;0.49802326;0.379063161;0.16
4560362;0.024390318;0];
SIFy=[interp1(XX,YY,Eta)];% interslice function interpolation to match
with slice number division

deltaf=zeros(1,length(W));
for s=1:(NoSl-1);
deltaf(s)=[SIFy(s+1)-SIFy(s)];
end
deltaf=deltaf';

Sal=Sal*LRorRL;%signal change due slope direction [1 if right to left,-1
if left to right]

#####CORREIA'S METHOD CALCULATION#####
syms Fs;
AA11=deltaf.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA12=(Fs+tan(PHI).*tan(Sa1));
AA1=AA11./AA12;
AA_1=sum(AA1);
AA21=W.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA22=(CH-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;AA23=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);AA2=(AA21+AA22).
/AA23;AA_2=sum(AA2);

AA31=AA1.*ysm; AA32=deltaf.*xm;AA_3=sum(AA31)-sum(AA32);
AA4=AA2.*ysm;AA_4=sum(AA4);

[solution]=solve(AA_1*AA_4-AA_2*AA_3);
double(solution);
Fs=max(double(solution))

AA11=deltaf.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA12=(Fs+tan(PHI).*tan(Sa1));
AA1=AA11./AA12;
AA_1=sum(AA1);
AA21=W.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA22=(CH-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;AA23=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);AA2=(AA21+AA22).
/AA23;AA_2=sum(AA2);
Xmax=sum(AA2)/sum(AA1)*-1;
Xmax=double(Xmax)

GLOBAL(SRFC,:)=[SRFC xy1G(SRFC,1) xy1G(SRFC,2) R(SRFC) Fs Xmax 1];% global
MATRIX with relevant output information
FSGLOBAL=GLOBAL(:,5);% compile only FoS
end
close(wait)
% Time control
toc;

% Additional Output Data Extra slice forces information of the critical
slice
% after verify all potential surfaces program select the critical one
% critical slip surface is calculated again to obtain all extra data
GLOBAL1=sortrows(GLOBAL,5);
FSMIN=min(FSGLOBAL);

```

```

if AInf==1;Fs=GLOBAL1(1,5);%if require extra data it is necessary to run
again the critical surface geometrical data so that is what program do from
now

P=circleAsPolygon([GLOBAL1(1,2),GLOBAL1(1,3),GLOBAL1(1,4)],5000);%transform
circle to polygon [after]
Px=P(:,1);%P first column
Py=P(:,2);%P second column

if NLayers==1;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
INT=[a b];
elseif NLayers==2;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2];
elseif NLayers==3;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
[a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2;a3 b3];
else NLayers==4;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliary function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
[a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,Px,Py);
[a4 b4]=curveintersect(xx4,yy4,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2;a3 b3;a4 b4];
end

%correct selection of intersection points
%arc of circumference that matters
t=[P(:,1)>=min(a) & P(:,1)<=max(INT(:,1)) & P(:,1)>=
min(Xbound),P(:,2)<=max(INT(:,2)) & P(:,2)>= min(Ybound) ];
t1=[t(:,1).*t(:,2),t(:,1).*t(:,2)];% arc of potential slip surface
t2=t1.*P;
[~,~,v]=find(t2(:,1));
[~,~,v1]=find(t2(:,2));
K=INT;% array[a b] with intersection points
if size(K,1)==2&& min(INT(:,2))==min(Ybound);%control
condition_Attention to homogeneous slopes due only to the same 2
intersections possibility
K1=sortrows(K);
t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(2,1) K1(2,2);max(xx) min(yy)];%potential
slip surface coordinates[x y]
else
K1=sortrows(K);%put in ascending order x coordinates
t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(end,1) K1(end,2)];%potential slip surface
coordinates[x y]
end
xleft=min(t3(:,1));xright=max(t3(:,1));% left border and right border

%adding points of transition from a layer to another
%inclusion of surface points

```

```

%*****
%*****
%*****
%*****
%adding points of transition from a layer to another
%inclusion of surface points
Aux40=find((Xbound)>xleft & (Xbound)<xright);
LSxpoints=Xbound(Aux40);LSxpoints=unique(LSxpoints);
LSypoints=interp1(ls(:,1),ls(:,2),LSxpoints);
LSpoints=[LSxpoints LSypoints];
%inclusion of intersection with phreatic level
if PLcheck==1;
[aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),t3(:,1),t3(:,2));
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-length(LSxpoints)-
length(aw)+2)];%slice division coordinate X , n°of slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints;aw];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
else
%inclusion of intersection points
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-
length(LSxpoints)+2)];%slice division coordinate X , n°of
slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
end
yls=interp1(ls(:,1),ls(:,2),xs)
% Geometric slice parameter ( vertex coordinates,slice width,base
% inclination, mean points of slice's base.etc.etc.etc
Sw=[];for i=1:(NoS1-1);Sw=[Sw,xs(i+1)-xs(i)];end;Sw=Sw';%slice width
=deltaX
dy=[];for i=1:(NoS1-1);dy=[dy,ys(i+1)-ys(i)];end;dy=dy';%deltaY
Sa=atan(dy./Sw)*180/pi;%slice angle degrees
Sal=atan(dy./Sw);%slice angle radians
slope=[xs yls ys];% slope coordinates compiled
Al=[sqrt(Sw.^2+dy.^2)];%segments of arc lenght
% mean point slice base coordinates
xm=[];
for s=1:length(xs)-1;
xm=[xm,(xs(s)+xs(s+1))/2];
end
xm=xm';
ysm=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xm)];
%*****
%*****
%*****
%*****
%lices coordinates - compile slices vertex coordinates on the same
vector
A=zeros(NoS1-1,1);
for s=0:(NoS1-2);
%find coordinates of the arc base of each slice
t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
t6=t5.*t3;
[~,~,v2]=find(t6(:,1));
[~,~,v3]=find(t6(:,2));

```

