

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELOS MÉTODOS DE JANBU E SPENCER

JOÃO LUÍS FERRÁS FERREIRA

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

Orientador: Professor Doutor José Couto Marques

Co-Orientador: Professor Doutor Manuel de Matos Fernandes

FEVEREIRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

*“A diferença entre o possível e o
impossível está na vontade humana”*

Louis Pasteur

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, Prof. José Couto Marques, pela prontidão, dedicação, paciência, entusiasmo e ânimo demonstrados no esclarecimento de todas as dúvidas que surgiram no decurso deste trabalho e que muito contribuíram para a valorização deste trabalho.

Ao meu colega João Paulo Silva agradeço todo o apoio, disponibilidade e motivação que me deu no esclarecimento de dúvidas relativas ao funcionamento e estrutura do programa.

À minha família, em especial aos meus pais, que sempre me acompanharam, apoiaram e motivaram ao longo de estes anos.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas e amigos que me acompanharam e apoiaram ao longo deste processo.

RESUMO

Atualmente a problemática da estabilidade de taludes é um tema de grande importância dadas as necessidades de expansão urbana e de ocupação de locais cuja estabilidade é desconhecida. Os taludes naturais, isto é, os que existem na Natureza sem a intervenção da mão humana, são os que levantam mais reservas em termos de estabilidade. O escorregamento de terras é frequente, principalmente no tempo das chuvas. Este fenómeno deve-se à subida do nível freático que altera a distribuição de tensões no solo, introduz pressões neutras, diminui as tensões efetivas e introduz forças de percolação, fazendo com que a resistência ao corte do solo diminua, levando a uma maior tendência para a instabilidade.

Com este trabalho pretende-se implementar dois novos métodos de análise de equilíbrio limite ao programa desenvolvido por João Paulo Silva de nome TALUDES_Mv1, o método de Spencer e método de Janbu, ambos rigorosos, sendo o primeiro passível de aplicação à análise de superfícies de rotura de forma circular e o segundo a superfícies de rotura de qualquer configuração. A linguagem de programação utilizada é a linguagem Matlab, a mesma utilizada no programa TALUDES_Mv1, que para além de ser muito atual, dispõe de uma grande capacidade de cálculo matricial e de boas capacidades gráficas para visualização de resultados.

Deste modo, começa-se por fazer uma breve apresentação acerca da estabilidade de taludes, da Teoria de Equilíbrio Limite e Método das Fatias. Posteriormente, são apresentadas as principais características dos métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 sendo depois os resultados provenientes do cálculo com estes métodos comparados com os obtidos pelos programas Slide e Slope e discutidos à luz das teorias que os permitem obter.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, equilíbrio limite, método de Janbu, método de Spencer, Matlab.

ABSTRACT

At present the problem of slope stability is a theme of great importance given the necessities of urban expansion and occupation of areas where stability is unknown. Natural slopes, that is, the ones that exist in nature without human intervention, are the ones that raise more reservations in terms of stability. The landslides are frequent, mainly during the rainy season. This phenomenon is related with the rise of the groundwater level that changes the stress distribution in the ground, increasing pore pressure, diminishing the effective stress and introducing seepage forces, which reduces the soil shear strength, leading to an increased tendency to instability.

This work intends to implement two new methods of analysis of limit equilibrium in the program developed by João Paulo Silva called TALUDES_Mv1 - the Spencer method and the Janbu method, both rigorous methods, the first being applicable to the analysis of failure surfaces of circular shape and the second to failure surfaces of any configuration. The programming language used is Matlab, the same used in the program TALUDES_Mv1, which besides being very recent has a great capacity for matrix calculations and good graphics capabilities for displaying results.

Thus, this work begins with a brief presentation about the stability of slopes, of the Limit Equilibrium Theory and the Method of Slices. Subsequently, the main characteristics of the methods implemented in the program TALUDES_Mv1 are presented, being then the results from the calculations with these methods compared with those obtained by the commercial programs Slide and Slope and discussed from the point of view of the theories that provided them.

KEYWORDS: slope stability, limit equilibrium, Janbu method, Spencer method, Matlab.

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. TEORIA DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	6
3 MÉTODO DAS FATIAS E MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	11
3.1. MÉTODO DAS FATIAS.....	11
3.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	14
3.2.1. DIFERENÇAS ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	14
3.2.1.1. Método de Fellenius.....	15
3.2.1.2. Método de Bishop	16
3.2.1.3. Método de Janbu (simplificado)	17
3.2.1.4. Método de Spencer	18
3.2.1.5. Método de Morgenstern-Price.....	20
3.2.1.6. Método de Correia.....	21
3.2.1.7. Método de Janbu.....	22
3.2.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS.....	23
3.2.2.1. Breve apresentação do Método de Equilíbrio Generalizado (GLE).....	23
3.2.2.2. Apresentação dos resultados obtidos pelo GLE	25
4 MÉTODO DE SPENCER	27
4.1. INTRODUÇÃO	27
4.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO	27
4.3. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_MV1	30
4.3.1. DETERMINAÇÃO DE FS.....	30
4.3.2. LINHA DE IMPULSO E CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES NAS FATIAS	34
5 MÉTODO DE JANBU	37
5.1. INTRODUÇÃO	37

5.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO	37
5.3. DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS NO TALUDES_Mv1.....	40
5.3.1. DETERMINAÇÃO DE FS	40
5.3.1.1. Método Simplificado	41
5.3.1.2. Definição da linha de impulso.....	45
5.3.1.3. Método de Janbu generalizado	46
5.3.1.4. Método de Janbu rigoroso.....	55
5.3.2. LINHA DE IMPULSO E CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES NAS FATIAS.....	60
6 CASOS DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	63
6.1. GENERALIDADES	63
6.2. CASO DE ESTUDO 1	63
6.2.1. EXEMPLO 1.1.....	63
6.2.1.1. Método de Spencer	64
6.2.1.2. Método de Janbu	68
6.2.1.3. Comparação com outros métodos	73
6.2.2. EXEMPLO 1.2.....	73
6.2.2.1. Método de Spencer	74
6.2.2.2. Método de Janbu	78
6.2.2.3. Comparação com outros métodos	82
6.2.3. EXEMPLO 1.3.....	83
6.2.3.1. Método de Spencer	83
6.2.3.2. Método de Janbu	86
6.2.3.3. Comparação com outros métodos	90
6.2.4. EXEMPLO 1.4.....	91
6.2.4.1. Método de Spencer	91
6.2.4.2. Método de Janbu	95
6.2.4.3. Comparação com outros métodos	100
6.3. CASO DE ESTUDO 2	100
6.3.1. EXEMPLO 2.1.....	100
6.3.1.1. Método de Janbu	101
6.3.1.2. Comparação com outros métodos	104
6.3.2. EXEMPLO 2.2.....	105
6.3.2.1. Método de Janbu	105
6.3.2.2. Comparação com outros métodos	109
6.3.3. EXEMPLO 2.3.....	109

6.3.3.1. Comparação com outros métodos	112
6.3.4. EXEMPLO 2.4	113
6.4. CASO DE ESTUDO 3	113
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
BIBLIOGRAFIA	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Medida de estabilização de um talude (Gerscovich, 2009)	3
Fig. 2.2 – Escorregamento por rotação (Gerscovich, 2009)	4
Fig. 2.3 – Escorregamento por translação (Gerscovich, 2009)	5
Fig. 2.4 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada (João Silva, 2011)	6
Fig. 2.5 – Diferentes superfícies de deslizamento ao longo do talude (Gerscovich, 2009)	7
Fig. 2.6 – Modelo de comportamento rígido plástico	9
Fig. 3.1 – Divisão de um talude em fatias	11
Fig. 3.2 – Possível divisão de um talude real em fatias (Gomes, 2011)	12
Fig. 3.3 – Forças de interação entre fatias	12
Fig. 3.4 – Fatia genérica	12
Fig. 3.5 – Forças normais e de corte numa fatia genérica	14
Fig. 3.6 – Método de Fellenius – Forças aplicadas a uma fatia de solo	16
Fig. 3.7 – Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo	17
Fig. 3.8 – Método de Janbu (simplificado) – Forças aplicadas a uma fatia de solo	18
Fig. 3.9 – Método de Spencer – Forças aplicadas a uma fatia de solo	19
Fig. 3.10 – Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967)	20
Fig. 3.11 – Método de Morgenstern-Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo	21
Fig. 3.12 – Método de Correia – Forças aplicadas a uma fatia de solo	21
Fig. 3.13 – Método de Janbu – Forças aplicadas a uma fatia de solo	22
Fig. 3.14 – Fator de segurança vs. λ (Krahn, 2003)	24
Fig. 3.15 – Fator de segurança vs. λ para uma superfície mista (Krahn, 2003)	25
Fig. 4.1 – Forças atuantes numa fatia de solo segundo o método de Spencer (1967)	28
Fig. 4.2 – Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967)	30
Fig. 4.3 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Spencer	31
Fig. 4.4 – Forças nas extremidades da primeira e última fatia	34
Fig. 4.5 – Forças numa fatia genérica	35
Fig. 5.1 - Forças atuantes numa fatia de solo segundo o método de Janbu (1954)	37
Fig. 5.2 – Superfície de rotura associada ao método de Janbu (Guedes de Melo, 1993)	38
Fig. 5.3 - Forças numa fatia genérica para o método de Janbu	41
Fig. 5.4 – Variação do fator de segurança com o número de iterações (Li, 1986)	43
Fig. 5.5 – Fatia genérica - definição da linha de impulso	45

Fig. 5.6 – Segmento de reta e pontos genéricos	48
Fig. 5.7 – Interseção de dois segmentos de reta	49
Fig. 5.8 – Segmento de reta – método de Li and White	50
Fig. 5.9 – Interseção de dois segmentos de reta – método de Li and White	51
Fig. 5.10 – Fatia genérica – método de Janbu	53
Fig. 6.1 – Exemplo 1.1	64
Fig. 6.2 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - TALUDES_Mv1)	64
Fig. 6.3 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - Slope)	65
Fig. 6.4 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - Slide)	65
Fig. 6.5 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.1)	66
Fig. 6.6 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.1)	66
Fig. 6.7 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.1)	67
Fig. 6.8 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.1)	67
Fig. 6.9 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.1)	68
Fig. 6.10 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – TALUDES_Mv1)	69
Fig. 6.11 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – Slope)	69
Fig. 6.12 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – Slide)	70
Fig. 6.13 - Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.1)	70
Fig. 6.14 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.1)	71
Fig. 6.15 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.1)	71
Fig. 6.16 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.1)	72
Fig. 6.17 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.1)	72
Fig. 6.18 – Exemplo 1.2	74
Fig. 6.19 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – TALUDES_Mv1)	74
Fig. 6.20 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – Slope)	75
Fig. 6.21 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – Slide)	75
Fig. 6.22 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.2)	76
Fig. 6.23 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.2)	76
Fig. 6.24 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.2)	77
Fig. 6.25 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.2)	77
Fig. 6.26 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.2)	78
Fig. 6.27 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – TALUDES_Mv1)	79
Fig. 6.28 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – Slope)	79

Fig. 6.29 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – Slide).....	79
Fig. 6.30 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.2).....	80
Fig. 6.31 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.2).....	80
Fig. 6.32 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.2).....	81
Fig. 6.33 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.2)	81
Fig. 6.34 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.2)	82
Fig. 6.35 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – TALUDES_Mv1)	83
Fig. 6.36 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – Slope).....	84
Fig. 6.37 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – Slide).....	84
Fig. 6.38 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.3)	84
Fig. 6.39 – Força tangencial na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.3).....	85
Fig. 6.40 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.3)	85
Fig. 6.41 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.3).....	85
Fig. 6.42 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.3)	86
Fig. 6.43 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – TALUDES_Mv1)	87
Fig. 6.44 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – Slope)	87
Fig. 6.45 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – Slide).....	87
Fig. 6.46 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.3)	88
Fig. 6.47 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.3).....	88
Fig. 6.48 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.3)	89
Fig. 6.49 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.3)	89
Fig. 6.50 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.3)	90
Fig. 6.51 – Exemplo 1.4	91
Fig. 6.52 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – TALUDES_Mv1)	92
Fig. 6.53 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – Slope).....	92
Fig. 6.54 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – Slide).....	92
Fig. 6.55 – Tensão normal efetiva na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.4).....	93
Fig. 6.56 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.4)	93
Fig. 6.57 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.4)	94
Fig. 6.58 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.4).....	94
Fig. 6.59 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.4)	95
Fig. 6.60 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – TALUDES_Mv1)	96
Fig. 6.61 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – Slope)	96

Fig. 6.62 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – Slide)	97
Fig. 6.63 – Tensão normal efetiva na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.4)	97
Fig. 6.64 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.4)	98
Fig. 6.65 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.4)	98
Fig. 6.66 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.4)	99
Fig. 6.67 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.4)	99
Fig. 6.68 – Exemplo 2.1	101
Fig. 6.69 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.1 – TALUDES_Mv1)	101
Fig. 6.70 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.1 – Slide)	102
Fig. 6.71 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.1)	102
Fig. 6.72 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.1)	103
Fig. 6.73 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.1)	103
Fig. 6.74 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.1)	104
Fig. 6.75 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.1)	104
Fig. 6.76 – Exemplo 2.2	105
Fig. 6.77 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.2 – TALUDES_Mv1)	106
Fig. 6.78 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.2 – Slide)	106
Fig. 6.79 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.2)	107
Fig. 6.80 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.2)	107
Fig. 6.81 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.2)	108
Fig. 6.82 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.2)	108
Fig. 6.83 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.2)	108
Fig. 6.84 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.3 – TALUDES_Mv1)	110
Fig. 6.85 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.3 – Slide)	110
Fig. 6.86 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.3)	110
Fig. 6.87 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.3)	111
Fig. 6.88 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.3)	111
Fig. 6.89 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.3)	112
Fig. 6.90 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.3)	112
Fig. 6.91 – Exemplo 2.4	113

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação do talude em função de FS.....	6
Quadro 3.1 – Características dos métodos de equilíbrio limite	15
Quadro 5.1 – Quadro síntese – método de Janbu.....	60
Quadro 6.1 – Propriedades do material	63
Quadro 6.2 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.1)	64
Quadro 6.3 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.1)	68
Quadro 6.4 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.1).....	68
Quadro 6.5 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.1).....	73
Quadro 6.6 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.1)	73
Quadro 6.7 – Propriedades dos materiais	73
Quadro 6.8 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.2)	74
Quadro 6.9 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.2)	78
Quadro 6.10 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.2)	78
Quadro 6.11 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.2).....	82
Quadro 6.12 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.2)	82
Quadro 6.13 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.3)	83
Quadro 6.14 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.3)	86
Quadro 6.15 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.3)	86
Quadro 6.16 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.3).....	90
Quadro 6.17 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.3)	90
Quadro 6.18 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.4)	91
Quadro 6.19 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.4)	95
Quadro 6.20 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.4)	95
Quadro 6.21 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.4).....	100
Quadro 6.22 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.4)	100
Quadro 6.23 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.1)	101
Quadro 6.24 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.1)	101
Quadro 6.25 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.1)	104

Quadro 6.26 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.1)	105
Quadro 6.27 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.2)	105
Quadro 6.28 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.2)	105
Quadro 6.29 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.2)	109
Quadro 6.30 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.2)	109
Quadro 6.31 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.3)	109
Quadro 6.32 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.3)	109
Quadro 6.33 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.3)	112
Quadro 6.34 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.3)	113
Quadro 6.35 – Método de Janbu - 7 fatias	114
Quadro 6.36 – Método de Janbu – 20 fatias	115
Quadro 6.37 – Método de Janbu – 50 fatias	116
Quadro 6.38 – Método de Janbu – 100 fatias	117

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b – largura da fatia [m];

c' – coesão [kPa];

c_u – resistência não drenada [kPa];

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

F – forças atuantes (kN/m);

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

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

FS ou F_s – fator de segurança;

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

f_0 – fator corretivo [m];

h – altura da fatia [m];

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

k_h – coeficiente sísmico horizontal;

k_v – coeficiente sísmico vertical;

l – comprimento da base da fatia [m];

M – momentos atuantes (kN.m);

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

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

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

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

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

r – raio de circunferência [m];

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

u – pressão intersticial [kN/m];

W – peso próprio da fatia [kN];

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

x_c, y_c – coordenadas do ponto arbitrário C [m];

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

$X_{m\acute{a}x}$ – força tangencial máxima na interface entre fatias [kN/m];

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

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

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

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

β – inclinação do talude [°];

γ – peso volúmico do solo [kN/m³];

Δf – variação da força de interação;

ΔE – variação da força normal na interface entre fatias;

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

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

λ – fator adimensional de escala;

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

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

ε – deformação do solo;

τ_f – resistência mobilizável [kN/m];

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

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

ϕ – ângulo de atrito do solo [°];

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

MEF – Método dos Elementos Finitos;

1

INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes é um tema com relevante importância na área de geotecnia, por um lado, dada a crescente necessidade de ocupar novos espaços e criar novas infraestruturas resultantes do aumento populacional, por outro, pelos riscos (materiais e humanos) a eles associados no caso de rotura.

Este aumento populacional teve principal relevância no início do século XX, altura na qual se começaram a realizar uma série de estudos que tinham como objetivo o desenvolvimento de métodos que permitissem avaliar a resistência dos taludes, sobretudo no que diz respeito à sua estabilidade. Existem vários exemplos onde este tipo de análise é fundamental: taludes naturais, aterros, estabilização de escarpas, vias de comunicação, barragens de terra, etc.

A maioria dos métodos tem por base a Teoria de Equilíbrio Limite, e ainda hoje são bastante utilizados. A estabilidade de um talude é determinada exclusivamente por considerações de equilíbrio adotando hipóteses de forma a resolver a indeterminação estática associada a cada análise. Com o aparecimento e desenvolvimento dos computadores, a implementação destes métodos tornou-se mais simples, nomeadamente naqueles em que o esforço de cálculo era maior visto recorrerem a formulações matemáticas mais elaboradas. Com os computadores, dada a sua capacidade de cálculo, apareceram no mercado programas comerciais aplicando estes métodos, fundamentados na Teoria de Equilíbrio Limite. Estes programas tornaram possível resolver problemas cada vez mais complexos, quer em termos de geometria e estratigrafia dos taludes, quer pela inclusão de pressões neutras e de modelos de variação das forças de corte.

Mais recentemente, com o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos foi possível uma nova abordagem dos problemas de estabilidade. Com este método tornou-se possível efetuar uma modelação mais realista assim como realizar o cálculo tendo por base as relações tensão-deformação dos materiais, possibilitando especificar a lei de comportamento dos mesmos (linear elástica, não linear, elastoplástica, etc). Embora haja um maior rigor nos resultados obtidos, este tipo de análise exige um maior esforço computacional e a introdução de um maior número de dados, dados esses que por vezes são inexistentes ou de difícil obtenção.

É fundamental para um profissional de engenharia (Duncan,1996), perante estes dois tipos de análise (Teoria de Equilíbrio Limite e Método dos Elementos Finitos), saber a resposta a determinadas questões tais como “quais as diferenças em termos de resultados, entre a aplicação do Método dos Elementos Finitos e a aplicação de métodos baseados na Teoria de Equilíbrio Limite?”, “para que

condições são eles precisos?”, “quais os métodos mais precisos e quais os menos precisos?”, de forma a chegar uma decisão mais ponderada entre esforço de cálculo e fiabilidade nos resultados.

Com este trabalho pretende-se efetuar a comparação de resultados obtidos através de vários métodos baseados na Teoria de Equilíbrio Limite. Para isso, o autor implementou dois novos métodos, Spencer (1967) e Janbu (1954, 1957 e 1973, referido em Siegel, 1975), no programa em Matlab de cálculo de estabilidade de taludes designado por TALUDES_Mv1 (João Silva, 2011), sendo estes dois métodos rigorosos uma vez que garantem todas as condições de equilíbrio.

Este trabalho que se apresenta está estruturado da seguinte forma. Na primeira parte é feita uma revisão geral dos métodos de análises de estabilidade, dando principal realce à Teoria de Equilíbrio Limite, tipos de análise e métodos de cálculo com ela relacionados, assim como vantagens e limitações mais relevantes. De seguida faz-se uma apresentação do método das fatias e dos correspondentes métodos de equilíbrio limite indicando as vantagens e limitações associadas aos mesmos.

Seguidamente serão apresentados os métodos de Spencer e de Janbu, onde será feita uma abordagem teórica sobre os métodos e serão evidenciadas as suas vantagens e limitações e expostas as fases essenciais da implementação dos métodos no programa.

Posteriormente serão comparados os resultados obtidos num exemplo pré-definido, através dos métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 com os fornecidos pelos programas comerciais Slide (da Rocscience) e Slope (da Geo-Slope). Por último serão apresentadas as conclusões resultantes da discussão dos resultados, utilizando as três ferramentas referidas.

2

MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

2.1. GENERALIDADES

A análise de estabilidade de taludes é um assunto vasto e complexo uma vez que envolve grandes massas de terras que têm a si associadas uma grande heterogeneidades e uma longa história de tensões que influenciam e condicionam o seu comportamento.

As análises de estabilidade de taludes podem ter vários objetivos, consoante a origem natural ou artificial do problema analisado (Campos e Matos, 1980). Na natureza, os taludes naturais e as escavações têm um grau de estabilidade superior a 1, pretendendo-se, por isso, avaliar se existe ou não necessidade de aplicar medidas de estabilização para evitar que o grau baixe e se dê o colapso. A figura seguinte mostra um exemplo de um talude onde foi necessário aplicar medidas de estabilização para evitar o colapso.



Fig. 2.1 – Medida de estabilização de um talude (Gerscovich, 2009)

No caso de problemas de origem artificial, como são exemplos os aterros, o objetivo desta análise é encontrar a chamada solução ótima, ou seja, a inclinação adequada para os taludes de forma a que o fator de segurança seja superior a 1, e tendo em conta a segurança e os custos que estão associados a este tipo de obras.