```

    t7=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yls(s+2);xs(s+1)
    yls(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
    %area determination
    [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(t7', [], [], -1);
    A(s+1,1)=Area;
end

if NLayers>1
    %2nd Layer
    yl2=interp1(ls2(:,1),ls2(:,2),xs);% if 2nd layer exists
    A2=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
        t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
        t6=t5.*t3;
        [~,~,v2]=find(t6(:,1));
        [~,~,v3]=find(t6(:,2));
        sl2=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl2(s+2);xs(s+1)
yl2(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl2(s+1));
            [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl2', [], [], -1);
            A2(s+1,1)=Area;
        else
            A2(s+1,1)=0;
        end
    end
end
if NLayers>2;
    %3rd Layer
    yl3=interp1(ls3(:,1),ls3(:,2),xs);% if 2nd layer exists
    A3=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
        t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
        t6=t5.*t3;
        [~,~,v2]=find(t6(:,1));
        [~,~,v3]=find(t6(:,2));
        sl3=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl3(s+2);xs(s+1)
yl3(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl3(s+1));
            [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl3', [], [], -1);
            A3(s+1,1)=Area;
        else
            A3(s+1,1)=0;
        end
    end
end
if NLayers>3;
    %4th Layer
    yl4=interp1(ls4(:,1),ls4(:,2),xs);% if 2nd layer exists
    A4=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];

```

```

t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
t6=t5.*t3;
[~,~,v2]=find(t6(:,1));
[~,~,v3]=find(t6(:,2));
sl4=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl4(s+2);xs(s+1)
yl4(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl4(s+1));
[Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl4',[],[],-1);
A4(s+1,1)=Area;
else
A4(s+1,1)=0;
end
end
end
%*****PHREATIC LEVEL INCLUSION*****
%auxiliary function to obtain intersection coordinates with phreatic
level
if PLcheck==0;
Aw=zeros(length(xs)-1,1);% empty matrix= no P.L.
else
[aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),Px,Py);
ylw=interp1(PL(:,1),PL(:,2),xs);% if P.L exists
Aw=zeros(NoS1-1,1);
for s=0:(NoS1-2);
%find coordinates of the arc base of each slice
t4=[t3(:,1)>=xs(s+1) & t3(:,1)<=xs(s+2), t3(:,1)>=xs(s+1) &
t3(:,1)<=xs(s+2) ];
t5=[t4(:,1).*t4(:,2),t4(:,1).*t4(:,2)];
t6=t5.*t3;
[~,~,v2]=find(t6(:,1));
[~,~,v3]=find(t6(:,2));
slw=[xs(s+1) ys(s+1);v2 v3;xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) ylw(s+2);xs(s+1)
ylw(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
if any(ys(s+1)<ylw(s+1));
[Area,~,~,~,~,~]=areaprop(slw',[],[],-1);
Aw(s+1,1)=Area;
else
Aw(s+1,1)=0;
end
end
end
end

%***** Areas, weights, cohesive forces and friction forces*****
Aw=abs(Aw);%slice area which contacts with Phreatic Level
Ww=Aw*9.81;%water impulse
A=abs(A)-abs(A2);
A2=abs(A2)-abs(A3);
A3=abs(A3)-abs(A4);
A4=abs(A4);
W=A*UW+A2*UW2+A3*UW3+A4*UW4;% self weight of each slice

CF1=ch*A1;CF1aux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l
CFb=ch*Sw;CFbaux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'b

CF12=ch2*A1;CF12aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l

```

```

CFb2=ch2*Sw;CFb2aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0); % cohesive forces of
each slice = c'b

CF13=ch3*A1;CF13aux=(A-A3~=A & A4==0 );% cohesive forces of each slice
= c'l
CFb3=ch3*Sw;CFb3aux=(A-A3~=A & A4==0 ); % cohesive forces of each slice
= c'b