Quando se trata de taludes naturais, este tipo de análise torna-se mais complexa uma vez que, dados os variados tipos de rotura, torna-se difícil encontrar um procedimento que avalie a segurança de uma forma geral (Matos Fernandes, 2006).

Existem vários tipos de movimento, dependendo desse movimento das características do talude. O movimento ocorre quando uma massa de solo/rocha, sob determinadas condições, se desliga da restante e ao perder a sua capacidade de equilíbrio entra em movimento. Varnes (1978) classifica-os em:

- Quedas (associados a rochas);
- Tombamentos (associados a blocos);
- Escorregamentos (associados a massas de solo e/ou rocha);
- Expansão (associados a rochas);
- Fluxos (associados a solos e/ou rochas);
- Complexos (com avalanches ou combinações de vários tipos de movimento);

Neste trabalho apenas serão analisadas instabilidades associadas a movimentos de deslizamento de massas.

Existem dois tipos de deslizamentos de taludes, os escorregamentos por rotação e os escorregamentos por translação. Os escorregamentos por rotação ocorrem sobretudo em solos homogêneos ou com características não muito variáveis, em que a superfície de deslizamento que se desenvolve apresenta uma forma curva ou praticamente circular em muitos casos. Os escorregamentos por translação surgem principalmente quando existe a pouca profundidade e relativamente paralelo à superfície do talude, um estrato mais resistente subjacente à massa instável. A superfície de deslizamento que se desenvolve apresenta uma forma plana ou poligonal.

Poderá ainda existir deslizamentos que são a conjugação dos dois anteriores. Isto acontece quando no interior de um estrato existe uma camada fina de um material mais fraco, caso em que a superfície de deslizamento apresenta uma forma circular nas extremidades e poligonal no contacto com essa camada.

As figuras seguintes mostram casos reais de um escorregamento por rotação (Fig. 2.2) e de um escorregamento por translação (Fig. 2.3).



Fig. 2.2 – Escorregamento por rotação (Gerscovich, 2009)



Fig. 2.3 – Escorregamento por translação (Gerscovich, 2009)

Este tipo de acidentes ocorre devido a vários fatores. Os mais frequentes, e apontados por vários autores na bibliografia existente, são os seguintes:

- Variação do nível freático ao longo do ano;
- Alteração da geometria do talude;
- Deterioração das características mecânicas do solo pela ação dos vários agentes erosivos;
- Ocupação urbana;
- Ocorrência de sismos;

A presença destes fatores resulta num aumento das solicitações atuantes e/ou numa diminuição da resistência do solo de tal forma que poderá levar a casos de instabilidade e consequente ocorrência de deslizamentos.

Quando se efetua uma análise de estabilidade de um talude, deve-se avaliar também qual é a sua resistência máxima, ou seja, qual o aumento de solicitação que suporta antes de se transformar num mecanismo. Tal acontece quando forem ultrapassadas as tensões de corte máximas mobilizáveis pelo solo ao longo de uma superfície (sendo esta definida pela maior ou menor resistência mobilizável entre partículas).

O aumento de solicitação atrás referido é o resultado entre a diferença da resistência mobilizável e a resistência mobilizada, sendo a primeira, a resistência ao corte máxima que aquele solo específico consegue oferecer quando atuado, e a segunda, a resistência que seria necessária “gastar” para equilibrar o conjunto de cargas atuantes.

Assim sendo, o fator de segurança do talude define-se pela equação 2.1, sendo este o parâmetro que permite perceber qual a situação de estabilidade em que o talude se encontra.

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

Nesta equação τ_f é a resistência mobilizável e τ_{mob} a resistência mobilizada.

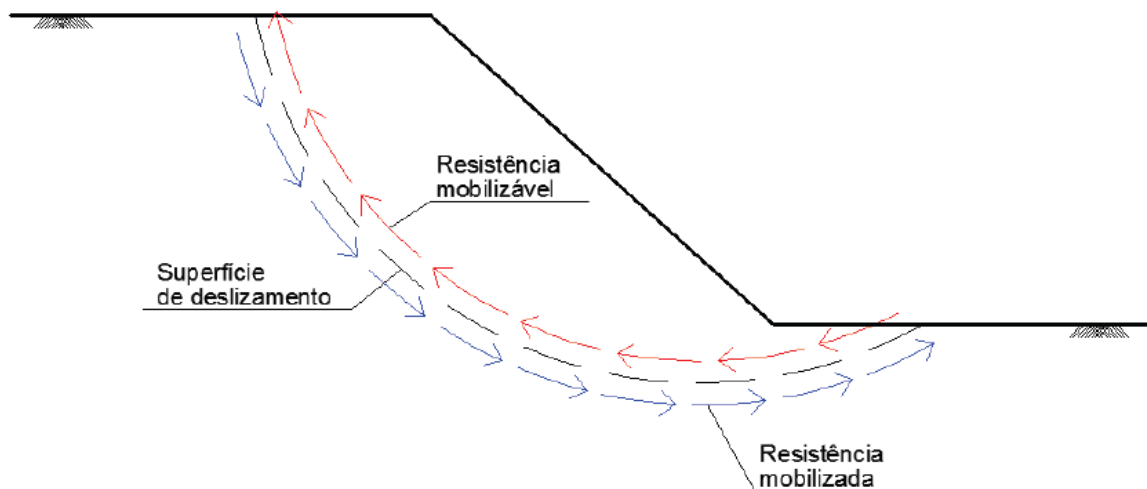


Fig. 2.4 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada (João Silva, 2011)

A figura 2.4 ajuda a perceber o que representa cada uma das grandezas anteriormente descritas: resistência mobilizável, é a força que se opõe ao movimento, resistência mobilizada é a força que dá origem ao movimento. Mais à frente se verá que o cálculo do fator de segurança também pode ser feito via equilíbrio de forças ou de momentos. Contudo a sua definição mantém-se como sendo o valor pelo qual se deve dividir a resistência do maciço para obter a resistência mobilizada (Matos Fernandes, 2006).

Quadro 2.1 – Classificação do talude em função de FS

Fator de Segurança (FS)	Estabilidade Relativa
$FS < 1$	Instável
$FS = 1$	Equilíbrio instável
$1 < FS < 1,5$	Estabilidade incerta
$FS \geq 1,5$	Estável

No quadro 2.1 apresenta-se a classificação do talude de acordo com o valor do fator de segurança obtido. A sua determinação pode ser realizada através dos métodos de equilíbrio limite ou da aplicação do método dos elementos finitos.

2.2. TEORIA DE EQUILÍBRIO LIMITE

A Teoria de Equilíbrio Limite é a base de cálculo dos métodos com esse nome presentes na bibliografia. É utilizada de forma a estimar o equilíbrio de uma massa de solo, cuja rotura ocorre ao longo de uma superfície plana, poligonal, circular ou mista, podendo ocorrer acima ou abaixo do pé do talude.

A massa de solo que se encontra acima da superfície de deslizamento é considerada como sendo um corpo livre, em que todas as partículas que se encontram ao longo da linha de rotura atingiram a

condição de $FS=1$. Assim sendo, admite-se que o fator de segurança é o mesmo em todos os pontos, embora não seja o que realmente ocorre.

A forma da linha de rotura pode variar ao longo da extensão do talude, levando a que o valor do fator de segurança seja diferente de secção para secção (Fig. 2.5).

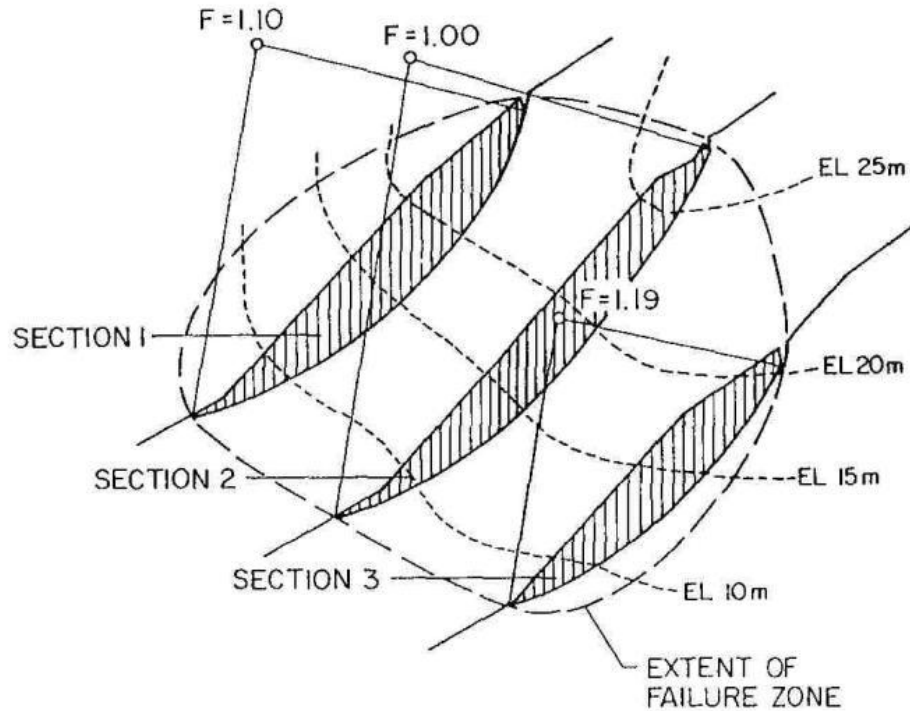


Fig. 2.5 – Diferentes superfícies de deslizamento ao longo do talude (Gerscovich, 2009)

Uma vez que a análise se faz a duas dimensões, admite-se para o estudo a secção mais crítica do talude, que pode ser, por exemplo, a secção de maior altura. Assim sendo os efeitos de confinamento lateral são desprezados. (Gomes, 2011).

O cálculo do fator de segurança pode ser feito de três formas:

- Equilíbrio de forças:

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

- Equilíbrio de momentos:

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

- Equilíbrio limite ao corte:

$$FS = \frac{\int \tau_f}{\tau_{mob}} \quad (2.4)$$

As equações 2.2 e 2.3 podem levar a alguma confusão no que diz respeito à definição das componentes das forças e momentos que se opõem ao movimento e as que contribuem para o mesmo (Aryal, 2006). As componentes das forças e dos momentos são consideradas positivas se tiverem uma ação que contribua para o impedimento do movimento da massa de solo. Porém, essas mesmas componentes por vezes são incluídas com sinal negativo em denominador, por se considerar que determinam uma redução do valor da ação instabilizadora sobre o talude. Estas duas formas de análise podem levar a fatores de segurança diferentes, problema esse que não acontece se for utilizada a equação 2.4, em que o numerador é definido pelo critério de rotura a utilizar. Contudo, e como se verá mais adiante, a maior parte dos métodos de equilíbrio limite definem o FS a partir da equação de equilíbrio de momentos.

A resistência mobilizável (τ_f) é calculada através do critério de rotura de Mohr-Coulomb:

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

onde c' é a coesão, σ' a tensão efetiva e ϕ' o ângulo de atrito. A avaliação da resistência mobilizada (τ_{mob}) é feita pela seguinte equação:

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

Tal como foi referido anteriormente a resistência mobilizada resulta do quociente entre a resistência mobilizável pelo fator de segurança.

As equações anteriores são válidas para uma análise em tensões efetivas. Este tipo de análise pode ser realizado em tensões totais se na equação da resistência mobilizável entrarmos com a resistência não drenada (c_u), desta forma a resistência mobilizável é calculada como sendo:

$$\tau_f = c_u \quad (2.7)$$

A opção entre efetuar uma análise em tensões totais ou em tensões efetivas dependerá sempre daquela que for considerada mais gravosa em termos de instabilidade.

Segundo Gomes (2011) existem vários tipos de análise de estabilidade onde a Teoria de Equilíbrio Limite é aplicada. Essas análises são resolvidas através da aplicação de um dos seguintes métodos:

- Métodos das Cunhas – a massa de solo potencialmente instável, dada a sua configuração e características resistentes, é dividida em cunhas, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada zona isoladamente;
- Método das Fatias – a massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, normalmente verticais, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada fatia isoladamente;
- Método Geral – a toda a massa de solo potencialmente instável, são aplicadas as condições de equilíbrio, cujo comportamento se considera o de um corpo rígido.

Para o presente trabalho interessa o método das fatias, método este que terá uma breve explicação em capítulo próprio, uma vez que os métodos de equilíbrio limite que nos permitem obter os fatores de segurança não são mais que a aplicação do método das fatias com a componente hiperestática resolvida.

Importa salientar também, algumas características e limitações associadas as três métodos referidos (Duncan, 1996). A primeira prende-se com o facto do comportamento do solo ser do tipo rígido plástico (Fig. 2.6).



Fig. 2.6 – Modelo de comportamento rígido plástico

A ruptura dá-se bruscamente sem que antes haja sinais de deformação. Assim sendo, não existe nenhuma informação no que diz respeito às tensões no interior do talude nem quanto às suas variações ao longo da superfície de deslizamento.

Outra questão prende-se com o facto da possibilidade da ocorrência de ruptura progressiva. Não é de todo correto considerar que a ruptura se dê ao mesmo tempo em todos os pontos da superfície de deslizamento. Na realidade, inicia-se em alguns pontos (pontos em que $\tau_{mob} > \tau_f$), e à medida que a deformação vai aumentando, outros pontos vão plastificando atingindo por isso a ruptura. Assim sendo, a ruptura será progressiva e não abrupta, fazendo com que, uma vez mobilizada toda a resistência numa pequena zona da superfície de deslizamento, a mobilizável noutras zonas da mesma superfície será menor que a resistência máxima calculada. Desta forma não há garantias que a máxima força possa ser mobilizada simultaneamente em todos os pontos da superfície.

Assim sendo concluímos que o fator de segurança varia ao longo da superfície de deslizamento, no entanto os métodos assumem-no como sendo constante ao longo de toda a superfície.

Por outro lado, uma vez que a ruptura é progressiva, isto coloca em causa um aspeto comum a todos os métodos, a validade das equações da estática até ao momento que ocorre a ruptura. Uma vez que a ruptura é progressiva, trata-se de um processo dinâmico e não estático, pelo que a aplicação de equações da estática em processos dinâmicos não é de todo correta.

Um último aspeto que importa salientar está relacionado com as simplificações adotadas para a resolução do problema da hiperstaticidade. No caso das variantes do método das fatias, verifica-se que aquelas que apenas satisfazem o equilíbrio de forças (e não de momentos) dão origem a fatores de segurança menos fiáveis do que aquelas que satisfazem as três equações de equilíbrio.

3

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

O método das fatias, tal como já foi referido anteriormente, é utilizado em grande parte das análises de estabilidade de taludes. A sua aplicação reside em arbitrar uma superfície de deslizamento, podendo esta ter uma forma plana, circular, poligonal ou mista, e efetuar o cálculo do equilíbrio da massa de solo através das equações da estática:

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

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

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

A aplicação das expressões acima apresentadas é feita através da divisão do solo acima da linha de rotura em fatias de faces verticais, e analisando o equilíbrio das mesmas.

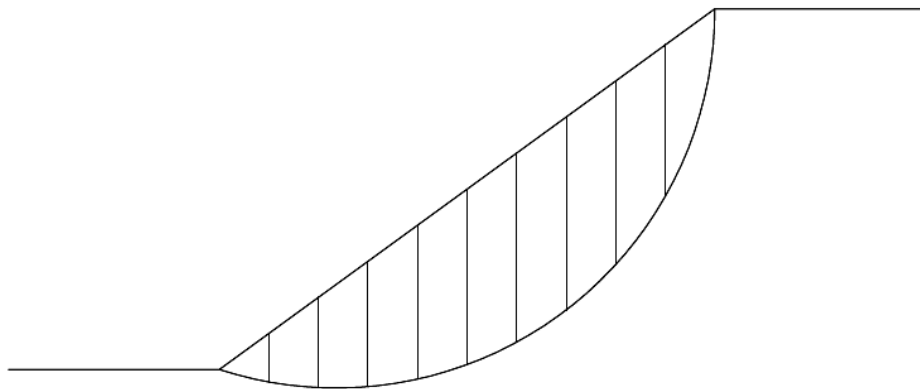


Fig. 3.1 – Divisão de um talude em fatias

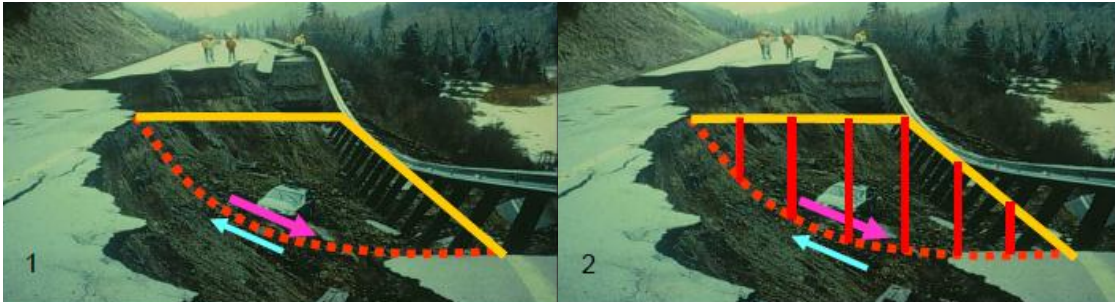


Fig. 3.2 – Possível divisão de um talude real em fatias (Gomes, 2011)

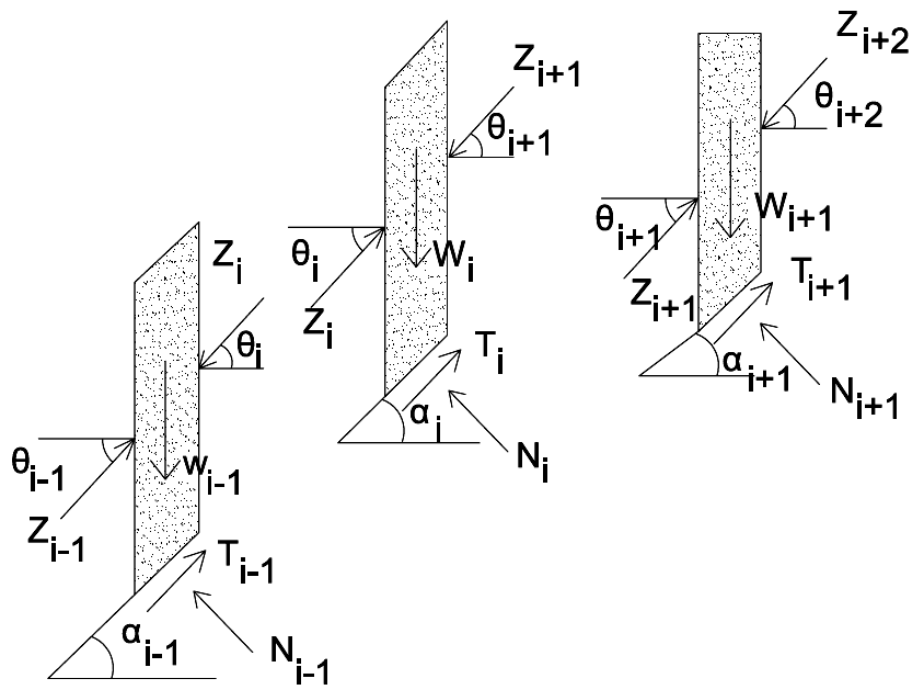


Fig. 3.3 – Forças de interação entre fatias

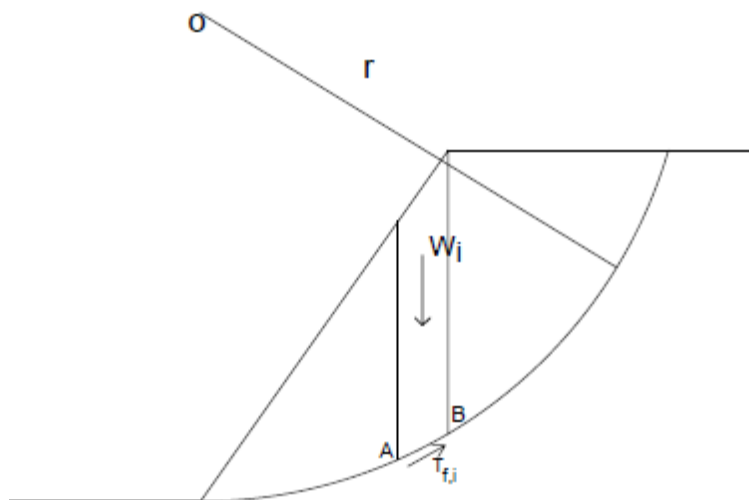


Fig. 3.4 – Fatia genérica

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

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

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

onde M_{est} é o momento das forças estabilizadoras (aquelas que obstam ao movimento da massa de solo), $l_{AB,i}$ o comprimento do segmento de reta AB da base da fatia genérica i e M_{inst} o momento das forças instabilizadoras (aquelas que contribuem para o movimento da massa de solo).

Substituindo na expressão 2.3 o denominador e numerador pelas expressões anteriores, o fator de segurança fica definido por:

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

Tendo em conta a expressão 2.5 ficamos com:

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

Simplificando a expressão anterior pode ser escrita da seguinte forma:

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

Segundo a direção horizontal, o equilíbrio de forças é dado por:

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

em que Z_i são as forças de interação entre fatias, θ_i a inclinação das forças de interação com a horizontal, N_i e α_i são respetivamente a reação normal e a inclinação da base da fatia e T_i é a força tangencial ao nível da base da fatia.

No que diz respeito ao equilíbrio de forças na direção vertical temos:

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

Tal como já foi referido anteriormente, o cálculo do FS também poderia ser feito através da equação de equilíbrio de forças ou pela equação de equilíbrio limite ao corte, porém, a sua determinação através dos diferentes métodos de equilíbrio limite é feita na sua maioria, utilizando a equação de equilíbrio de momentos.

Fellenius foi o primeiro a introduzir um método de análise para uma superfície de deslizamento circular em 1936, método esse a que ficou associado o seu nome, sendo também conhecido como Método Sueco. Outros lhe sucederam como por exemplo, Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Correia (1988), entre outros. De seguida será feita uma pequena

abordagem sobre métodos anteriormente apresentados, fazendo-se num capítulo seguinte uma abordagem mais detalhada sobre os métodos de Janbu e Spencer, uma vez que foram os implementados no programa TALUDES_Mv1.

3.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

3.2.1. DIFERENÇAS ENTRE MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

Tal como é referido em Terzaghi e Peck (1967), a aplicação dos métodos de equilíbrio limite generalizou-se em todos os tipos de obra dada a facilidade de análise de geometrias mais ou menos complexas, sendo possível ainda considerar a presença de pressões neutras e de vários tipos de solos. Contudo importa compreender os diversos métodos de equilíbrio limite e avaliar a consistência de cálculo do fator de segurança, percebendo quais são os mais adequados para o tratamento de certos problemas.

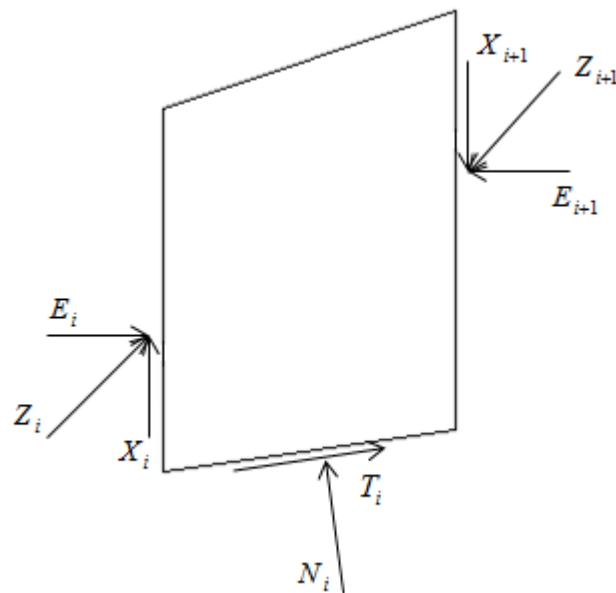


Fig. 3.5 – Forças normais e de corte numa fatia genérica

Na figura anterior são ilustradas as forças normais e de corte que atuam na base e nas faces laterais das fatias, onde X_i e E_i representam respetivamente a força tangencial e normal entre fatias, e N_i e T_i representam a reação normal e de corte na base da fatia respetivamente.

Tal como refere Krahn (2003), as grandes diferenças que se verificam entre métodos estão relacionadas com as equações da estática que são satisfeitas, nas forças entre fatias consideradas para o cálculo (normais e de corte), e na distribuição das forças de interação.

No Quadro 3.1 apresentam-se as características dos principais métodos de equilíbrio limite.

Quadro 3.1 – Características dos métodos de equilíbrio limite

Métodos	Superfície	$\sum F_h = 0$	$\sum F_v = 0$	$\sum M_o = 0$	Força E	Força X	Z
Fellenius	Circular	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não existe
Bishop Simplificado	Qualquer	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal
Janbu Simplificado	Qualquer	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Circular	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável
Correia	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável
Janbu Rigoroso	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Importa salientar que através do número de equações da estática consideradas no cálculo, os métodos são classificados como rigorosos ou não rigorosos sendo esta classificação atribuída tendo em conta se satisfazem ou não as três equações da estática. Desta forma podemos verificar que os primeiros três métodos do Quadro 3.1 são métodos não rigorosos, os restantes quatro são métodos rigorosos. De referir também que o método de Janbu tem uma via simplificada e outra rigorosa como se verá mais à frente.

3.2.1.1. Método de Fellenius

O cálculo do fator de segurança através do Método de Fellenius (apresentado em 1936) é feito através de uma equação linear, não sendo, por isso, necessário qualquer processo iterativo. As forças de interação entre fatias são consideradas como paralelas à base da fatia, permitindo, desta forma, dispensá-las para o cálculo. Porém esta simplificação não é verdadeira, uma vez que, para as forças serem paralelas à base da fatia, não podem ter a mesma inclinação em todas as fatias: quando se muda para a fatia seguinte a inclinação muda (Fredlund, 1977). Assim sendo, o princípio da ação-reação de Newton não é satisfeito. O valor da reação normal na base das fatias (N) pode ser obtido efetuando o equilíbrio de forças segundo a direção perpendicular à base ou através das equações de equilíbrio segundo a direção horizontal e vertical. As forças aplicadas a cada fatia encontram-se indicadas na figura 3.6.

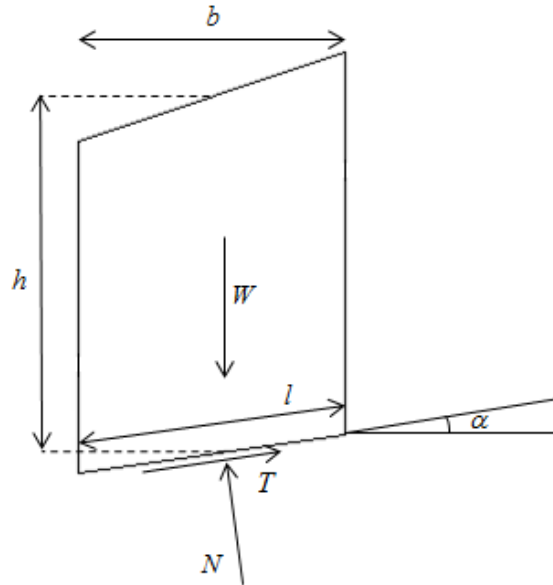


Fig. 3.6 – Método de Fellenius – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O cálculo do fator de segurança é feito através da expressão 3.11.

$$FS = \frac{\sum (c' \times l + (W \cos \alpha - u \times l) \times \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (3.11)$$

3.2.1.2. Método de Bishop

O método de Bishop foi apresentado em 1955 e tinha como intuito inicial a análise de superfícies circulares, embora possa ser aplicado a superfícies não circulares. O cálculo do fator de segurança é feito ignorando as forças de corte entre as fatias, satisfazendo apenas o equilíbrio de momentos. Os bons resultados do fator de segurança fornecidos por este método, desencadearam uma série de estudos com o intuito de efetuar um estudo mais aprofundado sobre o método. Zhu (2008) mostra que o facto de as forças de corte entre fatias não entrar na expressão de cálculo de FS, não quer dizer que estas sejam nulas, mas sim que um dos termos dessa equação seja zero. Isso acontece quando se adota uma distribuição ajustada das forças de corte verticais entre fatias que satisfaça, ao mesmo tempo, o equilíbrio de forças horizontais. Daí resulta a sua precisão quando comparado com outros métodos. A reação normal na base da fatia é obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção vertical.

As forças aplicadas a cada fatia encontram-se ilustradas na seguinte figura.

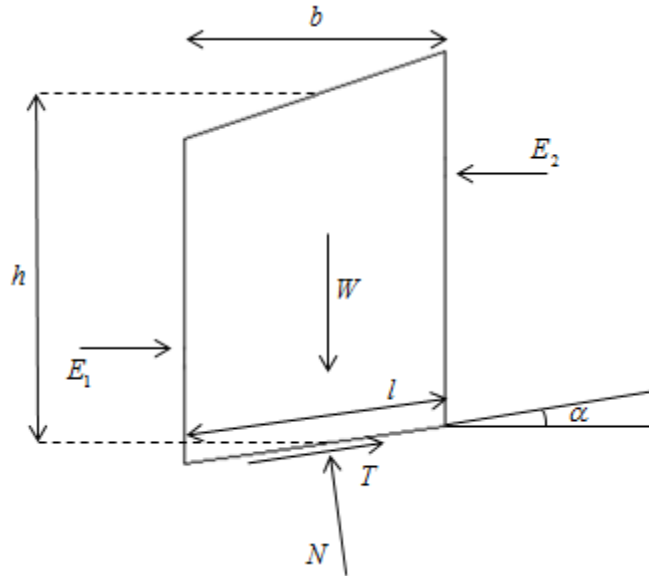


Fig. 3.7 – Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O cálculo do fator de segurança é feito de forma iterativa e é dado pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{\sum \left(c' \times l + \left(\frac{W - u \times b - (c' \times b \times \tan \alpha) / FS}{\cos \alpha + (\tan \phi' \times \sin \alpha) / FS} \right) \times \tan \phi' \right)}{\sum W \sin \alpha} \quad (3.12)$$

3.2.1.3. Método de Janbu (simplificado)

O método de Janbu (simplificado) ignora as forças normais e de corte entre fatias e satisfaz apenas o equilíbrio de forças. Como se verá mais à frente com maior detalhe, existe uma variante deste método que pode ser intitulada como sendo o método de Janbu corrigido. Esta variante introduz um fator corretivo f_o que é multiplicado pelo fator de segurança resultante do equilíbrio de forças. Este fator corretivo existe para ter em conta as forças de interação entre fatias desprezadas pelo método, e depende do tipo de solo que constitui o talude. A reação normal na base da fatia é obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção vertical.

A figura 3.8 mostra as forças aplicadas a cada fatia.

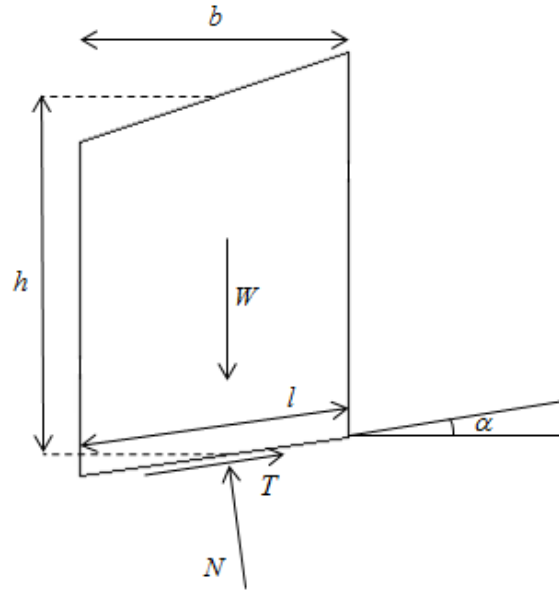


Fig. 3.8 – Método de Janbu (simplificado) – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O valor do fator de segurança é dado através de um processo iterativo aplicando a expressão 3.13.

$$FS = \frac{1}{\sum W \tan \alpha} \times \sum \left[[c' \times b + (W - u \times b) \tan \phi'] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \times \tan \phi'}{FS}} \right] \quad (3.13)$$

3.2.1.4. Método de Spencer

O método de Spencer, apresentado em 1967, é considerado como sendo um método rigoroso uma vez que satisfaz todas as equações de equilíbrio (forças e momentos).

Neste método as forças de interação entre fatias (X e E) são substituídas por uma resultante estaticamente equivalente, Q , atuante no ponto médio da base da respectiva fatia (figura 3.9).

A resultante Q resulta da manipulação das equações de equilíbrio e tem a seguinte forma:

$$Q = \frac{\frac{c' \times l}{FS} + \frac{(W \cos \alpha - u \times l) \tan \phi'}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \times \left(1 + \frac{\tan \phi' \times \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right)} \quad (3.14)$$

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

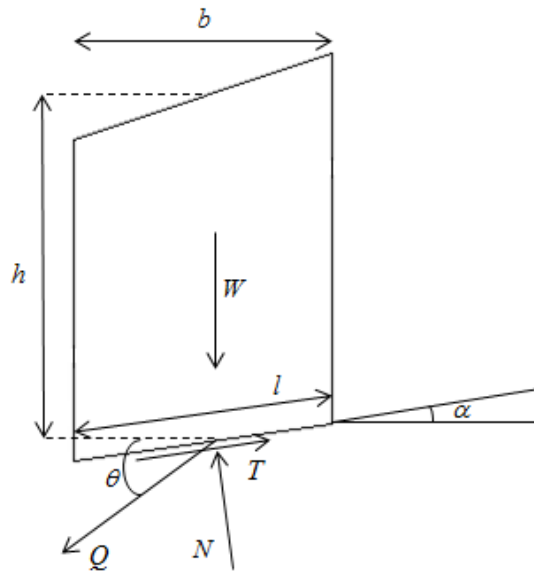


Fig. 3.9 – Método de Spencer – Forças aplicadas a uma fatia de solo

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 interação relativamente a esse centro de rotação, isto é:

$$\sum (Q \times r \times \cos(\alpha - \theta)) = 0 \quad (3.15)$$

onde r é o raio da superfície de deslizamento.

Tomando como hipóteses, raio constante; forças exteriores ao talude em equilíbrio, logo soma vetorial das forças de interação nula; e resultantes das forças de interação paralelas, logo θ_i sempre constante, tem-se:

$$\sum Q = 0 \quad (3.16)$$

Desta forma a solução final é obtida arbitrando vários valores de θ e para cada um determinando o FS para o equilíbrio de forças (FS_f) e equilíbrio de momentos (FS_m). Com os valores obtidos traça-se as curvas FS_f e FS_m com θ e onde se der a interseção corresponde ao valor de FS.

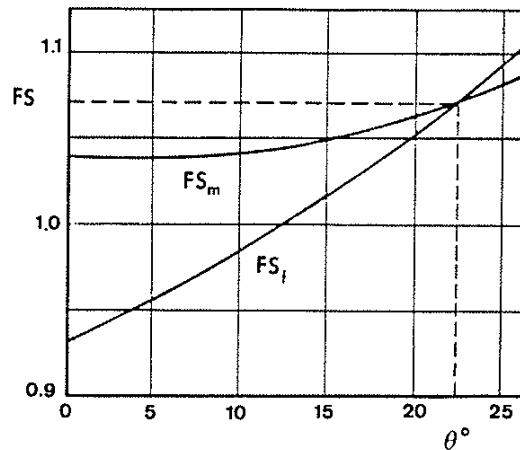


Fig. 3.10 – Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967)

Este método será analisado com maior detalhe no capítulo 4.

3.2.1.5. Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price foi apresentado em 1965 e cumpre todas as condições de equilíbrio, pertencendo por isso ao grupo dos métodos rigorosos. A aplicação do método recorre a equações diferenciais que governam o equilíbrio de momentos (equação 3.17) e o equilíbrio de forças numa fatia (equação 3.18).

$$(y'_1 - y_1) \frac{dE}{b} + E_1 \frac{dy'}{b} - X_1 = 0 \quad (3.17)$$

$$\frac{c'}{FS} [1 + \tan^2 \alpha] + \frac{\tan \phi'}{FS} \left[\frac{dW}{b} + \frac{dX}{b} - \frac{dE}{b} \tan \alpha - u \times (1 + \tan^2 \alpha) \right] = \frac{dE}{b} + \frac{dX}{b} \tan \alpha + \frac{dW}{b} \tan \alpha \quad (3.18)$$

Estas contêm contudo três incógnitas, as forças de interação entre fatias (X e E) e a posição da linha de pressão (y'). O problema é, pois, estaticamente indeterminado.

De forma a tornar o problema estaticamente determinado, Morgenstern e Price consideraram uma função arbitrária que descreve a variação da relação entre X e E e um fator de escala λ .

$$X = \lambda \times f(x) \times E \quad (3.19)$$

Para se chegar ao valor do fator de segurança e de λ procede-se à integração das equações diferenciais 3.17 e 3.18 e efetua-se um processo iterativo através do método de Newton-Raphson.

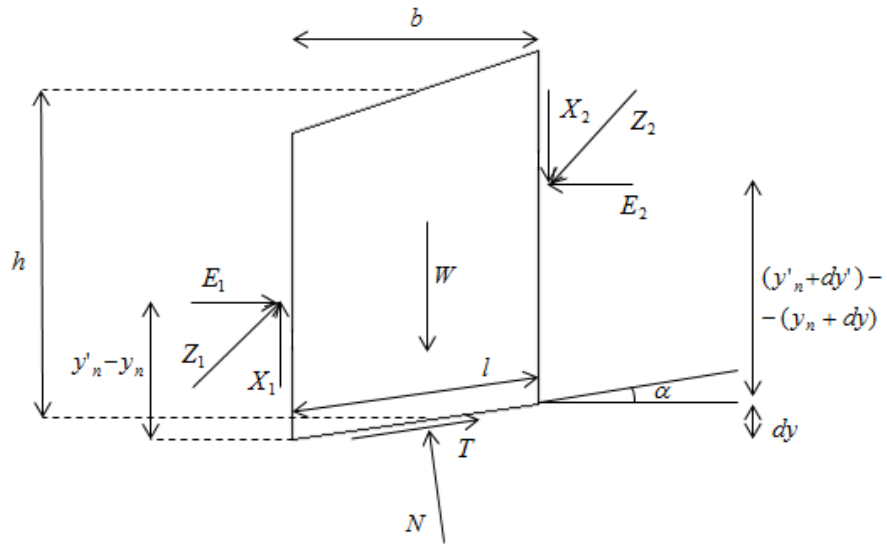


Fig. 3.11 – Método de Morgenstern-Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo

3.2.1.6. Método de Correia

O método de Correia é um método de equilíbrio limite apresentado em 1988 aplicável a superfícies de escorregamento de qualquer forma. Tal como o método anterior, recorre a uma função $f(x)$ para assegurar o cumprimento de todas as condições de equilíbrio,

$$X = X_{\max} \times f(x) \quad (3.20)$$

onde $f(x)$ é uma função análoga à utilizada no método de Morgenstern-Price e $X_{\max}$ é um parâmetro de escala.

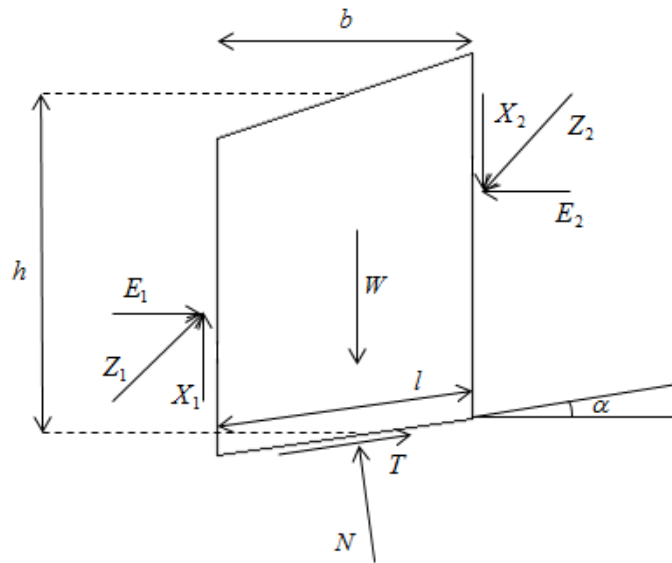


Fig. 3.12 – Método de Correia – Forças aplicadas a uma fatia de solo

Este método tem uma vantagem em relação a todos os outros métodos ditos rigorosos por ser o único em que o cálculo do fator de segurança é feito através de uma única equação não linear:

$$\Psi(FS) = A_1 \times A_4 - A_2 \times A_3 = 0 \quad (3.21)$$

onde A_1 , A_2 , A_3 e A_4 são funções de f .

A sua dedução parte do equilíbrio de forças na direção horizontal e vertical e de uma equação de momentos em torno de um ponto arbitrário. A resolução da equação não linear é feita através do método de Newton-Raphson.

3.2.1.7. Método de Janbu

O método de Janbu na sua forma rigorosa foi apresentado em 1954. Tal como o método de Spencer será exposto detalhadamente no capítulo 4. Este método permite fazer a análise de estabilidade de um talude admitindo superfícies de rotura com qualquer forma. O procedimento baseia-se em equações diferenciais, as quais comandam o equilíbrio de forças e momentos da massa acima da superfície adotada.

O equilíbrio de momentos é considerado em relação ao ponto médio da base de cada fatia, tornando desde logo as contribuições do peso (dW), e força normal (dN) nulas uma vez que atuam nesse mesmo ponto.

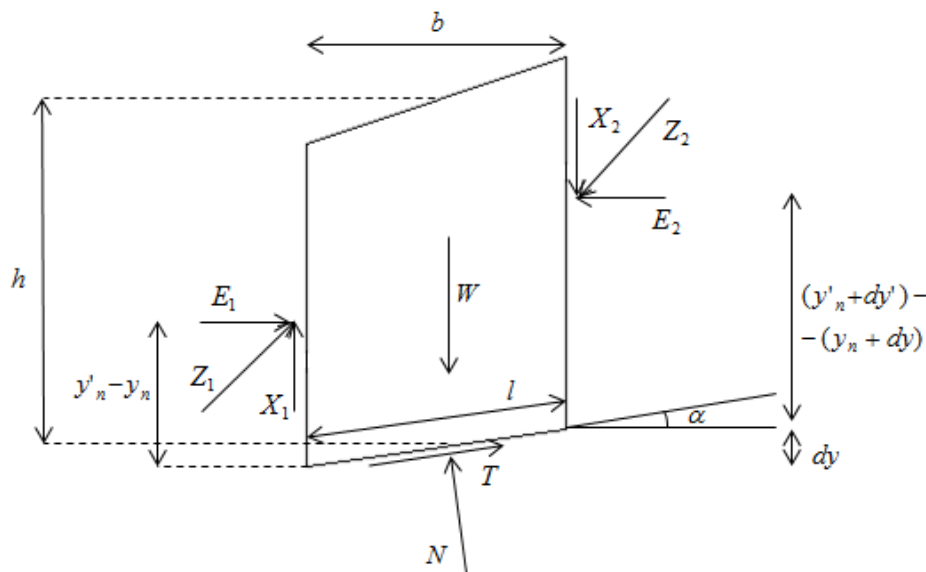


Fig. 3.13 – Método de Janbu – Forças aplicadas a uma fatia de solo

O valor do fator de segurança resulta da aplicação da seguinte expressão:

$$FS = \frac{1}{E_0 - E_n + \sum [W + (X_{n+1} - X_n)] \tan \alpha} \times \sum \left[\frac{[c' \times b + (W + (X_{n+1} - X_n) - u \times b) \tan \phi'] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{FS}}}{FS} \right] \quad (3.22)$$

3.2.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS

A comparação dos resultados obtidos para um problema de estabilidade de taludes obtidos pelos diferentes métodos de equilíbrio limite, pode ser efetuada através da análise de um método que foi desenvolvido por Fredlund na Universidade de Saskatchewan: o Método de Equilíbrio Limite Generalizado (Krahn, 2003).