CF14=ch4*A1;CF14aux=(A-A4~=A );% cohesive forces of each slice = c'l
CFb4=ch4*Sw;CFb4aux=(A-A4~=A ); % cohesive forces of each slice = c'b

CFL=CF1.*(CF1aux)+CF12.*(CF12aux)+CF13.*(CF13aux)+CF14.*(CF14aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'l
CFB=CFb.*(CFbaux)+CFb2.*(CFb2aux)+CFb3.*(CFb3aux)+CFb4.*(CFb4aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'b

phiaux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);phi2aux=(A-A2~=A & A3==0); phi3aux=(A-
A3~=A & A4==0);phi4aux=(A-A4~=A);
PHI=phi.*phiaux+phi2.*phi2aux+phi3.*phi3aux+phi4.*phi4aux;% friction
forces of each slice of 2layers combined
CH=CFL./A1;%cohesion force which compiled all layers contribution[KPa]
if PLcheck==1&& isempty([aw bw])==0;
u=Ww./Sw;% water pressure[KPa]
ylwaux=interp1(PL(:,1),PL(:,2),xm);%introduction of suction effect
uaux=find(~u);
    for s=uaux(1):uaux(end);
        u(uaux(s,1))=(ysm(s)-ylwaux(s))*-9.81;
    end
else
    u=zeros(NoS,1);
end

for s=0:(NoS1-1);
    epon=(xs(s+1)-xleft)/(xright-xleft);
    Eta(s+1,1)=epon;
end
%Interslice function direct input

XX=[0;0.071428571;0.142857143;0.214285714;0.25;0.285714286;0.357142857;0.42
8571429;0.5;0.571428571;0.642857143;0.714285714;0.75;0.785714286;0.85714285
7;0.928571429;1];

YY=[0;0.024390318;0.164560362;0.379063161;0.49802326;0.616190772;0.82676074
9;0.9710101;1;0.9710101;0.826760749;0.616190772;0.49802326;0.379063161;0.16
4560362;0.024390318;0];
SIFy=[interp1(XX,YY,Eta)];

deltaf=zeros(1,length(W));
for s=1:(NoS1-1);
    deltaf(s)=[SIFy(s+1)-SIFy(s)];
end
deltaf=deltaf';

Sa1=Sa1*LRorRL;%signal change due slope direction [1 if right to left,-1
if left to right]

#####CORREIA'S METHOD CALCULATION#####

```

```

AA11=deltaf.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA12=(Fs+tan(PHI).*tan(Sa1));
AA1=AA11./AA12;
AA_1=sum(AA1);
AA21=W.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA22=(CH-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;AA23=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);AA2=(AA21+AA22).
/AA23;AA_2=sum(AA2);
Xmax=sum(AA2)/sum(AA1)*-1;
Xmax=double(Xmax);

AA31=AA1.*ysm; AA32=deltaf.*xm;AA_3=sum(AA31)-sum(AA32);
AA4=AA2.*ysm;AA_4=sum(AA4);
X=Xmax*SIFy(1:end);
X=double(X);

deltaX=zeros(1,length(W));
for s=1:(NoS1-1);
deltaX(s)=[X(s+1)-X(s)];
end
deltaX=deltaX';

deltaE1=(W+deltaX).*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));deltaE2=(CH-
u).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;deltaE3=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);deltaE=(deltaE1+deltaE2
)./deltaE3;
deltaE=double(deltaE);

E=zeros(1,length(deltaE+1));
for s=1:length(deltaE);
E(s+1)=E(s)+deltaE(s);
end
E(1,end)=0;
E=E';

No=zeros(NoS1-1,1);
So=zeros(NoS1-1,1);
for s=1:NoS1-1;
syms N S;
[N S]=solve((W(s)+deltaX(s))-N.*cos(Sa1(s))-
S.*sin(Sa1(s)),deltaE(s)+N.*sin(Sa1(s))-S.*cos(Sa1(s)),N,S);
N=double(N);S=double(S);
No(s)=N;
So(s)=S;
end
check1=sum(deltaX);
check2=sum(deltaE);
check3=sum(-No.*sin(Sa1)+So.*cos(Sa1));
Nkpa=No./Al;% normal stress kPa
Skpa=So./Al;% tangential stress kPa
%compile slice forces [slice number,Xright, Xleft,Erigh,Eleft,N,S]
sforces=zeros(NoS,7);
for s=1:NoS
sliceforces=[s X(s) X(s+1) E(s) E(s+1) Nkpa(s) Skpa(s) ];
sforces(s,:)=sliceforces;
end
end

%CRITICAL SURFACE PLOT[same cycle made on process calculation but only
applied to critical surface]

```