Este método tem a vantagem de incorporar todas as hipóteses adotadas pelos restantes métodos, selecionando para cada caso apenas as que interessam, incluindo as considerações relativas à distribuição das forças de interação entre fatias. Desta forma este método permite obter os mesmos fatores de segurança de Bishop, Janbu, Morgenstern-Price e Spencer quando aplicados individualmente ao mesmo caso de estudo.

3.2.2.1. Breve apresentação do Método de Equilíbrio Generalizado (GLE)

O Método de Equilíbrio Generalizado é uma extensão dos métodos de Spencer e de Morgenstern-Price uma vez que também recorre a uma função arbitrária $f(x)$ para determinar as forças de interação entre fatias e a estimativa do FS é feita através do cálculo de dois fatores de segurança, um resulta do equilíbrio de forças (FS_f) e outro resulta do equilíbrio de momentos (FS_m).

$$FS_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta)R \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (3.23)$$

$$FS_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf \pm Dd} \quad (3.24)$$

onde β , R , x , f e d são parâmetros geométricos e D a linha de impulso (linha que contem os pontos laterais onde estão aplicadas as forças de interação entre fatias ao longo do talude). A variável N define a força normal na base da fatia e é obtida pela expressão 3.25.

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha \tan \phi'}{(FS_f \text{ ou } FS_m)}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{(FS_f \text{ ou } FS_m)}} \quad (3.25)$$

Uma vez que no cálculo do N é utilizado o FS_f ou o FS_m , este dependerá do tipo de análise a efetuar e passará a utilizar as expressões 3.23 e 3.24. Um aspeto relevante neste método tem a ver com a dependência que o fator N tem com as forças de interação entre fatias, desta forma esta força terá um valor diferente para os vários métodos dependendo da forma como estes abordam as forças de interação (Krahn, 2003).

A comparação de resultados é feita através do traçado de um gráfico, para uma geometria e função de interação definidas previamente, em que as abcissas correspondem aos valores de λ e as ordenadas correspondem aos valores de FS. Nos métodos de Bishop e de Janbu as forças tangenciais entre fatias não são consideradas ($\lambda = 0$), por outro lado o primeiro apenas satisfaz o equilíbrio de momentos e o segundo o equilíbrio de forças. Os fatores de segurança associados aos dois métodos apresentam-se de seguida representados na figura 3.14.

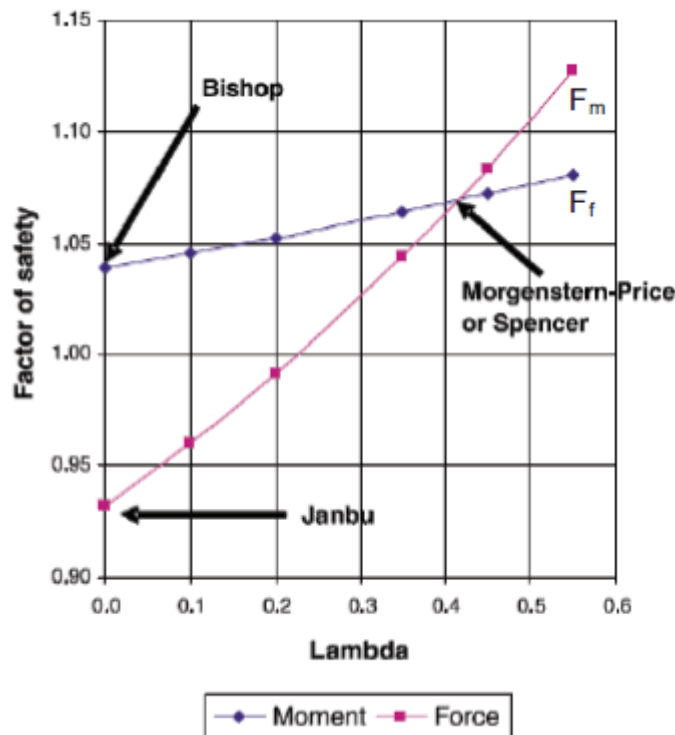


Fig. 3.14 – Fator de segurança vs. λ (Krahn, 2003)

Uma vez que os métodos de Morgenstern-Price e Spencer cumprem todas as equações de equilíbrio, o fator de segurança a que chegam corresponde à ordenada do ponto de interseção das duas retas. O

fator de segurança será o de um ou de outro método mediante a função adotada para traduzir o comportamento das forças de interação.

3.2.2.2. Apresentação dos resultados obtidos pelo GLE

Embora os métodos de Bishop e Janbu (simplificado) não verifiquem o equilíbrio conjunto de forças e de momentos, os resultados que fornecem de FS têm uma precisão aceitável. O GLE mostra que, caso a superfície de deslizamento seja circular, o equilíbrio de momentos é independente das forças de corte entre fatias, mas no caso do equilíbrio de forças isso já não se verifica. No caso de superfícies de rotura planas (tipo cunhas) acontece o contrário, ou seja, o equilíbrio de momentos depende das forças de corte entre fatias e o equilíbrio de forças é independente daquelas. Assim sendo, uma vez que o método de Bishop apenas verifica o equilíbrio de momentos, fornece valores bastante aceitáveis para casos de superfícies deslizamento circulares, sendo por isso recomendado para análise de superfícies de deslizamento desse tipo. Por outro lado, o método de Janbu apenas verifica o equilíbrio de forças sendo por isso aconselhado para análise de superfícies de deslizamento planares.

Para superfícies mistas, o GLE mostra que ambas as equações de equilíbrio estático dependem das forças de corte entre fatias. O traçado das curvas em função de λ para os dois tipos de FS apresentados anteriormente é ilustrado na figura 3.15.

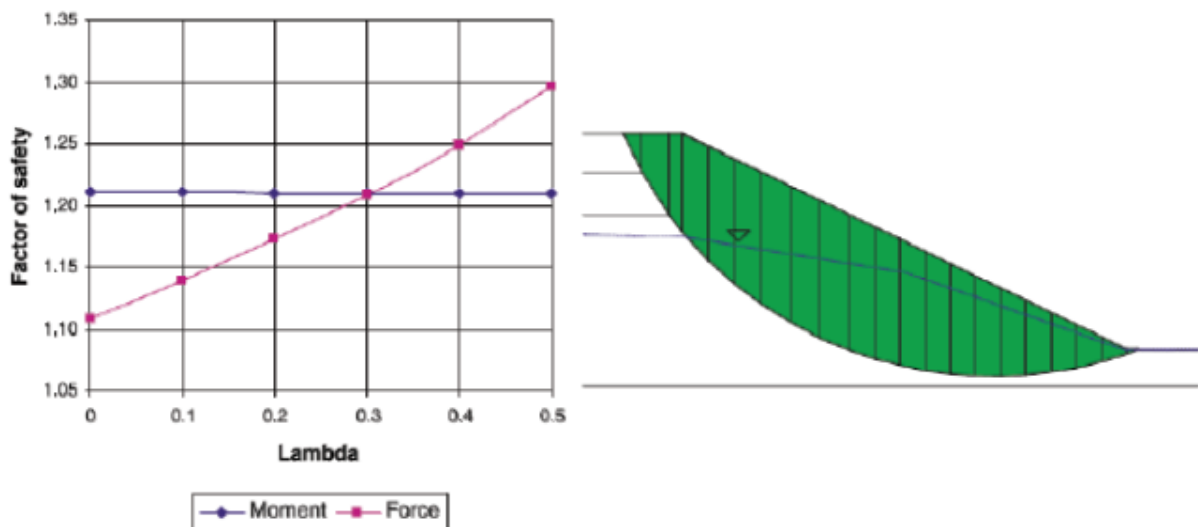


Fig. 3.15 – Fator de segurança vs. λ para uma superfície mista (Krahn, 2003)

Constata-se que o valor do fator de segurança diminui com o valor de λ . Da análise do gráfico podemos concluir que, ao efetuar uma análise para este tipo de superfícies com o método de Bishop, este pode levar a que se chegue a fatores de segurança sobrestimados, por outro lado utilizando o método de Janbu (simplificado) conduz a resultados muito afastados da realidade, embora do lado da segurança. Já quando se utilizam métodos rigorosos, como é o caso dos métodos de Correia, Morgenstern-Price e Spencer, levam a valores intermédios que parecem ser mais fiáveis.

Para casos em que haja cargas concentradas, ancoragens ou muros de suporte, constata-se que os dois fatores de segurança são muito sensíveis à variação das forças de interação pelo que não devem ser tidos em consideração em análises deste género.

A função de interação adotada pode ter influência nos resultados para caso de taludes com diferentes estratos. Constatou-se que as curvas de FS_f e FS_m andam bastante próximas uma da outra para qualquer função, porém a interseção das duas curvas pode dar-se para ordenadas bastante diferentes consoante a distribuição da função, levando a que o fator de segurança tome valores bastante distintos.

Segundo Duncan (1996), a diferença máxima entre fatores de segurança calculados por métodos rigorosos é de cerca de 12% e geralmente menos, concluindo-se por isso que da sua utilização se obtém uma boa resposta para o problema da estabilidade de taludes. Contudo a precisão dos resultados depende em boa parte da precisão dos parâmetros introduzidos no cálculo: geometria, pesos volúmicos, pressões neutras, etc.

4 MÉTODO DE SPENCER

4.1. INTRODUÇÃO

No âmbito deste trabalho, implementou-se no programa TALUDES_Mv1 dois novos métodos rigorosos de cálculo, o método de Spencer e o método de Janbu que são objeto deste capítulo e do seguinte. O programa TALUDES_Mv1 trata-se de um programa de análise de estabilidade de taludes que tem vindo a ser desenvolvido ao longo dos anos no âmbito da dissertação em Geotecnia.

O método de Spencer foi desenvolvido para análise de superfícies de rotura de forma circular. É um método que cumpre todas as condições de equilíbrio e de fronteira daí ser considerado como um método rigoroso. Os resultados obtidos por este método são bastante satisfatórios e é um método bastante estável em termos de resolução numérica.

De forma a tornar a utilização do método prática e expedita este foi automatizado com a sua inclusão num programa de cálculo.

4.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método de Spencer foi desenvolvido para analisar superfícies de rotura de forma circular. Começa por substituir em cada fatia as forças de interação por uma resultante estaticamente equivalente Q inclinada de um ângulo θ com a horizontal. Supondo a componente sísmica nula, e satisfazendo o equilíbrio de momentos, a força Q deve passar pelo ponto de interseção das forças W , T e N ou seja, pelo ponto médio da base da fatia.

A figura 4.1 ilustra as hipóteses de Spencer para uma dada fatia genérica (com $U = u \times b \times \sec \alpha$).

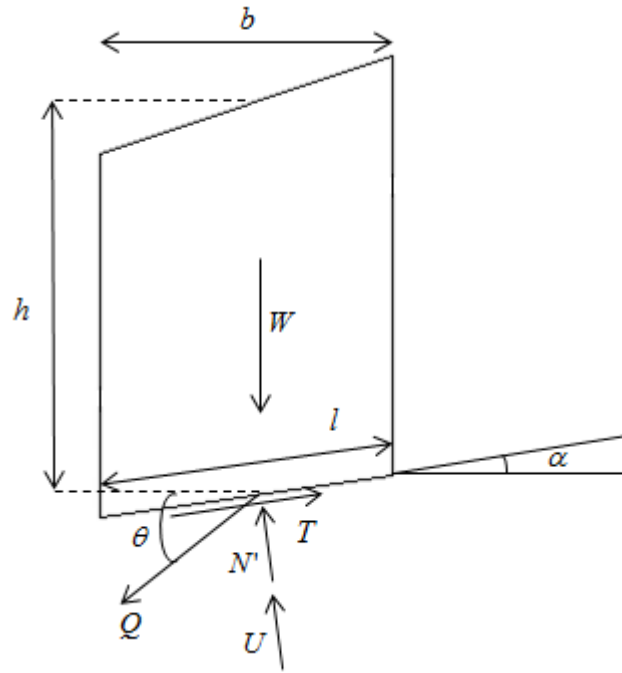


Fig. 4.1 – Forças atuantes numa fatia de solo segundo o método de Spencer (1967)

Impondo o equilíbrio de forças nas direções normal e paralela à base de cada fatia chegamos, respetivamente, às seguintes equações:

$$N' + U - W \cos \alpha + Q \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.1)$$

$$T - W \sin \alpha - Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.2)$$

Considerando o critério de rotura de Mohr-Coulomb (equação 4.3), substituindo na expressão 4.2 chegamos à expressão 4.4.

$$T = \frac{c' b \sec \alpha + N' \tan \phi'}{FS} \quad (4.3)$$

$$\frac{c' b \sec \alpha + N' \tan \phi'}{FS} - W \sin \alpha - Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.4)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem a N' temos:

$$N' = \frac{FS}{\tan \phi'} \left(W \sin \alpha + Q \cos(\alpha - \theta) - \frac{c' b \sec \alpha}{FS} \right) \quad (4.5)$$

Substituindo N' na equação de equilíbrio de forças em relação à direção normal à base (equação 4.1) ficamos com:

$$\frac{FS}{\tan \phi'} \left(W \sin \alpha + Q \cos(\alpha - \theta) - \frac{c'b \sec \alpha}{FS} \right) + U - W \cos \alpha + Q \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.6)$$

Resolvendo esta expressão em ordem a Q , tem-se que a resultante Q pode ser obtida como:

$$Q = \frac{\frac{c'b \sec \alpha}{FS} + \frac{(W \cos \alpha - U) \tan \phi'}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \times \left(1 + \frac{\tan \phi' \times \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right)} \quad (4.7)$$

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

$$\sum Qr \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.8)$$

onde r é o raio da superfície de deslizamento. Uma vez que r é constante, tem-se que:

$$\sum Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (4.9)$$

Da mesma forma, se as forças exteriores ao talude estão em equilíbrio, a soma vetorial das forças de interação das fatias deve ser nula, isto é:

$$\sum Q \cos \theta = 0 \quad (4.10)$$

$$\sum Q \sin \theta = 0 \quad (4.11)$$

Considerando que as resultantes das forças de interação entre fatias são paralelas, θ_i é sempre constante ao longo do talude, pelo que as duas equações acima indicadas se transformam em:

$$\sum Q = 0 \quad (4.12)$$

A solução final pode então ser obtida do seguinte modo. Escolhidos vários valores de θ calcula-se, para cada um, o valor de FS que satisfaz as equações de equilíbrio das forças de interação e dos momentos por elas provocados (equações 4.9 e 4.12). Os valores de FS que satisfazem a equação das forças designam-se por FS_f e os que satisfazem a dos momentos por FS_m . Traçando as curvas de variação de FS_f e FS_m com θ , o ponto de interseção das duas curvas corresponde ao fator de segurança e inclinação que satisfazem as duas equações, sendo por isso esse, o valor do fator de segurança correspondente ao talude em estudo (Fig. 4.2).

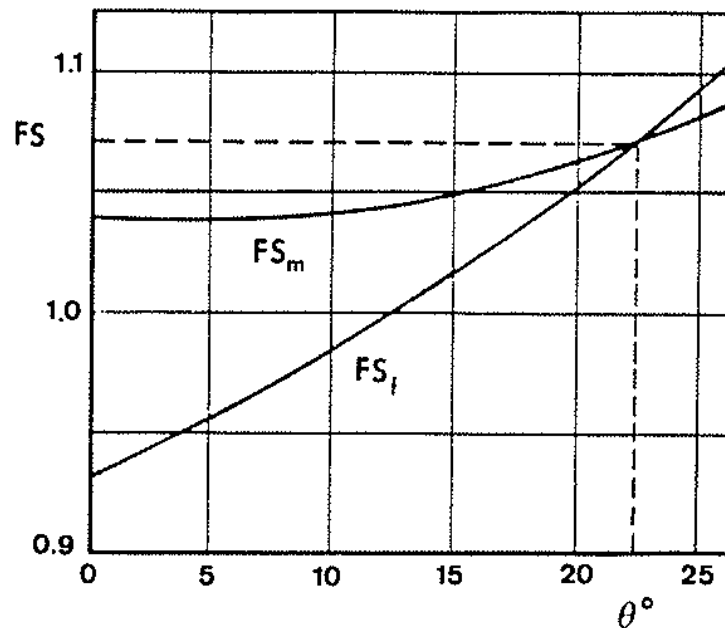


Fig. 4.2 – Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967)

As resultantes das forças de interação para as várias fatias (forças Q), determinam-se introduzindo na equação 4.7 os valores obtidos para FS e θ . De modo a determinar as forças de interação entre fatias, X e E , inicia-se o cálculo do equilíbrio de forças a partir da primeira fatia. Calculando os momentos em relação ao ponto médio da base de cada fatia e iniciando também o cálculo a partir da fatia inicial, é possível determinar os pontos de aplicação dessas forças de interação.

4.3. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO IMPLEMENTADO NO TALUDES_Mv1

O algoritmo introduzido no programa é o que foi descrito sumariamente até esta parte e foi apresentado por Spencer em 1967. É relativamente simples e além disso conduz a resultados satisfatórios e de uma forma eficiente.

4.3.1. DETERMINAÇÃO DE FS

Como já foi referido, o valor de FS resulta da interseção das curvas de variação de FS_f e FS_m com θ . Para tal, foi necessário introduzir um algoritmo no programa de forma a calcular os vários valores

de FS_f e FS_m , e introduzir um critério de paragem quando atingido um valor que cumpra uma dada tolerância.

As forças consideradas na formulação do algoritmo encontram-se representadas na seguinte figura:

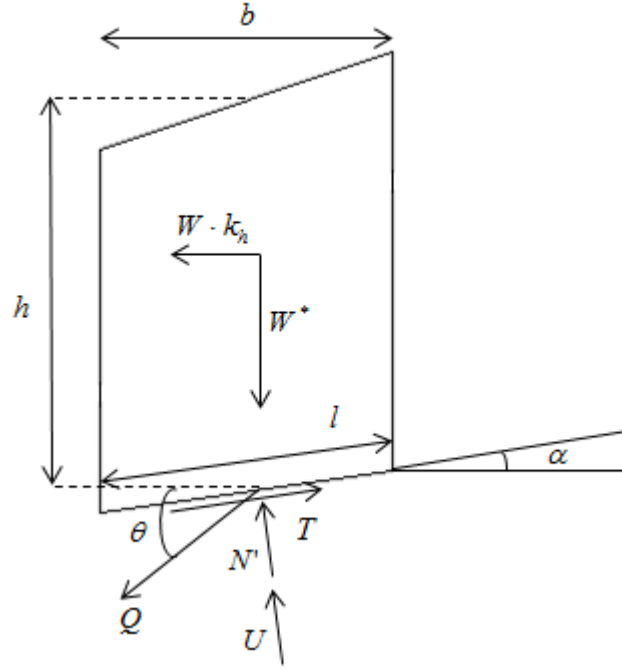


Fig. 4.3 – Forças numa fatia genérica para o algoritmo de Spencer

De salientar que o peso da fatia, W , é multiplicado pelos coeficientes k_h e $(1 + k_v)$ relativos à ação sísmica sendo representados por $W \cdot k_h$ e W^* respetivamente. Considerando esta, e tendo em conta o procedimento anteriormente descrito para se obter a expressão para o cálculo da força Q , tem-se:

$$Q = \frac{\frac{c' b \sec \alpha}{FS} + \frac{(W^* \cos \alpha - W \cdot k_h \sin \alpha - U) \tan \phi'}{FS} - W^* \sin \alpha - W \cdot k_h \cos \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \times \left(1 + \frac{\tan \phi' \times \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right)} \quad (4.13)$$

Para a obtenção dos valores de FS_f e FS_m , aplicou-se o método de Newton-Raphson. Este método permite acelerar o processo de convergência fazendo com que se chegue mais rapidamente à raiz da função. Para o arranque do processo tomou-se $FS_f = FS_m = 1$ e $\theta = 0$.

O algoritmo começa com o cálculo de FS_f . Para tal, partindo da condição expressa em 4.12, multiplicou-se o numerador e o denominador por FS de forma a efetuar uma simplificação da

expressão. De salientar que os valores de FS expressos nesta condição são os de FS_f , podendo ser escrita da seguinte forma:

$$\sum \left(\frac{c' b \sec \alpha + (W^* \cos \alpha - W \cdot k_h \sin \alpha - U) \tan \phi' + FS_f (-W^* \sin \alpha - W \cdot k_h \cos \alpha)}{FS_f \cos(\alpha - \theta) + \tan \phi' \sin(\alpha - \theta)} \right) = 0 \quad (4.14)$$

De modo a facilitar o cálculo e a escrita do algoritmo considerou-se as seguintes constantes:

$$A1 = c' b \sec \alpha + (W^* \cos \alpha - W \cdot k_h \sin \alpha - U) \tan \phi' \quad (4.15)$$

$$A2 = -W^* \cos \alpha - W \cdot k_h \sin \alpha - U \quad (4.16)$$

$$A3 = \cos(\alpha - \theta) \quad (4.17)$$

$$A4 = \tan \phi' \sin(\alpha - \theta) \quad (4.18)$$

Desta forma a expressão 4.14 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum \left(\frac{A1 + FS_f \cdot A2}{FS_f \cdot A3 + A4} \right) = 0 \quad (4.19)$$

Posto isto, considera-se que o somatório anterior expresso por uma função $Q(FS_f)$ em que:

$$Q(FS_f) = \sum Q = 0 \quad (4.20)$$

Para a aplicação do método de Newton-Raphson, é necessário calcular a derivada da função $Q(FS_f)$, dada por:

$$Q'(FS_f) = \sum \left(\frac{A2 \cdot A4 - A1 \cdot A3}{(FS_f \cdot A3 + A4)^2} \right) \quad (4.21)$$

O algoritmo começa por partir de um valor unitário para o FS_f e zero para θ e calcula as funções $Q(FS_f)$ e $Q'(FS_f)$.