```

P=circleAsPolygon([GLOBAL1(1,2),GLOBAL1(1,3),GLOBAL1(1,4)],5000);%transform
circle to polygon
Px=P(:,1);%P first column
Py=P(:,2);%P second column
if NLayers==1;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliar function to obtain
intersection coordinates
INT=[a b];
elseif NLayers==2;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliar function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2];
elseif NLayers==3;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliar function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
[a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2;a3 b3];
else NLayers==4;
[a b]=curveintersect(xx,yy,Px,Py);%auxiliar function to obtain
intersection coordinates
[a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,Px,Py);
[a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,Px,Py);
[a4 b4]=curveintersect(xx4,yy4,Px,Py);
INT=[a b;a2 b2;a3 b3;a4 b4];
end
if PLcheck==1;
[aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),Px,Py);
end

%correct selection of intersection points
%arc of circumference that matters
t=[P(:,1)>=min(INT(:,1)) & P(:,1)<=max(INT(:,1)) & P(:,1)>=
min(Xbound),P(:,2)<=max(INT(:,2)) & P(:,2)>= min(Ybound) ];
t1=[t(:,1).*t(:,2),t(:,1).*t(:,2)];% arc of potential slip surface
t2=t1.*P;
[~,~,v]=find(t2(:,1));
[~,~,v1]=find(t2(:,2));
K=[INT];% array[a b] with intersection points
if size(K,1)==2&& min(INT(:,2))==min(Ybound);%control
condition_Attention to homogeneous slopes due only the same 2 intersections
possibility
K1=sortrows(K);
t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(2,1) K1(2,2);max(xx) min(yy)];%potential
slip surface coordinates[x y]
else
K1=sortrows(K);%put in ascending order x coordinates
t3=[K1(1,1) K1(1,2);v v1;K1(end,1) K1(end,2)];%potential slip surface
coordinates[x y]
end
xleft=min(t3(:,1));xright=max(t3(:,1));% left border and right border

%adding points of transition from a layer to another
%inclusion of surface points
Aux40=find((Xbound)>xleft & (Xbound)<xright);
LSxpoints=Xbound(Aux40);LSxpoints=unique(LSxpoints);

```

```

LSypoints=interp1(ls(:,1),ls(:,2),LSxpoints);
LSpoints=[LSxpoints LSypoints];
%inclusion of intersection with phreatic level
if PLcheck==1;
[aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),t3(:,1),t3(:,2));
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-length(LSxpoints)-
length(aw)+2)];%slice division coordinate X , n°of slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints;aw];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
else
%inclusion of intersection points
INTxaux=unique(INT(:,1));
xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-
length(LSxpoints)+2)];%slice division coordinate X , n°of
slices=n°divisions-1
xs=[xs;INTxaux;LSxpoints];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
end
yls=interp1(ls(:,1),ls(:,2),xs);

%_____*****PLOT*****_____

title('TALUDE MRC');
hold on;
grid on;
xlabel('X (m)');
ylabel('Y(m)');
fill(xx,yy,'m');% fill layer 1 m aka(magenta)
fill(xx2,yy2,'g');% fill layer 2 g aka(green)
fill(xx3,yy3,'c');% fill layer 3 c aka(cyan)
fill(xx4,yy4,'r');% fill layer 4 r aka(red)
%colormap of FoS critical Values
FSMatrix=zeros(gsx1+1);
for m=1:length(gridx);
for n=1:length(gridy);
aux30=find(GLOBAL1(:,2)==gridx(m,n)&GLOBAL1(:,3)==gridy(m,n));
FSMatrix(m,n)=min(GLOBAL1(aux30,5));
end
end
contourf(gridx,gridy,FSMatrix,20);
colormap hot
%plot surface details[put together extreme vertex and circle center]
critx=[xs(1);GLOBAL1(1,2);xs(end)];critey=[ys(1);GLOBAL1(1,3);ys(end)];
plot(critx,critey,'b--');
if NLayers==1;
plot(xx,yy,'k.--
',x1,y1,'r+',x2,y2,'x',Px,Py,'b',a,b,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y',GLOBAL1(1,2),
GLOBAL1(1,3),'go');
elseif NLayers==2;
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--
',x1,y1,'r+',x2,y2,'x',Px,Py,'b',a,b,'ro',a2,b2,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y',GL
OBAL1(1,2),GLOBAL1(1,3),'go');
elseif NLayers==3
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--',xx3,yy3,'k.--
',x1,y1,'r+',x2,y2,'x',Px,Py,'b',a,b,'ro',a2,b2,'ro',a3,b3,'ro',t3(:,1),t3(
:,2),'y',GLOBAL1(1,2),GLOBAL1(1,3),'go');
else

```

```
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--',xx3,yy3,'k.--',xx4,yy4,'k.--',x1,y1,'r+',x2,y2,'x',Px,Py,'b',a,b,'ro',a2,b2,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y',GLOBAL1(1,2),GLOBAL1(1,3),'go');
plot(a3,b3,'ro',a4,b4,'ro');
end
plot(xs,ys,'b+',xs,yls,'b+');
if PLcheck==1;
    plot(PL(:,1),PL(:,2),'b');
end
t8=[];
for s=1:NoS;
    t8=[t8;xs(s) yls(s);xs(s+1) yls(s+1);xs(s+1) ys(s+1);xs(s+1) yls(s+1)];
end
plot(t8(:,1),t8(:,2));%plot slope division in slices
% END
```