Após isto, efetua-se um ciclo, aplicando o método de Newton-Raphson, para se obter um novo valor de FS_f .

$$FS_{f,i+1} = FS_{f,i} + \Delta FS_{f,i} \quad (4.22)$$

Onde $\Delta FS_{f,i}$ é dado por:

$$\Delta FS_{f,i} = \left(- \frac{Q(FS_{f,i})}{Q'(FS_{f,i})} \right) \quad (4.23)$$

Com o novo valor de FS_f , calcula-se novamente $Q(FS_f)$ e $Q'(FS_f)$ e volta-se a correr o ciclo. O ciclo termina quando o valor absoluto de ΔFS_f ou de $Q(FS_f)$ atingem um valor inferior a uma tolerância, tolerância essa que se considerou de $1,0 \times 10^{-5}$. O FS_f final será o valor obtido da expressão 4.22 ao se ter atingido um dos critérios de paragem.

De seguida efetuou-se um procedimento idêntico para determinar FS_m . Neste caso, a condição a seguir é a expressa em 4.9 que se pode escrever:

$$\sum \left(\frac{c' b \sec \alpha + (W^* \cos \alpha - W \cdot k_h \sin \alpha - U) \tan \phi' + FS_m (-W^* \sin \alpha - W \cdot k_h \cos \alpha)}{FS_m + \tan \phi' \tan(\alpha - \theta)} \right) = 0 \quad (4.24)$$

Desta forma podemos escrever as funções $Q(FS_m)$ e $Q'(FS_m)$ como sendo:

$$Q(FS_m) = \sum \left(\frac{B1 + FS_f \cdot B2}{FS_m + B4} + W \cdot k_h \times \frac{h}{2r} \right) \quad (4.25)$$

$$Q'(FS_m) = \sum \left(\frac{B2 \cdot B4 - B1}{(FS_m + B4)^2} \right) \quad (4.26)$$

onde $B1$ e $B2$ coincidem com $A1$ e $A2$ dados pelas expressões 4.15 e 4.16 e $B4$ é dado por:

$$B4 = \tan \phi' \tan(\alpha - \theta) \quad (4.27)$$

Uma vez que se está a considerar as parcelas da ação sísmica, é necessário acrescentar na função $Q(FS_m)$ o seu contributo. Na função $Q'(FS_m)$ essa parcela desaparece uma vez que não depende de FS_m .

Os processos de cálculo seguintes para a obtenção de FS_m são equivalentes aos utilizados para o cálculo de FS_f .

Obtidos os valores de FS_f e de FS_m , calcula-se o ΔFS como:

$$\Delta FS = FS_m - FS_f \quad (4.28)$$

De seguida atribui-se um novo valor a θ e volta-se a fazer uma nova corrida. O novo valor de θ é obtido, no caso da primeira iteração, adicionando um $\Delta\theta$ previamente estipulado com o valor de um grau. A partir da segunda aplica-se uma versão aproximada do método de Newton-Raphson de forma a acelerar o processo de convergência, passando o $\Delta\theta$ a ser calculado por:

$$\Delta\theta_i = - \frac{\Delta FS_i}{\frac{\Delta FS_i - \Delta FS_{i-1}}{\Delta\theta_{i-1}}} \quad (4.29)$$

O processo termina quando o módulo de ΔFS atinge um valor inferior a uma tolerância fixada em $1,0 \times 10^{-9}$, o que significa que os valores de FS_f e FS_m são praticamente idênticos podendo qualquer um deles ser considerado a solução do problema.

4.3.2. LINHA DE IMPULSO E CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES NAS FATIAS

A determinação da linha de impulso e das forças atuantes nas fatias é feita partindo dos pontos extremos do maciço deslizante, uma vez que, nestes pontos as forças de interação são conhecidas.

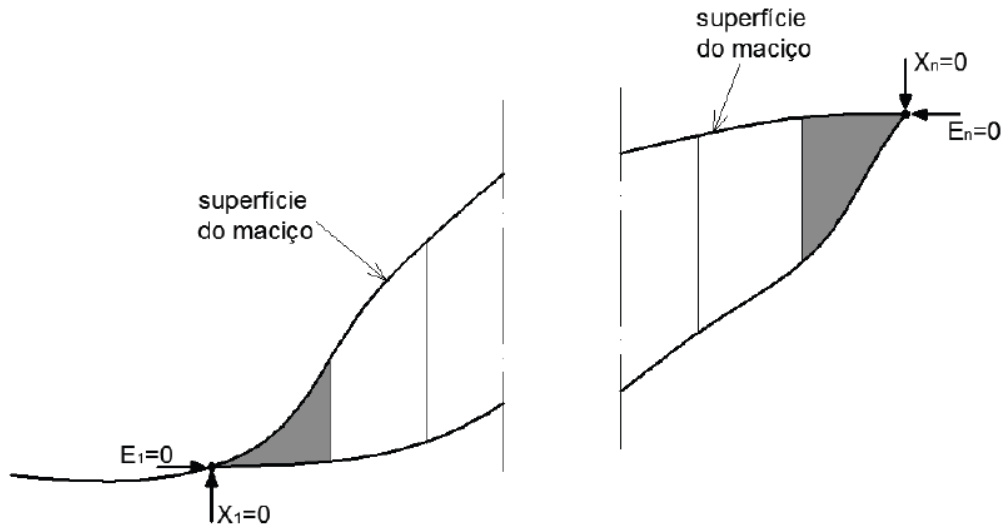


Fig. 4.4 – Forças nas extremidades da primeira e última fatia

Uma vez calculado o FS e o ângulo θ , calcula-se a força Q para cada fatia, substituindo estes na expressão 4.13. Uma vez que Q é uma resultante estaticamente equivalente das forças de interação X e E , a diferença destas entre fatias calcula-se por:

$$\Delta X_i = Q_i \sin \theta \quad (4.30)$$

$$\Delta E_i = Q_i \cos \theta \quad (4.31)$$

Assim, partindo do ponto extremo da superfície de deslizamento onde X_1 e E_1 são conhecidos, facilmente se chega aos valores de X e E das fatias seguintes.

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_i \quad (4.32)$$

$$E_{i+1} = E_i + \Delta E_i \quad (4.33)$$

As forças N' e T resultam da aplicação do equilíbrio de forças na direção normal e paralela à base da fatia respetivamente.

$$N'_i = (W_i^* + \Delta X_i) \times \cos \alpha_i - (\Delta E_i + W_i \cdot k_h) \times \sin \alpha_i - U_i \quad (4.34)$$

$$T_i = (W_i^* + \Delta X_i) \times \sin \alpha_i + (\Delta E_i + W_i \cdot k_h) \times \cos \alpha_i \quad (4.35)$$

A determinação da linha de impulso é feita a partir de uma equação de equilíbrio de momentos para cada fatia, em relação ao ponto médio da base.

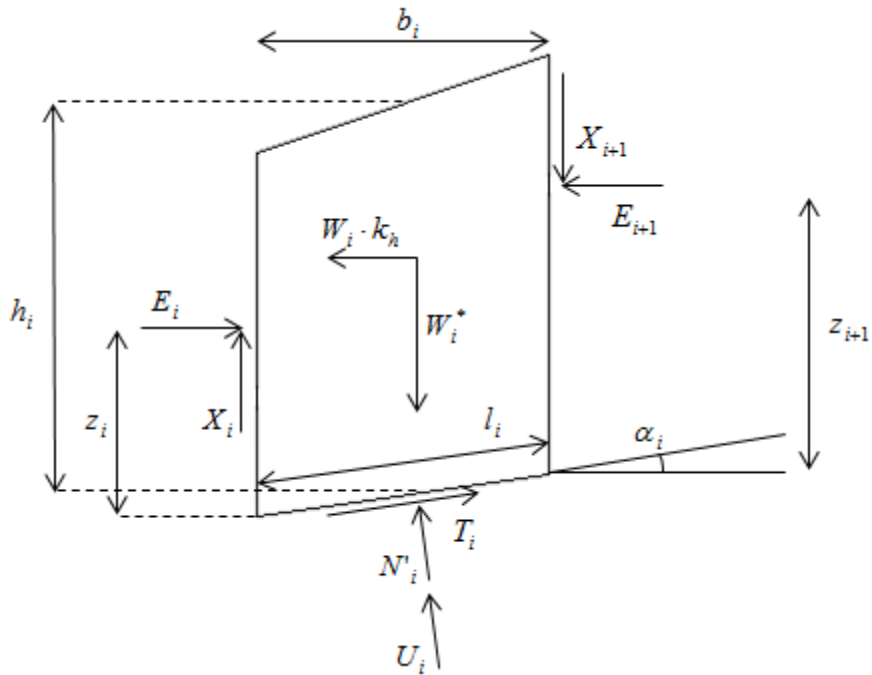


Fig. 4.5 – Forças numa fatia genérica

Partindo na mesma da extremidade inferior do talude, local onde é conhecido o ponto de aplicação das forças de interação X_1 e E_1 , efetuando o equilíbrio de momentos em relação ao ponto médio da base da fatia, a altura do ponto de aplicação das forças de interação na outra extremidade da fatia é dada por:

$$z_{i+1} = \frac{(X_i + X_{i+1}) \times \frac{b_i}{2} + E_i \times \left(z_i - \frac{b_i}{2} \times \tan \alpha_i \right) + E_{i+1} \times \frac{b_i}{2} \times \tan \alpha_i - W_i \cdot k_h \times \frac{h}{2}}{E_{i+1}} \quad (4.36)$$

Efetuada este procedimento para as restantes fatias do talude e tomando o último ponto coincidente com a interseção da superfície de deslizamento com a do talude, obtêm-se a linha de impulso ao longo do conjunto de fatias considerado.

5

MÉTODO DE JANBU

5.1. INTRODUÇÃO

O método de Janbu permite analisar a estabilidade de um talude admitindo superfícies de rotura de qualquer forma. O procedimento é baseado em equações diferenciais, as quais governam o equilíbrio de forças e momentos da massa de solo acima da superfície de rotura adotada. A aplicação deste método leva a resultados não muito satisfatórios uma vez que este método apresenta bastante instabilidade de valores e dificuldade em convergir, levando a que muitas vezes não se obtenha nenhum valor em concreto ou se obtenha um valor diferente daquele que era esperado.

De forma a tornar a utilização do método prática e expedita este foi automatizado com a sua inclusão num programa de cálculo.

5.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método apresentado por Janbu em 1954, permite fazer a análise da estabilidade de um talude admitindo superfícies de rotura de qualquer formato. O processo é baseado em equações diferenciais, as quais governam o equilíbrio de forças e momentos da massa acima da superfície adotada.

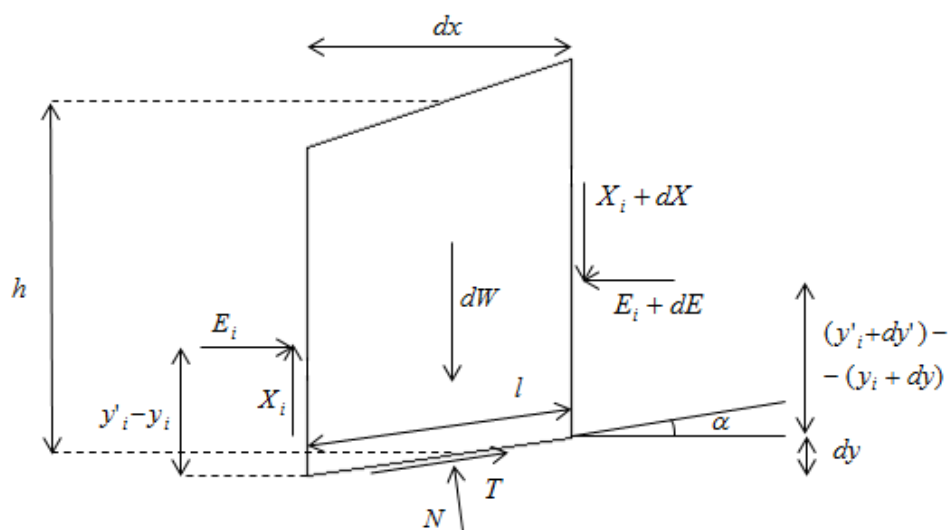


Fig. 5.1 - Forças atuantes numa fatia de solo segundo o método de Janbu (1954)

O equilíbrio de momentos é considerado em relação ao ponto médio da base de cada fatia, cuja largura é infinitesimal. Assim as contribuições do peso, dW , e da força normal, dN , ambas consideradas como atuando nesse ponto, são nulas. O equilíbrio de momentos é dado por:

$$E_i \left[(y'_i - y_i) - \frac{dy}{2} \right] - (E_i + dE) \left[(y'_i + dy') - (y_i + dy) + \frac{dy}{2} \right] + X_i \frac{dx}{2} + (X_i + dX) \frac{dx}{2} = 0 \quad (5.1)$$

onde dE e dX representam as diferenças de valores de E e X entre as duas faces da fatia, dx é a largura infinitesimal da fatia e dy e dy' são as diferenças dos valores tomados pelas ordenadas da superfície de deslizamento, $y(x)$, e da linha de impulso, $y'(x)$, entre as duas faces da fatia. Simplificando a expressão e fazendo b tender para 0, a expressão aproxima-se do seguinte limite:

$$E_i \frac{dy'}{dx} + \frac{dE}{dx} (y'_i - y_i) - X_i = 0 \quad (5.2)$$

Efetuada o equilíbrio de forças na vertical e na horizontal na fatia tem-se, respetivamente:

$$dW + dX - dN \cos \alpha - dT \sin \alpha = 0 \quad (5.3)$$

$$dE + dN \sin \alpha - dT \cos \alpha = 0 \quad (5.4)$$

Desta forma, o equilíbrio estático de cada fatia considerada é assegurado satisfazendo as equações 5.2, 5.3 e 5.4.

Em relação ao equilíbrio estático global, considera-se também o equilíbrio vertical, horizontal e de momentos da totalidade da massa de solo.

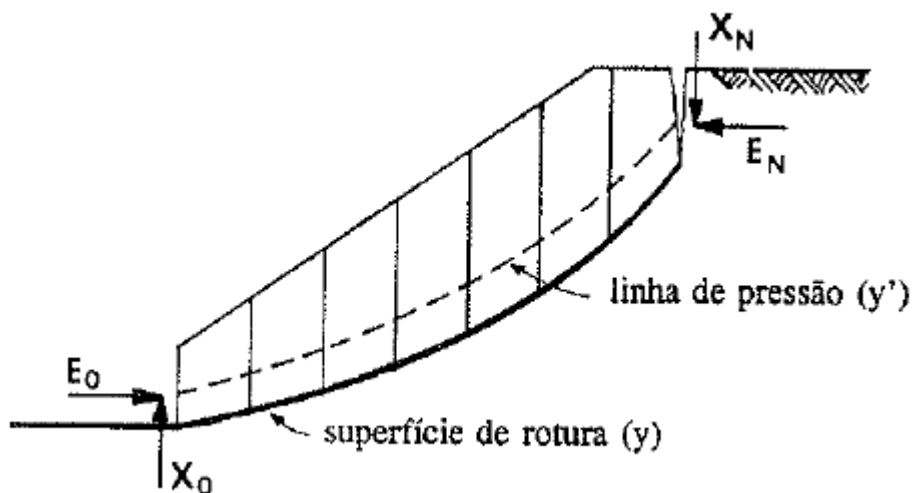


Fig. 5.2 – Superfície de rotura associada ao método de Janbu (Guedes de Melo, 1993)

Janbu mostrou que para haver equilíbrio global das forças verticais, o integral do diferencial das forças de corte de interação entre fatias tem que estar em equilíbrio com as forças de corte aplicadas nas fronteiras da massa de solo, ou seja:

$$\int dX = X_0 - X_N \quad (5.5)$$

Por outro lado, para que haja equilíbrio global de forças horizontais, o integral do diferencial das forças horizontais resultantes da interação entre fatias tem que ser igual às componentes horizontais das forças aplicadas nas fronteiras, isto é:

$$\int dE = E_0 - E_N \quad (5.6)$$

Relativamente ao equilíbrio de momentos, este é automaticamente satisfeito quando se considera o equilíbrio de momentos em cada fatia, incluindo as extremas.

Determina-se de seguida as forças na interface entre fatias. Eliminando dN nas equações 5.3 e 5.4 tem-se:

$$dE = -(dW + dX) \tan \alpha + \frac{dT}{\cos \alpha} \quad (5.7)$$

Substituindo na equação de equilíbrio global 5.6, torna-se possível calcular para qualquer interface as forças E_i .

$$E_i = E_0 + \int_0^i \left[(dW + dX) \tan \alpha - \frac{dT}{\cos \alpha} \right] \quad (5.8)$$

Para determinar as forças verticais de corte na mesma interface, X_i , recorre-se à equação de equilíbrio de momentos na fatia (equação 5.2).

$$X_i = E_i \frac{dy'}{dx} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_i (y'_i - y_i) \quad (5.9)$$

Para a determinação do fator de segurança, substitui-se dE , obtido na equação 5.7, na equação de equilíbrio de forças horizontais e recorrendo ao cálculo aproximado do integral tem-se:

$$E_N - E_0 = \sum [(W + (X_{i+1} - X_i) \tan \alpha - \tau_m \Delta x (1 + \tan^2 \alpha))] \quad (5.10)$$

dado que $T = \tau_m (\Delta x / \cos \alpha)$.

A resistência ao corte mobilizada na base de cada fatia é dada por:

$$\tau_m = \frac{\tau_r}{FS} = \frac{c'}{FS} + (\sigma_n - u) \frac{\tan \phi'}{FS} \quad (5.11)$$

De 5.3 conclui-se que a tensão normal σ_n é igual a:

$$\sigma_n = \frac{W}{\Delta x} + \frac{X_{i+1} - X_i}{\Delta x} - \tau_m \tan \alpha \quad (5.12)$$

Substituindo τ_m dado pela equação 5.11 na equação 5.10 e resolvendo em ordem ao fator de segurança tem-se:

$$FS = \frac{1}{E_0 - E_N + \sum (W + (X_{i+1} - X_i)) \tan \alpha} \times \left[\sum \left[c' \Delta x + (W + (X_{i+1} - X_i) - u \Delta x) \tan \phi' \right] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{FS}} \right] \quad (5.13)$$

Para determinar o fator de segurança procede-se ao seguinte. Tomando $X_{i+1} - X_i = 0$ para cada fatia, obtém-se através de um processo iterativo da equação 5.13, uma primeira aproximação do valor do fator de segurança. De seguida, definindo a posição para a linha de pressão a 1/3 da altura das faces das fatias e coincidente com os pontos extremos do talude, utilizando o valor obtido para FS, pode ser determinada uma aproximação para $X_{i+1} - X_i$ através das expressões de equilíbrio de forças e de momentos. Com isto pode ser calculado um novo valor para o fator de segurança. O processo será repetido até que se obtenha um valor de FS ao qual esteja associado um pequeno erro de convergência. O processo, em geral, converge num número razoável de iterações, contudo pode por vezes a convergência não ser conseguida ou convergir para um valor afastado do que seria de esperar (Siegel, 1975). Para tentar contornar este problema, aplicou-se duas diferentes formulações do método apresentadas na bibliografia, ou incluiu-se alguns processos de cálculo intercalares de forma a tentar aproximar a solução da desejada. Esta problemática associada ao método será mais à frente analisada.

5.3. DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS NO TALUDES_Mv1

Os algoritmos introduzidos no programa contemplam várias versões do método, tendo cada uma uma formulação diferente ou um processo de cálculo distinto na tentativa de melhorar a convergência do processo de solução. As formulações adotadas foram a apresentada por Janbu em 1954, e a apresentada por Fredlund, Krahn e Pufahl em 1981.

5.3.1. DETERMINAÇÃO DE FS

Para a determinação do fator de segurança foram desenvolvidas 33 versões, subdivididas em três categorias, simplificada, generalizada e rigorosa.

Para a categoria simplificada foram desenvolvidas 3 versões. Tal como o nome indica, diz respeito ao método de Janbu na sua fórmula simplificada, isto é, desprezando as forças de interação entre fatias. A generalizada, diz respeito ao método de Janbu seguindo a formulação apresentada por Fredlund, Krahn e Pufahl (1981), onde o cálculo de FS é feito contemplando as forças de interação e baseado na força N de cada fatia, sendo N calculado pela fórmula apresentada pelos autores. Foram desenvolvidas para esta 17 versões. Finalmente a rigorosa traduz o método de Janbu seguindo a formulação apresentada por Janbu (1954) tendo também em conta as forças de interação entre fatias. Foram desenvolvidas 13 versões.

As forças consideradas na formulação do algoritmo encontram-se representadas na seguinte figura, onde $W^* = W(1 + k_v)$:

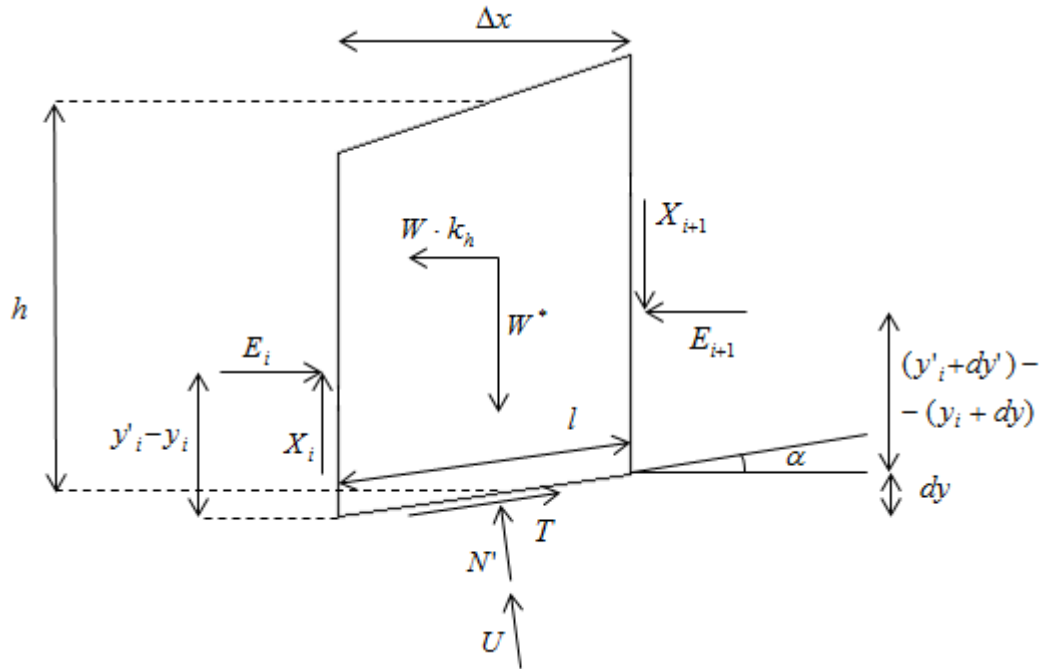


Fig. 5.3 - Forças numa fatia genérica para o método de Janbu

De seguida são apresentados os algoritmos implementados para as diferentes versões desenvolvidas.

5.3.1.1. Método Simplificado

- 1ª Versão

Nesta versão o método é implementado seguindo a formulação apresentada por Janbu na fórmula simplificada.

Desenvolvendo matematicamente a equação 5.13, e considerando o contributo da ação sísmica e das forças representadas na figura 5.3 chegamos à seguinte equação:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{c' \Delta x + (W^* - U + \Delta X) \tan \phi'}{\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \times \tan \phi' / FS)} \right)}{E_0 - E_N + \sum [(W^* + \Delta X) \tan \alpha + W \cdot k_h]} \quad (5.14)$$

Uma vez que na versão simplificada as forças X de interação entre fatias são desprezadas, a equação anterior toma a seguinte forma:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{c' \Delta x + (W^* - U) \tan \phi'}{\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \times \tan \phi' / FS)} \right)}{\sum [W^* \tan \alpha + W \cdot k_h]} \quad (5.15)$$

Com base na equação anterior e de forma a simplificar o cálculo e a escrita do algoritmo considerou-se as seguintes constantes:

$$A_0 = c' \Delta x + (W^* - U) \times \tan \phi' \quad (5.16)$$

$$B_0 = W^* \times \tan \alpha + W \cdot k_h \quad (5.17)$$

$$m_\alpha = \cos^2 \alpha \times \left(1 + \frac{\tan \alpha \times \tan \phi'}{FS} \right) \quad (5.18)$$

Assim a equação para o cálculo do fator de segurança pode ser escrita como sendo:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{A_0}{m_\alpha} \right)}{\sum B_0} \quad (5.19)$$

Uma vez calculado o novo valor de FS através da equação 5.19 calcula-se o valor de ΔFS .

$$\Delta FS_i = FS_{i+1} - FS_i$$

No caso da primeira iteração, uma vez que não é conhecido o valor de FS_1 , considerou-se este como sendo unitário; para as restantes este valor é conhecido da iteração anterior.

O processo termina quando o ΔFS atinge um valor em módulo inferior ao da tolerância considerada ($1,0 \times 10^{-6}$), caso contrário, com o novo valor de FS calcula-se m_α e repete-se o processo.

Importa salientar que houve a necessidade de considerar uma tolerância menos “apertada” do que a do método de Spencer em todas as versões implementadas para que o método convergisse. Isto deve-se à sensibilidade e flutuação de valores que o método apresenta na sua aplicação devido à ocorrência de divisões por números pequenos durante o processo iterativo. Outro aspeto relevante prende-se com o facto de se ter limitado o número máximo de iterações a 30. A experiência mostrou que quando não se consegue convergir com este número de iterações as oscilações tendem a aumentar, o que é corroborado por Li (1986).

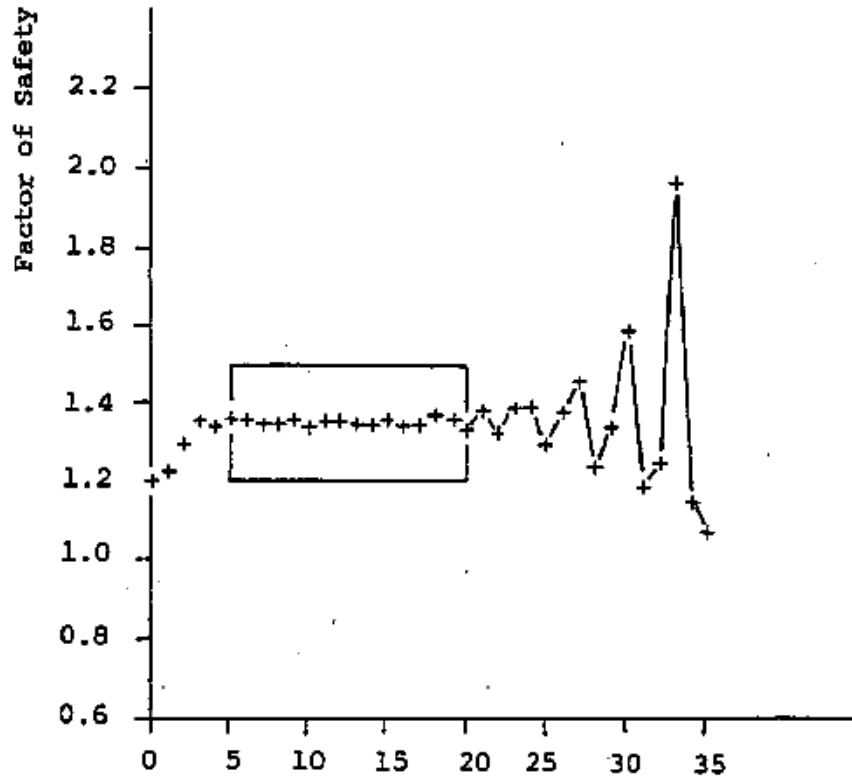


Fig. 5.4 – Variação do fator de segurança com o número de iterações (Li, 1986)

- 2ª Versão

Nesta versão, seguiu-se o mesmo processo da versão anterior mas incluindo o método de Newton-Raphson de modo a acelerar a convergência. Assim o novo valor de FS é dado por:

$$FS_{i+1} = FS_i + \Delta FS_i \quad (5.20)$$

em que ΔFS é dado por:

$$\Delta FS_i = - \left(\frac{\Psi(FS_i)}{\Psi'(FS_i)} \right) \quad (5.21)$$

A função $\Psi(FS)$ é definida por:

$$\Psi(FS_i) = FS_i - \frac{\sum \left(\frac{A_0}{m_\alpha} \right)}{\sum B_0} \quad (5.22)$$

onde A_0 , B_0 e m_α são obtidos da aplicação das equações 5.16, 5.17 e 5.18 respetivamente.

Derivando a equação anterior chegamos à seguinte expressão:

$$\Psi'(FS) = 1 - \frac{1}{FS} \times \frac{\sum \left(\frac{A_0}{m_\alpha} \times \frac{\tan \alpha \times \tan \phi' / FS}{1 + \tan \alpha \times \tan \phi' / FS} \right)}{\sum B_0} \quad (5.23)$$

De modo a facilitar o cálculo e a escrita do algoritmo considerou-se na mesma as constantes A_0 , B_0 e m_α e uma nova constante definida por:

$$n_\alpha = 1 + \frac{\tan \alpha \times \tan \phi'}{FS} \quad (5.24)$$

Efetuada algumas simplificações matemáticas e considerando esta nova constante a expressão da derivada fica:

$$\Psi'(FS) = 1 - \frac{1}{FS} \times \frac{\sum \left(\frac{A_0}{m_\alpha} \times \left(1 - \frac{1}{n_\alpha} \right) \right)}{\sum B_0} \quad (5.25)$$

Desta forma, partindo de um valor previamente definido para FS, efetua-se um ciclo iterativo calculando um valor de ΔFS que se soma ao valor de FS da iteração anterior. O processo termina quando o módulo de ΔFS atinge um valor inferior ao da tolerância considerada ($1,0 \times 10^{-6}$).

- 3ª Versão

Na presente versão, seguiu-se a formulação apresentada por Fredlund, Krahn e Pufahl (1981) aplicando-a na fórmula simplificada, ou seja, desprezando as forças de interação entre fatias.

Inicialmente começa-se por calcular a força N pela seguinte equação:

$$N = \frac{W^* - \frac{(c' \times l - U \times \tan \phi') \times \sin \alpha}{FS}}{r_\alpha} \quad (5.26)$$

onde r_α é dado por:

$$r_\alpha = \frac{\cos \alpha + \sin \alpha \times \tan \phi'}{FS} \quad (5.27)$$

Com o valor de N calcula-se o valor de FS como sendo:

$$FS = \frac{\sum [(c' \times l + (N - U) \times \tan \phi') \times \cos \alpha]}{\sum [N \times \sin \alpha + W \cdot k_h]} \quad (5.28)$$

Partindo de um valor do FS previamente definido calcula-se um novo valor de N e FS através da aplicação das equações 5.26 e 5.28 respetivamente. Com o novo valor de FS, calcula-se o ΔFS definido por:

$$\Delta FS_i = FS_{i+1} - FS_i \quad (5.29)$$

O processo termina quando o módulo de ΔFS atinge um valor inferior ao da tolerância considerada ($1,0 \times 10^{-6}$).

5.3.1.2. Definição da linha de impulso

Nas formulações onde as forças de interação entre fatias são consideradas (generalizada e rigorosa), o primeiro passo é a determinação da linha de impulso ao longo do talude. Para tal consideram-se coincidentes os pontos extremos da linha de impulso e da superfície de deslizamento. De seguida calcula-se a posição da linha de impulso ao longo do talude considerando-a a 1/3 da altura das faces das fatias.

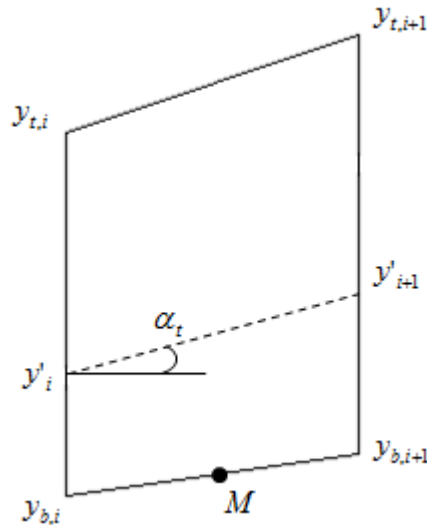


Fig. 5.5 – Fatia genérica - definição da linha de impulso

$$y'_{i+1} = y_{b,i+1} + \frac{y_{t,i+1} - y_{b,i+1}}{3} \quad (5.30)$$

Importa salientar que segundo alguns autores, no caso de solos argilosos a linha de impulso deveria ser definida mais acima do que a dos restantes solos, no entanto isso não foi considerado no programa por não se mostrar relevante nos resultados finais.

Numa tentativa de investigar a origem da instabilidade numérica do método de Janbu, correu-se este método mas utilizando as linhas de impulso resultantes de outros métodos implementados no programa (Correia, Morgenstern-Price e Spencer). Concluiu-se que a causa dos problemas numéricos

não está relacionada com a fixação da linha de impulso ao terço da altura das fatias proposta por Janbu.

Com a linha de impulso calculada é então possível aplicar as várias versões desenvolvidas para o método nas formulações ditas generalizada (Fredlund, Krahn e Pufahl, 1981) e rigorosa (Janbu 1973).

5.3.1.3. Método de Janbu generalizado

- 1ª Versão

Tal como foi dito anteriormente, esta formulação tem em conta o contributo das forças de interação entre fatias. Uma das abordagens que se tentou foi ver a influência no cálculo do FS do valor das forças de interação X_n e E_n na face exterior da última fatia (Fig. 5.2).

Nesta versão efetuou-se o cálculo do FS sem obrigar que essas forças fossem nulas, ou seja, permitiu-se que fosse o programa a calculá-las, o que muitas vezes leva a valores diferentes de zero.

Desta forma, a força N é obtida através da seguinte expressão:

$$N = \frac{W^* + \Delta X - \frac{(c' \times l - U \times \tan \phi') \times \sin \alpha}{FS}}{r_\alpha} \quad (5.31)$$

onde r_α é obtido através da equação 5.27 e ΔX representa a diferença entre as forças de interação paralelas às faces das fatias. De modo a iniciar o processo iterativo, considera-se ΔX nulo em todas as fatias, sendo posteriormente calculados e guardados esses valores para ser utilizados na iteração seguinte. Com o novo valor de N determina-se a diferença entre as forças de interação normais às faces das fatias (ΔE).

$$\Delta E_i = \frac{c' \times l + (N - U) \times \tan \phi'}{FS} \times \cos \alpha - N \times \sin \alpha - W \cdot k_h \quad (5.32)$$

Partindo da extremidade inferior do talude onde o valor da força E é conhecido, o cálculo desta força ao longo das várias fatias é dado por:

$$E_{i+1} = E_i + \Delta E_i \quad (5.33)$$

Do mesmo modo, calcula-se o valor de ΔX como sendo:

$$\Delta X_i = \frac{E_i \times (y'_{i+1} - y'_i) + \Delta E_i \times (y'_{i+1} - y_{b,i+1}) + W \cdot k_h \times h/2}{\Delta x_i} - X_i \quad (5.34)$$

Assim a força X ao longo do talude é dada por:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_i \quad (5.35)$$

Tal como referido anteriormente, após calculados os valores de ΔX , estes são guardados de modo a serem utilizados na iteração seguinte no cálculo da força N (equação 5.31).

Finalmente calcula-se o valor de FS pela equação 5.28.

Partindo de um valor de FS previamente definido, desenvolve-se um processo iterativo calculando novos valores N e FS. Com os novos valores de FS calcula-se ΔFS (equação 5.29). O processo termina quando o módulo ΔFS atinge um valor inferior em módulo ao da tolerância considerada ($1,0 \times 10^{-6}$).

- 2ª Versão

Nesta versão, ao contrário da anterior, obrigou-se que as forças de interação X_n e E_n fossem nulas.

Assim, a diferença em relação à versão anterior está relacionada com o cálculo de ΔE e ΔX na última fatia do talude, passando estes a ser calculados respetivamente por:

$$\Delta E_n = E_n - E_{n-1} \quad (5.36)$$

$$\Delta X_n = X_n - X_{n-1} \quad (5.37)$$

De resto, todo o processo se mantém idêntico.

- 3ª Versão

Na presente versão, obrigou-se na mesma que as forças de interação X_n e E_n fossem nulas e introduziu-se o método de Newton-Raphson na tentativa de acelerar o processo de convergência.

O processo é idêntico ao da versão anterior diferenciando apenas no cálculo de FS.

O cálculo de FS através do método de Newton-Raphson é dado pela fórmula expressa em 5.20 sendo ΔFS calculado através da expressão 5.21.

Desta forma, considerou-se uma equação $\Psi(FS)$ definida por:

$$\Psi(FS) = FS_{i-1} - \frac{\sum [(c' \times l + (N - U) \times \tan \phi') \times \cos \alpha]}{\sum [N \times \sin \alpha + W \cdot k_h]} \quad (5.38)$$

Derivando a equação anterior chegamos à seguinte expressão:

$$\Psi'(FS) = 1 - \frac{1}{FS} \times \frac{d_{\alpha,1} \times \sum (N \times \sin \alpha + W \cdot k_h) - \sum [(c' \times l + (N - U) \times \tan \phi') \times \cos \alpha] \times d_{\alpha,2}}{(\sum [N \times \sin \alpha + W \cdot k_h])^2} \quad (5.39)$$

Como se verifica pela equação anterior considerou-se duas novas constantes ($d_{\alpha,1}$ e $d_{\alpha,2}$) de modo a facilitar o processo de cálculo e de escrita do algoritmo. Estas constantes são definidas por:

$$d_{\alpha,1} = \sum \left[\frac{\left(\frac{(W^* + \Delta X)}{\cos \alpha} - N \right) \times \cos \alpha \times \tan \phi'}{n_{\alpha}} \right] \quad (5.40)$$

$$d_{\alpha,2} = \sum \left[\frac{\left(\frac{(W^* + \Delta X)}{\cos \alpha} - N \right) \times \sin \alpha}{n_{\alpha}} \right] \quad (5.41)$$

sendo n_{α} definido pela equação 5.24.

Assim, partindo de um valor previamente definido para FS, efetua-se um ciclo iterativo calculando valores de ΔFS e acrescentando ao valor de FS da iteração anterior. O processo termina quando o módulo de ΔFS atinge um valor inferior ao da tolerância considerada ($1,0 \times 10^{-6}$).

- 4ª Versão

Nesta versão, todo o processo de cálculo é idêntico ao da versão anterior havendo apenas uma alteração no que diz respeito ao ΔFS . Neste caso calculam-se dois valores de ΔFS , um da mesma maneira apresentada na versão anterior (ΔFS_1) e outro através da equação 5.29 (ΔFS_2).

A escolha do ΔFS a acrescentar ao valor de FS é feita adotando-se o menor dos ΔFS .

- 5ª Versão

Na 5ª versão, obrigou-se na mesma que as forças de interação X_n e E_n fossem nulas e introduziu-se uma nova combinação iterativa desenvolvida por Li e White. (1987). O processo de cálculo é idêntico ao das versões anteriores diferenciando apenas no cálculo iterativo de FS. Esta nova combinação iterativa é facilmente explicada através da interseção de duas retas. Imagine-se o segmento de reta e os pontos genéricos representados:

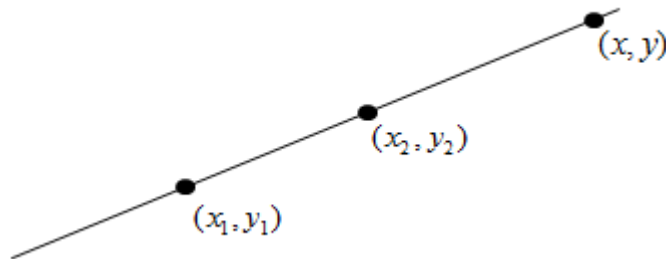


Fig. 5.6 – Segmento de reta e pontos genéricos

A equação da reta pode ser escrita como sendo:

$$(y - y_1) = m \times (x - x_1) \quad (5.42)$$

onde m representa o declive e pode ser expresso por:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.43)$$

Substituindo m na equação 5.42 e desenvolvendo matematicamente chegamos a uma expressão do tipo:

$$(y_2 - y_1) \cdot x + (x_1 - x_2) \cdot y = (y_2 - y_1) \cdot x_1 + (x_1 - x_2) \cdot y_1 \quad (5.44)$$

De forma a simplificar consideraram-se as seguintes constantes:

$$A = (y_2 - y_1) \quad (5.45)$$

$$B = (x_1 - x_2) \quad (5.46)$$

$$C = A \cdot x_1 + B \cdot y_1 \quad (5.47)$$

Considere-se agora dois segmentos de reta que se intersectam num certo ponto tal como mostra a figura:

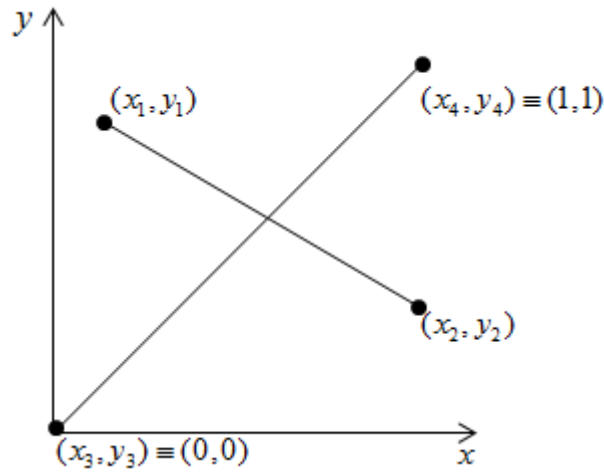


Fig. 5.7 – Interseção de dois segmentos de reta

Desta forma temos as seguintes constantes:

$$\begin{cases} A_1 = (y_2 - y_1) \\ B_1 = (x_1 - x_2) \\ C_1 = A_1 \cdot x_1 + B_1 \cdot y_1 \end{cases} \quad \begin{cases} A_2 = (y_4 - y_3) = 1 \\ B_2 = (x_3 - x_4) = -1 \\ C_2 = A_2 \cdot x_3 + B_2 \cdot y_3 = 0 \end{cases}$$

As coordenadas do ponto de interseção dos dois segmentos são obtidas da seguinte forma pelo método de Cramer:

$$x = \frac{\begin{vmatrix} C_1 & B_1 \\ C_2 & B_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} \Rightarrow x = \frac{C_1 B_2 - C_2 B_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \quad (5.48)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} A_1 & C_1 \\ A_2 & C_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} \Rightarrow y = \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \quad (5.49)$$

Substituindo as constantes pelo que representam ficamos com:

$$x = \frac{x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2}{(y_2 - x_2) - (y_1 - x_1)} \quad (5.50)$$

$$y = \frac{x_2 \cdot y_1 - y_2 \cdot x_1}{(y_2 - x_2) - (y_1 - x_1)} \quad (5.51)$$

Li e White aplicaram este conceito no cálculo do FS. O processo iterativo aplicado no programa pode ser explicado da seguinte forma:

Começa-se por considerar um parâmetro denominado $FS_{inp,i}$ como sendo:

$$FS_{inp,i} = FS_{i-1} \quad (5.52)$$

De seguida, calcula-se um novo valor de FS que se denominou como $FS_{out,i}$.

$$FS_{out,i} = \frac{\sum [(c' \times l + (N - U) \times \tan \phi') \times \cos \alpha]}{\sum [N \times \sin \alpha + W \cdot k_h]} \quad (5.53)$$

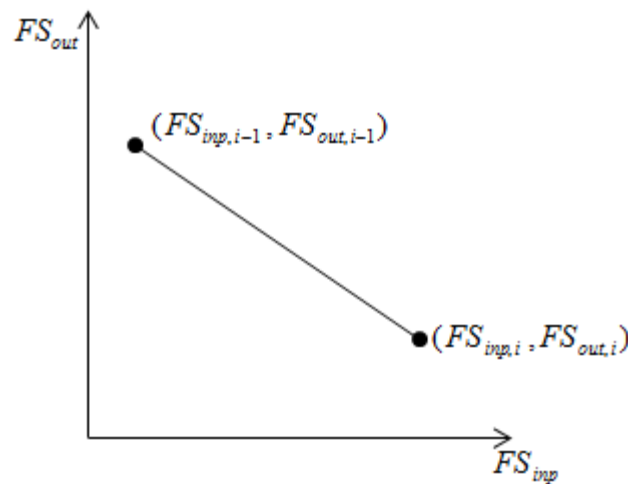


Fig. 5.8 – Segmento de reta – método de Li and White

Obriga-se o programa a realizar pelo menos três iterações, quando o número de iterações for superior a dois considera-se um segmento de reta do tipo $FS_{inp} = FS_{out}$ e que passe pela origem.