```

xx3=coordinatesL3(:,1);%L3 x coordinate
yy3=coordinatesL3(:,2);%L3 y coordinate
%*****L4
if any(isnan(z(11:26,13:14)));% determine how many input points
were inserted in Excel data file #4
Aux20=find(isnan(z(11:26,13:14)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,13:14);
else
Aux20=17;
end
coordinatesL4=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,13:14);
xx4=coordinatesL4(:,1);%L4 x coordinate
yy4=coordinatesL4(:,2);%L4 y coordinate
%define coordinates of a line surface [submatrix of coordinates]
%*****LS1
if any(isnan(z(11:26,3:4)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,3:4)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,3:4);
else
Aux20=17;
end
ls=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,3:4);% line surface coordinates
%*****LS2
if any(isnan(z(11:26,7:8)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,7:8)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,7:8);
else
Aux20=17;
end
ls2=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,7:8);% line surface#2 coordinates
%*****LS3
if any(isnan(z(11:26,11:12)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,11:12)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,11:12);
else
Aux20=17;
end
ls3=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,11:12);% line surface#3 coordinates
%*****LS4
if any(isnan(z(11:26,15:16)));
Aux20=find(isnan(z(11:26,15:16)));
z(11:26-(16-Aux20(1))-1,15:16);
else
Aux20=17;
end
ls4=z(11:26-(16-Aux20(1))-1,15:16);% line surface#4 coordinates

end
%Phreatic Level Input*****PL
PLcheck=z(27,2);% verify existence of phreatic level
if any(isnan(z(30:44,1:2)));
Aux20=find(isnan(z(30:44,1:2)));
z(30:44-(15-Aux20(1))-1,1:2);
else
Aux20=16;
end
PL=z(30:44-(15-Aux20(1))-1,1:2);% phreatic level coordinates
%*****
Xbound=[xx;xx2;xx3;xx4];% X boundaries coordinates

```

```

Ybound=[yy;yy2;yy3;yy4];% Y boundaries coordinates

% *****INPUT LAYERS CHARACTERISTICS*****
if NLayers==1;
% Material properties
%zeros matrix
    UW=z(5,2);% UW; unit weight
    phi1=z(6,2);% phi: friction angle
    phi=phi1*pi/180;
    ch=z(7,2);% c: cohesion
    UW2=0;phi2=0;phi12=0;ch2=0;A2=0;UW3=0;phi3=0; phi13=0;
ch3=0;A3=0;UW4=0;phi4=0; phi14=0;ch4=0;A4=0;
elseif NLayers==2;
    UW=z(5,2);% UW; unit weight
    phi1=z(6,2);% phi: friction angle
    phi=phi1*pi/180;
    ch=z(7,2);% c: cohesion
    UW2=z(5,6);% UW; unit weight
    phi12=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
    phi2=phi12*pi/180;
    ch2=z(7,6);% c: cohesion
    UW3=0;phi3=0; phi13=0; ch3=0;A3=0;UW4=0;phi4=0; phi14=0;ch4=0;A4=0;
elseif NLayers==3;
    UW=z(5,2);% UW; unit weight
    phi1=z(6,2);% phi: friction angle
    phi=phi1*pi/180;
    ch=z(7,2);% c: cohesion
    UW2=z(5,6);% UW; unit weight
    phi12=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
    phi2=phi12*pi/180;
    ch2=z(7,6);% c: cohesion
    UW3=z(5,10);% UW; unit weight
    phi13=z(6,10);% phi: friction angle[degrees]
    phi3=phi13*pi/180;
    ch3=z(7,10);% c: cohesion
    UW4=0;phi4=0;phi14=0;ch4=0;A4=0;
else NLayers==4;
    UW=z(5,2);% UW; unit weight
    phi1=z(6,2);% phi: friction angle
    phi=phi1*pi/180;
    ch=z(7,2);% c: cohesion
    UW2=z(5,6);% UW; unit weight
    phi12=z(6,6);% phi: friction angle[degrees]
    phi2=phi12*pi/180;
    ch2=z(7,6);% c: cohesion
    UW3=z(5,10);% UW; unit weight
    phi13=z(6,10);% phi: friction angle[degrees]
    phi3=phi13*pi/180;
    ch3=z(7,10);% c: cohesion
    UW4=z(5,14);% UW; unit weight
    phi14=z(6,14);% phi: friction angle[degrees]
    phi4=phi14*pi/180;
    ch4=z(7,14);% c: cohesion
end

SoilCharacteristics=[UW phi1 ch;UW2 phi12 ch2;UW3 phi13 ch3;UW4 phi14
ch4];%zeros matrix

```

```

NoS=z(1,6);%input n° of slices
NoS1=NoS+1;%input NoS slices impose NoS+1 divisions of the segments

tic;%initial time
if any(isnan(z(29:44,9:10)));
    Aux20=find(isnan(z(29:44,9:10)));
    z(29:44-(16-Aux20(1))-1,9:10);
    else
        Aux20=17;
    end
t3=z(29:44-(16-Aux20(1))-1,9:10);%potential slip surface coordinates[x y]
xleft=t3(1,1);xright=t3(end,1);

if NLayers==1;
    [a b]=curveintersect(xx,yy,t3(:,1),t3(:,2));%auxiliary function to
obtain intersection coordinates
    INT=[a b];% intersection points
elseif NLayers==2;
    [a b]=curveintersect(xx,yy,t3(:,1),t3(:,2));%auxiliary function to
obtain intersection coordinates
    [a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,t3(:,1),t3(:,2));
    INT=[a b;a2 b2];% intersection points
elseif NLayers==3;
    [a b]=curveintersect(xx,yy,t3(:,1),t3(:,2));
    [a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,t3(:,1),t3(:,2));
    [a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,t3(:,1),t3(:,2));
    INT=[a b;a2 b2;a3 b3];% intersection points
else NLayers==4;
    [a b]=curveintersect(xx,yy,t3(:,1),t3(:,2));%auxiliary function to
obtain intersection coordinates
    [a2 b2]=curveintersect(xx2,yy2,t3(:,1),t3(:,2));
    [a3 b3]=curveintersect(xx3,yy3,t3(:,1),t3(:,2));
    [a4 b4]=curveintersect(xx4,yy4,t3(:,1),t3(:,2));
    INT=[a b;a2 b2;a3 b3;a4 b4];% intersection points
end
%adding points of transition from a layer to another
%inclusion of surface points
Aux40=find((Xbound)>xleft & (Xbound)<xright);
LSxpoints=Xbound(Aux40);LSxpoints=unique(LSxpoints);
LSypoints=interp1(ls(:,1),ls(:,2),LSxpoints);
LSpoints=[LSxpoints LSypoints];
%inclusion of intersection with phreatic level
if PLcheck==1;
    [aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),t3(:,1),t3(:,2));
    INTxaux=unique(INT(:,1));
    xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-length(LSxpoints)-
length(aw)+2)'];%slice division coordinate X , n°of slices=n°divisions-1
    xs=[xs;INTxaux;LSxpoints;aw];xs=sort(xs);xs=unique(xs);
    ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
    else
        %inclusion of intersection points
        INTxaux=unique(INT(:,1));
        xs=[linspace(xleft,xright,NoS1-length(INTxaux)-
length(LSxpoints)+2)'];%slice division coordinate X , n°of
slices=n°divisions-1
        xs=[xs;INTxaux;LSxpoints];xs=sort(xs);xs=unique(xs);

```

```

ys=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xs)];%slice division coordinate Y
end

% Geometric slice parameter (vertex coordinates, slice width, base
% inclination, mean points of slice base.etc.etc.etc
Sw=[];for i=1:(NoS1-1);Sw=[Sw,xs(i+1)-xs(i)];end;Sw=Sw';%slice width
=deltaX
dy=[];for i=1:(NoS1-1);dy=[dy,ys(i+1)-ys(i)];end;dy=dy';%deltaY
Sa=atan(dy./Sw)*180/pi;%slice angle degrees
Sa1=atan(dy./Sw);%slice angle radians
yls=interp1(ls(:,1),ls(:,2),xs);
slope=[xs yls ys];% slope coordinates compiled
Al=[sqrt(Sw.^2+dy.^2)];%segments of arc length
% mean point slice base coordinates
xm=[];
for s=1:length(xs)-1;
xm=[xm,(xs(s)+xs(s+1))/2];
end
xm=xm';

ysm=[interp1(t3(:,1),t3(:,2),xm)];
%slices coordinates - compile slices vertex coordinates on the same
vector
s=0;A=zeros(NoS1-1,1);
for s=0:(NoS1-2);
%find coordinates of the arc base of each slice
t7=[xs(s+1) ys(s+1);xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yls(s+2);xs(s+1)
yls(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
%area determination
[Area,~,~,~,~,~]=areaprop(t7',[],[],-1);
A(s+1,1)=Area;
end

if NLayers>1
%2nd Layer
yl2=interp1(ls2(:,1),ls2(:,2),xs);% if 2nd layer exists
A2=zeros(NoS1-1,1);
for s=0:(NoS1-2);
%find coordinates of the arc base of each slice
sl2=[xs(s+1) ys(s+1);xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl2(s+2);xs(s+1)
yl2(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl2(s+1));
[Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl2',[],[],-1);
A2(s+1,1)=Area;
else
A2(s+1,1)=0;
end
end
end
if NLayers>2;
%3rd Layer
yl3=interp1(ls3(:,1),ls3(:,2),xs);% if 3rd layer exists
A3=zeros(NoS1-1,1);
for s=0:(NoS1-2);
%find coordinates of the arc base of each slice
sl3=[xs(s+1) ys(s+1);xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl3(s+2);xs(s+1)
yl3(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl3(s+1));

```