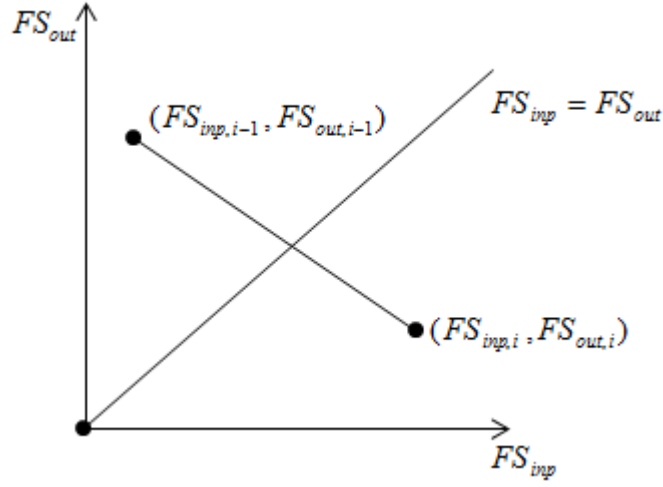


Fig. 5.9 – Interseção de dois segmentos de reta – método de Li and White

Assim, o valor de FS corresponderá à abcissa do ponto de interseção dos dois segmentos. Tendo em conta a expressão 4.85 o valor de FS pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$FS = \frac{FS_{inp,i-1} \cdot FS_{out,i} - FS_{out,i-1} \cdot FS_{inp,i}}{(FS_{out,i} - FS_{inp,i}) - (FS_{out,i-1} - FS_{inp,i-1})} \quad (5.54)$$

Efetuada algumas simplificações e desenvolvimentos matemáticos a expressão anterior pode ser escrita como:

$$FS = FS_{inp,i} + \frac{1}{1 + \frac{FS_{inp,i-1} - FS_{out,i-1}}{FS_{out,i} - FS_{inp,i}}} \times (FS_{inp,i-1} - FS_{inp,i}) \quad (5.55)$$

De forma a simplificar a escrita do algoritmo considerou-se a seguinte parâmetro:

$$FS_{fct} = \frac{1}{1 + \frac{FS_{inp,i-1} - FS_{out,i-1}}{FS_{out,i} - FS_{inp,i}}} \quad (5.56)$$

Assim o novo valor de FS é calculado por:

$$FS = FS_{inp,i} + FS_{fct} \times (FS_{inp,i-1} - FS_{inp,i}) \quad (5.57)$$

Desta forma podemos concluir que o processo iterativo apresentado por Li e White procura achar um valor de FS intermédio entre dois valores provenientes de iterações consecutivas. Com o novo valor de FS calcula-se o ΔFS através da expressão 5.29.

Partindo de um valor de FS previamente definido, desenvolve-se um processo iterativo terminando quando o módulo de ΔFS tomar um valor inferior à tolerância estipulada.

- 6ª Versão

Esta versão, tem como base o método desenvolvido na versão anterior aplicando-se o processo iterativo descrito na 4ª versão. Assim, o ΔFS_1 é calculado seguindo o mesmo processo da versão anterior, e o ΔFS_2 é calculado através da equação 5.29 onde FS_i é obtido através da equação 5.28 e FS_{i-1} representa o valor de FS da iteração anterior obtido através do método de Li e White (equação 5.57).

A escolha do ΔFS a acrescentar ao valor de FS segue as mesmas regras descritas na 4ª versão.

- 7ª Versão

Tendo por base o processo descrito na 5ª versão, apenas se alterou o modo de cálculo de FS_{fct} e FS , passando estes a ser calculados por:

$$FS_{fct} = \frac{(FS_{inp,i} - FS_{out,i}) - (FS_{inp,i-1} - FS_{out,i-1})}{FS_{inp,i} - FS_{inp,i-1}} \quad (5.58)$$

$$FS = FS_{inp,i} - \frac{FS_{inp,i} - FS_{out,i}}{FS_{fct}} \quad (5.59)$$

Todo o restante processo se mantém igual ao apresentado na 5ª versão.

- 8ª Versão

Seguindo o processo descrito na 1ª versão, não se obrigou a que as forças X_n e E_n fossem nulas, introduzindo apenas um recálculo da força N depois de calculados os novos valores de ΔE e ΔX através das equações 5.32 e 5.34 respetivamente. Com o valor recalculado de N calcula-se o valor de FS pelo mesmo processo da 1ª versão.

- 9ª Versão

Nesta versão, efetuou-se o cálculo de FS sem obrigar que as forças X_n e E_n fossem nulas, com recálculo de N e introduzindo o método de Newton-Raphson de modo a acelerar o processo iterativo.

Assim, o processo segue a mesma linha de cálculo do descrito na 8ª versão introduzindo posteriormente o método de Newton-Raphson para chegar ao valor de FS aplicando respetivamente as equações 5.38, 5.39, 5.21 e 5.20.

- 10ª Versão

Na 10ª versão, calculou-se o FS obrigando as forças X_n e E_n a serem nulas e efetuando o recálculo de N . Assim, à semelhança da 2ª versão calcula-se os valores de ΔE e ΔX pelas equações 5.36 e 5.37, sendo estes depois utilizados no recálculo da força N . Os valores de FS e ΔFS resultam da

aplicação das expressões 5.28 e 5.29 respetivamente sendo o critério de paragem o mesmo utilizado nas versões anteriores.

- 11ª Versão

Nesta versão, a semelhança da anterior, considerou-se na mesma as forças X_n e E_n nulas e o recálculo da força N , tendo-se introduzido para além disso, o método de Newton-Raphson de forma a acelerar o processo de cálculo de FS. Assim, é utilizada a mesma metodologia descrita na versão anterior sendo depois utilizadas respetivamente as equações 5.38, 5.39, 5.21 e 5.20 associadas ao método introduzido.

- 12ª Versão

Na presente versão, o cálculo de FS foi feito considerando as forças X_n e E_n nulas, tendo efetuado o recálculo da força N e tendo introduzido o processo iterativo desenvolvido por Li and White. Desta forma o processo mantém-se idêntico ao da versão anterior tendo sido introduzidas para além disso, as equações relativas ao processo iterativo de Li and White descritas na 5ª versão.

- 13ª Versão

Esta versão segue o mesmo processo aplicado na versão anterior tendo sido desprezada a condição que impõe que as forças X_n e E_n sejam nulas.

- 14ª Versão

Nesta versão, o cálculo de FS foi feito sem terem sido consideradas as forças X_n e E_n iguais a zero, e adotando novos valores para o comprimento do braço no equilíbrio de momentos para o cálculo de ΔX .

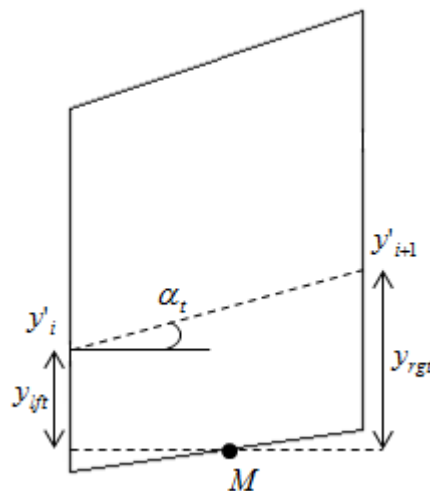


Fig. 5.10 – Fatia genérica – método de Janbu

Os novos valores para o comprimento do braço considerados são:

$$y_{lft} = y'_i - y_M \quad (5.60)$$

$$y_{rgt} = y'_{i+1} - y_M \quad (5.61)$$

Assim o processo de cálculo de FS é idêntico ao apresentado na 1ª versão diferenciando apenas no cálculo de ΔX , passando este a ser calculado por:

$$\Delta X_i = \frac{E_i \times y_{rgt,i} - E_{i-1} \times y_{lft,i} + W \cdot k_h \times h/2}{\Delta x_i / 2} - X_i \times 2 \quad (5.62)$$

- 15ª Versão

Na presente versão seguiu-se o mesmo processo apresentado na 14ª versão tendo apenas sido adicionado mais, o recálculo da força N depois de calculados os novos valores de ΔE e ΔX .

- 16ª Versão

Tal como na versão anterior, considerou-se novos valores para o comprimento do braço no equilíbrio de momentos e o recálculo da força N . Apenas foi acrescentada a condição que obriga as forças X_n e E_n a serem iguais a zero.

- 17ª Versão

Nesta versão o cálculo de FS é feito sem considerar as forças X_n e E_n iguais a zero e calculando as forças verticais de interação entre fatias pela fórmula apresentada por Janbu.

O processo é idêntico descrito na 1ª versão diferenciando apenas no cálculo das forças X e de ΔX . Com este método é possível chegar ao valor da força X sem antes ter de calcular a força N , podendo assim entrar logo de início com o valor de ΔX no cálculo da força N .

Para tal, começa-se por considerar a diferença da força E entre duas fatias consecutivas relativamente ao comprimento total formado pelas duas fatias.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E_{i+2} - E_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (5.63)$$

De seguida, a força X é dada pela expressão:

$$X_{i+1} = E_i \times \tan \alpha_{t,i} + \frac{dE}{dx} \times \Delta y'_i + \frac{W \cdot k_h \times h/2}{\Delta x} \quad (5.64)$$

onde $\tan \alpha_{t,i}$ representa a tangente do ângulo formado entre a linha de impulso e a horizontal para cada fatia (Fig. 5.5) e $\Delta y'_i$ representa a diferença entre a altura da linha de impulso (y'_{i+1}) e a altura do ponto da base da fatia ($y_{b,i+1}$) (Fig. 5.5).

Com os valores de X_{i+1} efetua-se o cálculo de ΔX como sendo:

$$\Delta X_i = X_{i+1} - X_i \quad (5.65)$$

Guardando este valor, este é utilizado na iteração seguinte no cálculo da força N .

5.3.1.4. Método de Janbu rigoroso

- 1ª Versão

Nesta versão, o cálculo do FS é feito sem considerar as forças X_n e E_n iguais a zero e calculando as forças verticais de interação seguindo a formulação apresentada por Janbu.

Começa-se por calcular o valor de ΔX através da aplicação da equação 5.65. No caso da primeira iteração este valor será zero pois ainda não são conhecidos os valores de X_i e X_{i+1} . Só a partir da segunda iteração é que este toma um valor diferente de zero uma vez que foram calculadas na iteração anterior as forças de interação entre fatias.

De seguida calcula-se o valor de ΔE e de E como sendo:

$$\Delta E_i = \frac{1}{FS} \times \frac{A_0 + \Delta X_i \times \tan \phi'}{m_\alpha} - B_0 + \Delta X_i \times \tan \alpha \quad (5.66)$$

$$E_{i+1} = E_i + \Delta E_i \quad (5.67)$$

onde A_0 , B_0 e m_α resultam da aplicação das equações 5.16, 5.17 e 5.18 respetivamente.

Com estes valores determina-se o valor as forças verticais de interação (forças X) aplicando as equações 5.63 e 5.64 respetivamente.

O valor de FS é dado por:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{A_0 + \Delta X \times \tan \phi'}{m_\alpha} \right)}{E_0 - E_n + \sum (B_0 + \Delta X \times \tan \alpha)} \quad (5.68)$$

onde ΔX é obtido aplicando a equação 5.65 utilizando os novos valores de X_i e X_{i+1} calculados anteriormente. E_0 e E_n correspondem às forças de interação normais nas extremidades do talude (Fig. 5.2). Nos exemplos de aplicação considerados são nulas as forças X e E nas extremidades da massa deslizando.

Com o novo valor de FS calcula-se o ΔFS através da equação 5.29. O processo termina assim que este toma um valor inferior à tolerância estipulada.

- 2ª Versão

Na 2ª versão seguiu-se o mesmo processo da versão anterior, mas neste caso obrigou-se a que as forças X_n e E_n fossem iguais a zero.

- 3ª Versão

Nesta versão seguiu-se o mesmo processo aplicado na versão anterior tendo apenas o ΔX passado a ser calculado apenas uma vez e a ser guardado num vetor para a iteração seguinte. Desta forma parte-se na mesma de um valor nulo para ΔX na primeira iteração, mas após calculado o valor de ΔE e de E determina-se o valor das forças X e de ΔX pelas equações 5.64 e 5.65 sendo este último guardado para ser utilizado na iteração seguinte.

- 4ª Versão

Na presente versão, efetuou-se o cálculo de FS considerando as forças X_n e E_n iguais a zero, o armazenamento ΔX de para a iteração seguinte e ainda o recálculo das forças de interação entre fatias. Assim, faz-se uma primeira abordagem obtendo valores de E , ΔE , X , e ΔX aplicando o mesmo processo anteriormente descrito, de seguida volta-se a efetuar o cálculo destes mas desta vez utilizando os valores obtidos na primeira abordagem, guardando o valor de ΔX de forma a poder ser utilizado na iteração seguinte.

- 5ª Versão

Nesta versão seguiu-se o mesmo processo descrito na 3ª versão introduzindo para além disso o método de Newton-Raphson de modo a acelerar a convergência.

À semelhança de versões anteriores, o valor de FS é obtido pela equação 5.20 onde ΔFS é definido pela equação 5.21. A função $\Psi(FS)$ é definida por:

$$\Psi(FS_i) = FS_i - \frac{\sum \left(\frac{A_0 + \Delta X_i \times \tan \phi'}{m_\alpha} \right)}{E_n - E_0 + \sum (B_0 + \Delta X_i \times \tan \alpha)} \quad (5.69)$$

Derivando chegamos à seguinte equação:

$$\Psi'(FS) = 1 - \frac{1}{FS} \times \frac{\sum \left(\frac{A_0 + \Delta X_i \times \tan \phi'}{m_\alpha} \times \left(1 - \frac{1}{n_\alpha} \right) \right)}{E_n - E_0 + \sum (B_0 + \Delta X_i \times \tan \alpha)} \quad (5.70)$$

Sendo n_α obtido através da equação 5.24.

O critério de paragem é idêntico ao das versões anteriormente apresentadas.

- 6ª Versão

Na 6ª versão, obrigou-se a que as forças X_n e E_n fossem iguais a zero e aplicou-se a combinação iterativa apresentada por Li e White. Para tal, seguiu-se o mesmo processo onde esta combinação iterativa foi também aplicada. Assim que o número de iterações é superior a dois calcula-se os valores de FS_{fct} e FS através das equações 5.56 e 5.57 respetivamente. Com o novo valor de FS calcula-se o ΔFS através da expressão 5.29. O processo iterativo termina assim que ΔFS toma um valor inferior à tolerância definida.

- 7ª Versão

Tendo por base o processo descrito na versão anterior, alterou-se o modo de cálculo de FS_{fct} e FS , passando estes a ser calculados pelas equações 5.58 e 5.59 respetivamente.

Todo o restante processo se mantém idêntico ao da versão anterior.

- 8ª Versão

Nesta versão, o cálculo de FS é feito seguindo o mesmo processo apresentado na 5ª versão mas neste caso os valores de ΔX não são guardados para a iteração seguinte sendo por isso calculados duas vezes durante o processo.

- 9ª Versão

Na presente versão, o cálculo de FS é feito obrigando as forças X_n e E_n a serem iguais a zero, aplicando o processo iterativo apresentado por Li e White e com um novo processo para o cálculo das forças de interação X .

Com esta novo processo, o cálculo de X e ΔX é feito logo no início do processo, podendo utilizar esses valores ao longo do processo. Desta forma o processo não precisa de ser iniciado considerando estes fatores nulos para a primeira iteração assim como não está dependente da iteração anterior para ter valores destes. Assim, os valores de X e ΔX são obtidos da seguinte forma:

Começa-se por calcular o valor de ΔX como sendo:

$$\Delta X_i = 2 \times \frac{\left(-X_i + E_i \times \tan \alpha_i + \left(\frac{A_0}{m_\alpha} - B_0 \right) \times r_{fac} + \frac{W \cdot k_h \times h/2}{\Delta x} \right)}{d_{fac}} \quad (5.71)$$

De forma a simplificar a escrita do algoritmo considerou-se as constantes m_α , r_{fac} e d_{fac} , sendo a primeira obtida através da equação 5.18, as restantes são definidas respetivamente por:

$$r_{fac} = \frac{\tan \alpha}{2} + \frac{y'_{i+1} - y_{b,i+1}}{\Delta x} \quad (5.72)$$

onde $y'_{i+1} - y_{b,i+1}$ representa a altura da linha de impulso em relação ao ponto extremo da base da fatia (Fig. 5.5).

$$d_{fac} = 1 - 2 \times r_{fac} \times \left(\frac{\tan \phi'}{m_\alpha} - \tan \alpha \right) \quad (5.73)$$

Com o valor de ΔX calcula-se os valores da força X através da equação 5.35.

Uma vez calculados estes valores das forças E e de FS seguindo a mesma metodologia descrita na 6ª versão.

- 10ª Versão

Nesta versão, seguiu-se a mesma metodologia apresentada na 2ª versão, mas neste caso estudou-se a influência do parâmetro $\Delta y'_i$ no cálculo de FS.

Para tal consideraram-se três valores de $\Delta y'_i$. Tendo por base as figuras 5.5 e 5.10, estes são definidos por:

$$\Delta y'_{i,1} = y'_{i+1} - y_M \quad (5.74)$$

$$\Delta y'_{i,2} = y'_i - y_M \quad (5.75)$$

$$\Delta y'_{i,3} = y'_{i+1} - y_{b,i+1} \quad (5.76)$$

- 11ª Versão

Uma abordagem que se tentou foi, partindo da formulação do cálculo de FS apresentada por Fredlund, Krahn e Pufahl, tentar chegar à formulação apresentada por Janbu. A fórmula a que se chegou é bastante idêntica à apresentada por Janbu, porém apresenta ligeiras alterações.

Desta forma implementou-se a fórmula a que se chegou no programa de forma a ver os resultados a que se chegava.

Assim, o processo começa por uma versão simplificada de modo a obter um valor de FS a partir do qual se iniciará o cálculo com a versão rigorosa.

À semelhança das versões anteriores definiram-se constantes de forma a simplificar a escrita do algoritmo. As constantes definidas são:

$$A_0' = W^* \times \tan \phi' + \frac{c' \times \Delta x - U \times \tan \phi'}{\cos^2 \alpha} \quad (5.77)$$

$$B_0' = W \cdot k_h + \frac{W^* \times \tan \alpha}{n_\alpha} \quad (5.78)$$

onde n_α é definido pela equação 5.24.

O valor de FS é obtido pela aplicação da seguinte expressão:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{A_0'}{n_\alpha} \right)}{\sum (B_0')} \quad (5.79)$$

Com o novo valor de FS calcula-se ΔFS através da expressão 5.29. O processo iterativo termina assim que este toma um valor inferior à tolerância estipulada.

De seguida efetuou-se a versão rigorosa partindo como valor inicial de FS o valor obtido na versão anterior. O processo segue a mesma metodologia descrita na 1ª versão da formulação rigorosa havendo apenas alterações na expressão de cálculo de FS, passando este a ser calculado por:

$$FS = \frac{\sum \left(\frac{A_0' + \Delta X \times \tan \phi'}{n_\alpha} \right)}{W \cdot K_h + \frac{(W^* + \Delta X) \times \tan \alpha}{n_\alpha}} \quad (5.80)$$

Com os novos valores de FS calcula-se ΔFS através da expressão 5.29, utilizando este como critério de paragem assim que toma um valor inferior à tolerância.

- 12ª Versão

Nesta versão, o cálculo de FS foi feito considerando as forças X_n e E_n iguais a zero, e adotando uma nova metodologia para o cálculo das forças X baseada no valor do comprimento do braço no equilíbrio de momentos.

O processo segue a mesma metodologia aplicada na 2ª versão mas nestes caso as forças X são calculadas por:

$$X_{i+1} = \frac{E_{i+1} \times y_{rgt} - E_i \times y_{lft} + W \cdot k_h \times h/2}{\Delta x_i / 2} - X_i \quad (5.81)$$

Onde y_{lft} e y_{rgt} são obtidos da aplicação das equações 5.60 e 5.61 respetivamente.