```

        [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl3', [], [], -1);
        A3(s+1,1)=Area;
        else
        A3(s+1,1)=0;
        end
    end
end
if NLayers>3;
%4th Layer
    yl4=interp1(ls4(:,1),ls4(:,2),xs);% if 4th layer exists
    A4=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        sl4=[xs(s+1) ys(s+1);xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) yl4(s+2);xs(s+1)
yl4(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any([ys(s+2);ys(s+1)]<yl4(s+1));
            [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(sl4', [], [], -1);
            A4(s+1,1)=Area;
        else
            A4(s+1,1)=0;
        end
    end
end

%*****PHREATIC LEVEL INCLUSION*****
%auxiliary function to obtain intersection coordinates with phreatic
level
if PLcheck==0;
    Aw=zeros(length(xs)-1,1);% empty matrix= no P.L.
else
    [aw bw]=curveintersect(PL(:,1),PL(:,2),t3(:,1),t3(:,2));
    ylw=interp1(PL(:,1),PL(:,2),xs);% if P.L exists
    Aw=zeros(NoS1-1,1);
    for s=0:(NoS1-2);
        %find coordinates of the arc base of each slice
        slw=[xs(s+1) ys(s+1);xs(s+2) ys(s+2);xs(s+2) ylw(s+2);xs(s+1)
ylw(s+1);xs(s+1) ys(s+1)];
        if any(ys(s+1)<=ylw(s+1));
            [Area,~,~,~,~,~]=areaprop(slw', [], [], -1);
            Aw(s+1,1)=Area;
        else
            Aw(s+1,1)=0;
        end
    end
end

%***** Areas, weights, cohesive forces and frictionforces*****
Aw=abs(Aw);%slice area which contacts with Phreatic Level
Ww=Aw*9.81;%water impulse
A=abs(A)-abs(A2);
A2=abs(A2)-abs(A3);
A3=abs(A3)-abs(A4);
A4=abs(A4);
W=A*UW+A2*UW2+A3*UW3+A4*UW4;% self weight of each slice

CF1=ch*A1;CF1aux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l

```

```

CFb=ch*Sw;CFbaux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'b

CF12=ch2*A1;CF12aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0);% cohesive forces of each
slice = c'l
CFb2=ch2*Sw;CFb2aux=(A-A2~=A & A3==0 & A4==0); % cohesive forces of
each slice = c'b

CF13=ch3*A1;CF13aux=(A-A3~=A & A4==0 );% cohesive forces of each slice
= c'l
CFb3=ch3*Sw;CFb3aux=(A-A3~=A & A4==0 ); % cohesive forces of each slice
= c'b

CF14=ch4*A1;CF14aux=(A-A4~=A );% cohesive forces of each slice = c'l
CFb4=ch4*Sw;CFb4aux=(A-A4~=A ); % cohesive forces of each slice = c'b

CFL=CF1.*(CF1aux)+CF12.*(CF12aux)+CF13.*(CF13aux)+CF14.*(CF14aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'l
CFB=CFb.*(CFbaux)+CFb2.*(CFb2aux)+CFb3.*(CFb3aux)+CFb4.*(CFb4aux);%
cohesive forces of each slice of 2layers combined = c'b

phiaux=(A-A2==A & A3==0 & A4==0);phi2aux=(A-A2~=A & A3==0); phi3aux=(A-
A3~=A & A4==0);phi4aux=(A-A4~=A);
PHI=phi.*phiaux+phi2.*phi2aux+phi3.*phi3aux+phi4.*phi4aux;% friction
forces of each slice of 2layers combined
ch=CFL./A1;%cohesion force[KPa]
if PLcheck==1&& isempty([aw bw])==0;
u=Ww./Sw;% water pressure[KPa]
ylwaux=interp1(PL(:,1),PL(:,2),xm);%introduction of suction effect
uaux=find(~u);
    for s=uaux(1):uaux(end);
        u(uaux(s,1))=(ysm(s)-ylwaux(s))*-9.81;
    end
else
    u=zeros(NoS,1);
end

% _____CORREIA AUXILIAR CALCULATION_____
for s=0:(NoS1-1);
    epon=(xs(s+1)-xleft)/(xright-xleft);
    Eta(s+1,1)=epon;
end
%Interslice function direct input [function with a bell shape]

XX=[0;0.071428571;0.142857143;0.214285714;0.25;0.285714286;0.357142857;0.42
8571429;0.5;0.571428571;0.642857143;0.714285714;0.75;0.785714286;0.85714285
7;0.928571429;1];

YY=[0;0.024390318;0.164560362;0.379063161;0.49802326;0.616190772;0.82676074
9;0.9710101;1;0.9710101;0.826760749;0.616190772;0.49802326;0.379063161;0.16
4560362;0.024390318;0];
SIFy=[interp1(XX,YY,Eta)];% interslice function interpolation to match
with slice number division

deltaf=zeros(1,length(W));
for s=1:(NoS1-1);
deltaf(s)=[SIFy(s+1)-SIFy(s)];

```

```

end
deltaf=deltaf';

Sa1=Sa1*LRorRL;%signal change due slope direction [1 if right to left,-
1 if left to right]

#####CORREIA'S METHOD CALCULATION#####
syms Fs;
AA11=deltaf.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA12=(Fs+tan(PHI).*tan(Sa1));
AA1=AA11./AA12;
AA_1=sum(AA1);
AA21=W.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA22=(ch-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;AA23=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);AA2=(AA21+AA22).
/AA23;AA_2=sum(AA2);

AA31=AA1.*ysm; AA32=deltaf.*xm;AA_3=sum(AA31)-sum(AA32);
AA4=AA2.*ysm;AA_4=sum(AA4);

[solution]=solve(AA_1*AA_4-AA_2*AA_3);
double(solution);
Fs=max(double(solution))

AA11=deltaf.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA12=(Fs+tan(PHI).*tan(Sa1));
AA1=AA11./AA12;
AA_1=sum(AA1);
AA21=W.*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));AA22=(ch-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;AA23=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);AA2=(AA21+AA22).
/AA23;AA_2=sum(AA2);
Xmax=sum(AA2)/sum(AA1)*-1;
Xmax=double(Xmax)

if AInf==1;
AA31=AA1.*ysm; AA32=deltaf.*xm;AA_3=sum(AA31)-sum(AA32);
AA4=AA2.*ysm;AA_4=sum(AA4);
X=Xmax*SIFy(1:end);
X=double(X);

deltaX=zeros(1,length(W));
for s=1:(NoS1-1);
deltaX(s)=[X(s+1)-X(s)];
end
deltaX=deltaX';

deltaE1=(W+deltaX).*(tan(PHI)-Fs*tan(Sa1));deltaE2=(ch-
u.*tan(PHI)).*Sw.*(sec(Sa1)).^2;deltaE3=Fs+tan(PHI).*tan(Sa1);deltaE=(delta
E1+deltaE2)./deltaE3;
deltaE=double(deltaE);

E=zeros(1,length(deltaE+1));
for s=1:length(deltaE);
E(s+1)=E(s)+deltaE(s);
end
E(1,end)=0;
E=E';

No=zeros(NoS,1);
So=zeros(NoS,1);

```

```

    for s=1:NoS;
        syms N S;
        [N S]=solve((W(s)+deltaX(s))-N.*cos(Sa1(s))-
S.*sin(Sa1(s)),deltaE(s)+N.*sin(Sa1(s))-S.*cos(Sa1(s)),N,S);
        N=double(N);S=double(S);
        No(s)=N;
        So(s)=S;
    end
    check1=sum(deltaX);
    check2=sum(deltaE);
    check3=sum(-No.*sin(Sa1)+So.*cos(Sa1));
    Nkpa=No./Al;
    Skpa=So./Al;
    %compile slice forces [slice number,Xright, Xleft,Eright,Eleft,N,S]
sforces=zeros(NoS,7);
for s=1:NoS
sliceforces=[s X(s) X(s+1) E(s) E(s+1) Nkpa(s) Skpa(s) ];
sforces(s,:)=sliceforces;
end
end

% Time control
toc;%final time

% _____*****PLOT*****_____

title('TALUDE MRC');
hold on;
grid on;
xlabel('X (m)');
ylabel('Y(m)');
fill(xx,yy,'m');% fill layer 1 m aka(magenta)
fill(xx2,yy2,'g');% fill layer 2 g aka(green)
fill(xx3,yy3,'c');% fill layer 3 c aka(cyan)
fill(xx4,yy4,'r');% fill layer 4 r aka(red)
if NLayers==1;
plot(xx,yy,'k.--',a,b,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y');
elseif NLayers==2;
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--',a,b,'ro',a2,b2,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y');
elseif NLayers==3
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--',xx3,yy3,'k--
',a,b,'ro',a2,b2,'ro',a3,b3,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y');
else
plot(xx,yy,'k.--',xx2,yy2,'k.--',xx3,yy3,'k--',xx4,yy4,'k--
',a,b,'ro',a2,b2,'ro',t3(:,1),t3(:,2),'y');
plot(a3,b3,'ro',a4,b4,'ro');
end
plot(xs,ys,'b+',xs,yls,'b+');
if PLcheck==1;
    plot(PL(:,1),PL(:,2),'b');
end
t8=[];
for s=1:NoS;
    t8=[t8;xs(s) yls(s);xs(s+1) yls(s+1);xs(s+1) ys(s+1);xs(s+1) yls(s+1)];
end
plot(t8(:,1),t8(:,2));%plot slope division in slices
% END

```