- 13ª Versão

Nesta versão, à semelhança do que acontece na 10ª versão, estudou-se a influência do parâmetro $\Delta y'_i$ no cálculo de FS mas neste caso armazenando os valores de ΔX para a iteração seguinte.

O quadro seguinte faz a síntese das várias versões anteriormente descritas.

Quadro 5.1 – Quadro síntese – método de Janbu

	FKP	Janbu	Janbu*	Newton-Raphson	Li e White	< ΔFS	X _n =E _n =0	FS _{fact} e FS	Recalc N	y _{ift} e y _{rgt}	X e ΔX	Vetor ΔX	ΔX versão 2	Recalc ΔX e ΔE	Δy'
Simp. V1		X													
Simp. V2		X		X											
Simp. V3	X														
Gen. V1	X														
Gen. V2	X						X								
Gen. V3	X			X			X								
Gen. V4	X			X		X	X								
Gen. V5	X				X		X								
Gen. V6	X				X	X	X								
Gen. V7	X				X		X	X							
Gen. V8	X								X						
Gen. V9	X			X					X						
Gen. V10	X						X		X						
Gen. V11	X			X			X		X						
Gen. V12	X				X		X		X						
Gen. V13	X				X				X						
Gen. V14	X									X					
Gen. V15	X								X	X					
Gen. V16	X						X		X	X					
Gen. V17	X						X				X				
Rig. V1		X									X				
Rig. V2		X					X				X				
Rig. V3		X					X				X	X			
Rig. V4		X					X				X	X		X	
Rig. V5		X		X			X				X	X			
Rig. V6		X			X		X								
Rig. V7		X			X		X	X							
Rig. V8		X		X			X				X				
Rig. V9		X			X		X						X		
Rig. V10		X					X				X				X
Rig. V11		X													
Rig. V12		X					X			X					
Rig. V13		X					X				X	X			X

5.3.2. LINHA DE IMPULSO E CÁLCULO DAS FORÇAS ATUANTES NAS FATIAS

A definição da linha de impulso, tal como se viu anteriormente, é feita antes do cálculo de FS, sendo coincidente com os pontos extremos do talude e definida a 1/3 da altura das fatias ao longo do talude.

As forças de interação entre fatias são calculadas ao longo do processo, uma vez que estas são utilizadas para no cálculo de FS.

As forças N e T são calculadas conforme a formulação que se segue. No caso da formulação apresentada por Fredlund, Krahn e Pufahl, estas forças são calculadas por:

$$N'_i = N_i - U_i \quad (5.82)$$

$$T_i = \frac{c' + (N_i - U_i) \times \tan \phi'}{FS} \quad (5.83)$$

No caso da formulação apresentada por Janbu, são calculadas como sendo:

$$N'_i = (W_i \cdot \cos \alpha + \Delta X_i) \times \cos \alpha - (\Delta E_i + W_i \cdot k_h) \times \sin \alpha - U_i \quad (5.84)$$

$$T_i = (W_i \cdot \sin \alpha + \Delta X_i) \times \sin \alpha + (\Delta E_i + W_i \cdot k_h) \times \cos \alpha \quad (5.85)$$

6

CASOS DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. GENERALIDADES

Feita a apresentação das rotinas implementadas no programa, apresentam-se agora alguns casos de estudo de forma a analisar e comparar os valores obtidos no programa TALUDES_Mv1 com os obtidos nos programas comerciais Slope e Slide, assim como com os obtidos pelos métodos já implementados e validados no programa (método de Correia e método de Morgenstern-Price).

Serão apresentados 3 casos de estudo tendo como objetivo estudar os resultados obtidos da análise de superfícies circulares, da análise de superfícies poligonais e analisar a problemática associada ao método de Janbu.

De forma a garantir que a análise pelos diferentes programas seja feita sobre a mesma superfície de deslizamento, e uma vez que o modo de incrementação de raios no programa Slide é diferente da utilizada nos outros programas, optou-se por definir uma malha de centros com um dado espaçamento no programa Slide, retirando depois as coordenadas do centro e o raio da superfície crítica para implementar nos outros programas. Desta forma fica garantido que todos os programas estão a analisar a mesma superfície de deslizamento.

6.2. CASO DE ESTUDO 1

O primeiro caso de estudo diz respeito a um talude apresentado no tutorial do programa Slide para o qual são realizados quatro estudos paramétricos: talude constituído por um material homogêneo; talude constituído por três materiais distintos; talude constituído por três materiais distintos e com introdução de um coeficiente de ação sísmica horizontal igual a 0,15; talude constituído por três materiais distintos e com introdução de nível freático à cota do pé do talude.

6.2.1. EXEMPLO 1.1

Para o primeiro exemplo foram consideradas as propriedades do material constituinte e a geometria do talude apresentadas no quadro 6.1 e figura 6.1 respetivamente.

Quadro 6.1 – Propriedades do material

c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)
3,0	19,6	20

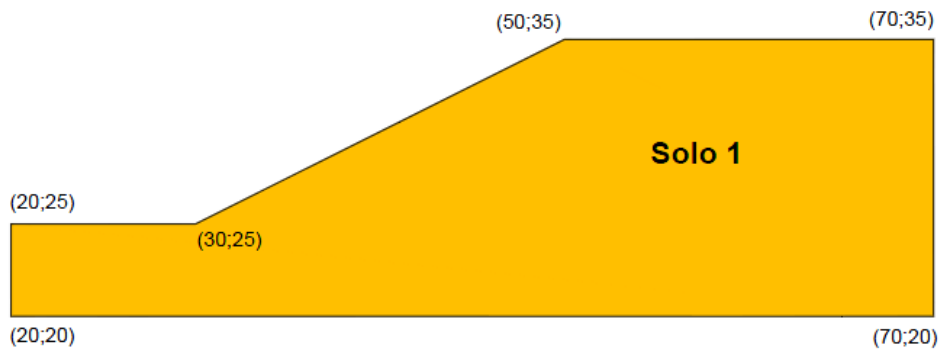


Fig. 6.1 – Exemplo 1.1

Para este caso, considerou-se no programa Slide uma malha de centros com as coordenadas (22,8 ; 62,6), (22,8 ; 42,3), (43,7 ; 62,6) e (43,7 ; 42,3) e com 20 intervalos segundo a direção horizontal e vertical.

6.2.1.1. Método de Spencer

Efetuada a análise do primeiro exemplo pelo método de Spencer, obteve-se uma superfície de deslizamento crítica com o centro em (29,070 ; 55,495) e raio igual a 30,496m, a que correspondem os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.2 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.1)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,985	0,985	0,986

As superfícies de deslizamento obtidas são constituídas por 26 fatias e apresentam-se nas figuras 6.2 a 6.4:

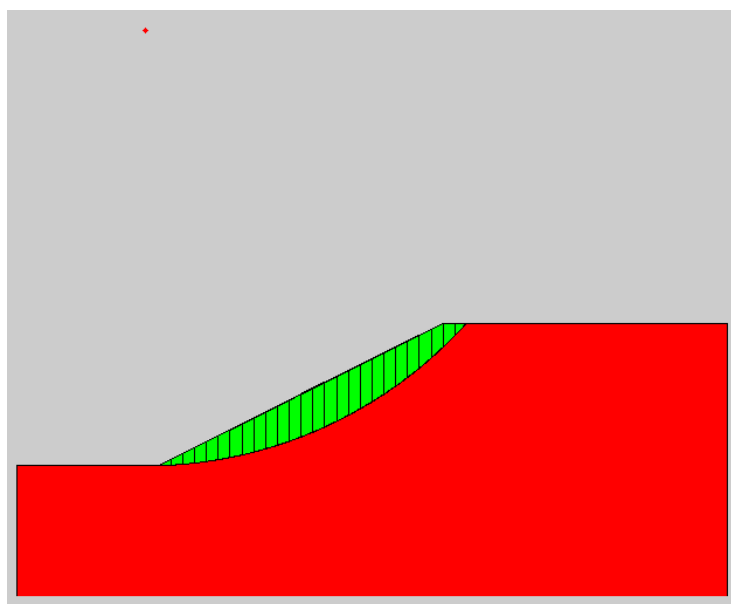


Fig. 6.2 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - TALUDES_Mv1)

0.985

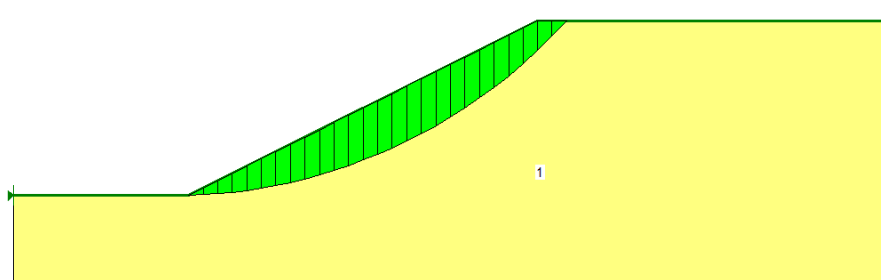


Fig. 6.3 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - Slope)

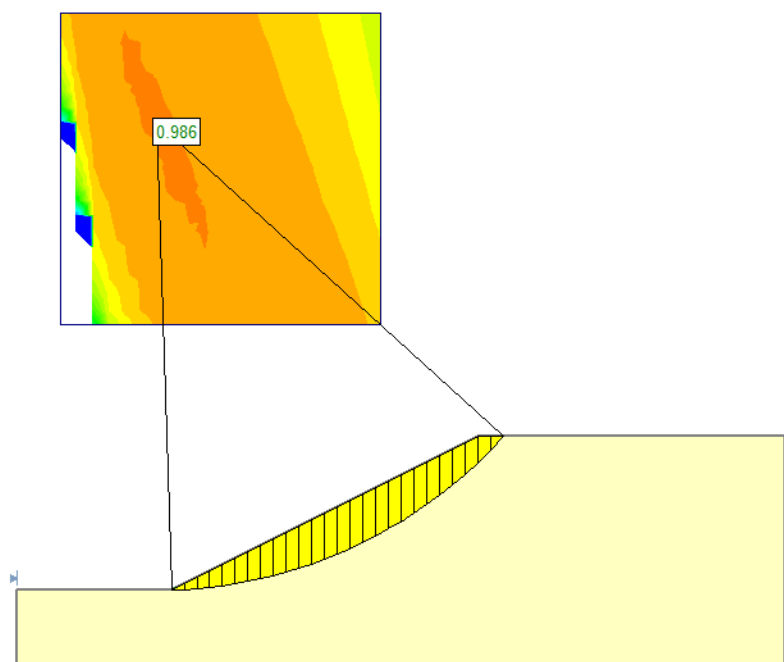


Fig. 6.4 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.1 - Slide)

Analisando os valores apresentados no quadro 6.2 e as figuras 6.2, 6.3 e 6.4 conclui-se que em todos os programas foi estudada a mesma superfície de deslizamento crítica, tendo estes apresentado valores do fator de segurança muito semelhantes.

No que diz respeito aos valores das tensões normal e de corte na base das fatias obtidos pelos diferentes programas, estes encontram-se representados nas figuras 6.5 e 6.6:

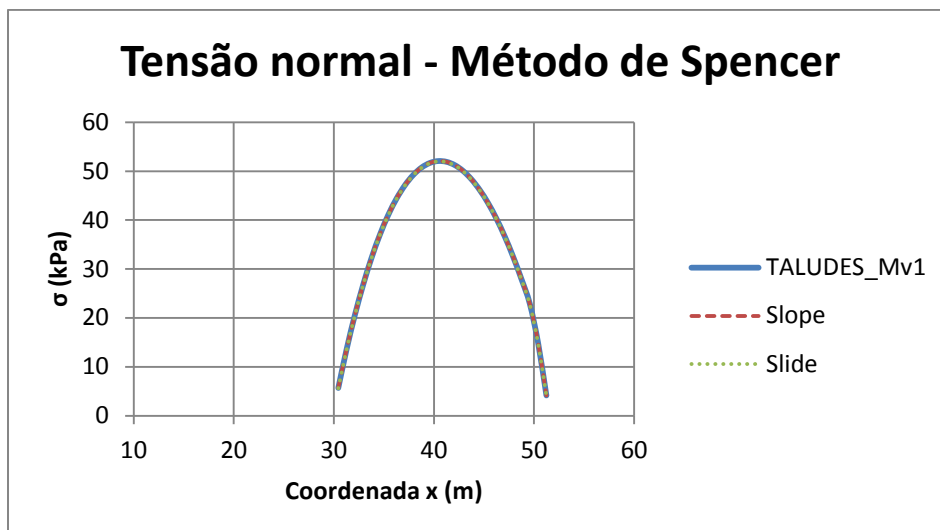


Fig. 6.5 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.1)

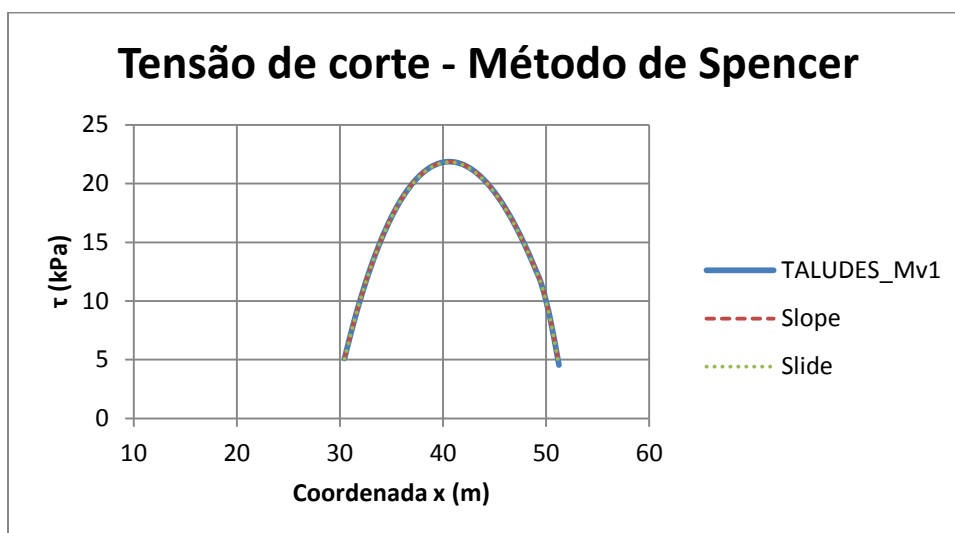


Fig. 6.6 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.1)

Analisando os gráficos obtidos verificamos que todos os programas apresentam a mesma distribuição de tensões na base ao longo da superfície de deslizamento.

No que concerne à distribuição das forças de interação entre fatias, estas encontram-se representadas nas figuras 6.7 e 6.8.

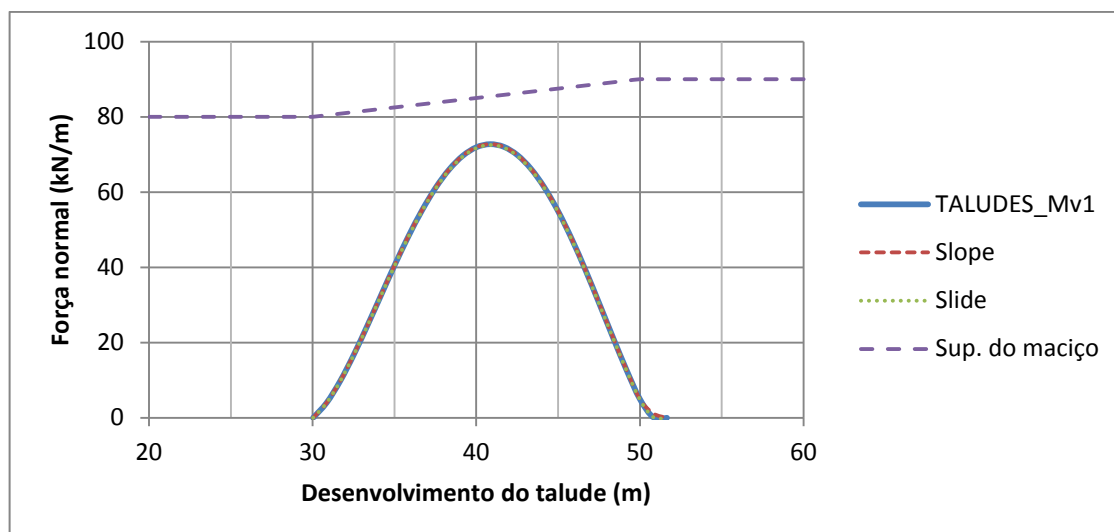


Fig. 6.7 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.1)

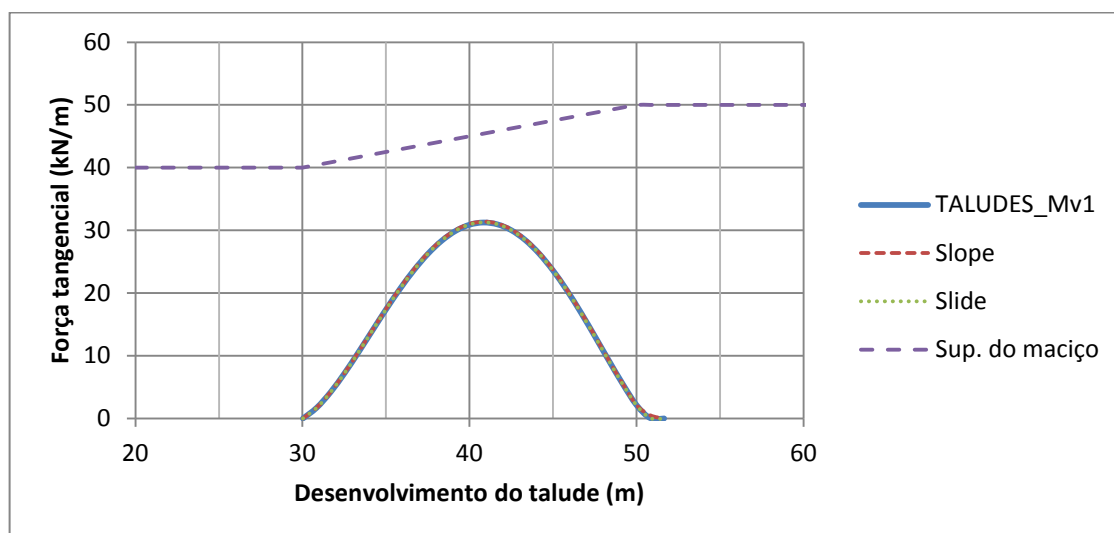


Fig. 6.8 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.1)

Pela observação das figuras percebe-se que todos os programas apresentam a mesma distribuição de forças de interação entre fatias.

Uma vez calculadas as forças atuantes na base e nas faces das fatias, determina-se a linha de impulso ao longo do talude. A figura 6.9 ilustra a linha de impulso obtida.

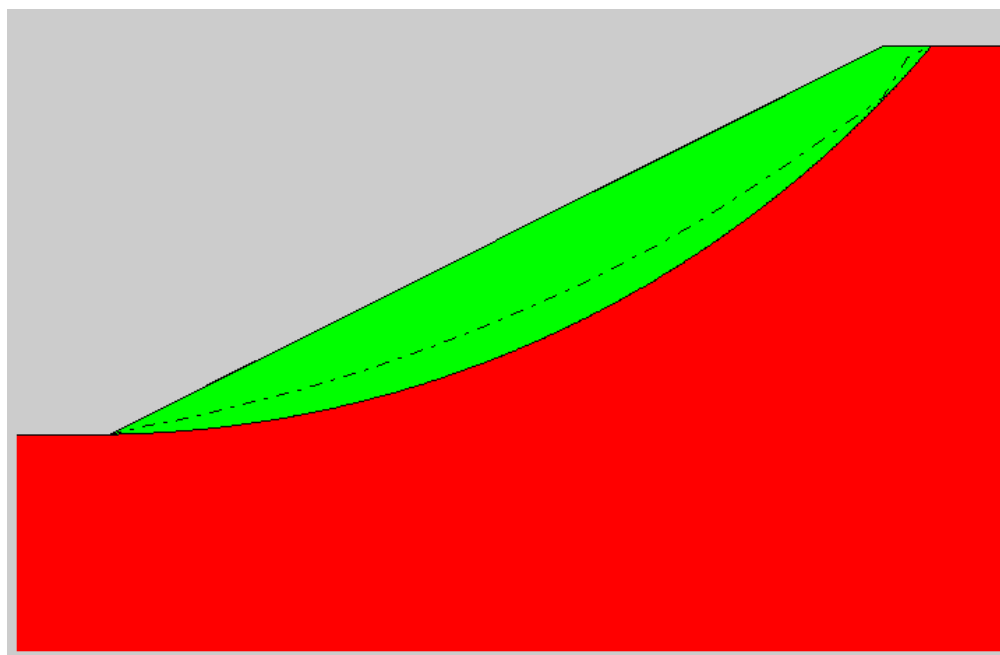


Fig. 6.9 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.1)

Pela observação da imagem verifica-se que a linha de impulso se encontra contida entre a superfície de deslizamento e a superfície do maciço, o que significa que toda a massa deslizante se encontra à compressão não havendo por isso necessidade de colocar uma fenda de tração para um cálculo mais realista do fator de segurança.

6.2.1.2. Método de Janbu

Analisando agora o mesmo problema mas utilizando as versões simplificada e rigorosa do método de Janbu, obtiveram-se respetivamente as superfícies de deslizamento com centro em (33,250 ; 45,345) e raio igual a 20,511m e com centro em (31,160 ; 51,435) e raio igual a 26,411m. Os valores do fator de segurança obtidos pelos programas apresentam-se nos quadros 6.3 e 6.4.

Quadro 6.3 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.1)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,943	0,937	0,938

Quadro 6.4 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.1)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,989	-	0,990

Importa salientar que o programa Slope apenas permite calcular o fator de segurança utilizando a versão simplificada do método. No caso do Slide é possível calcular pela versão simplificada e pela versão corrigida em que, como foi dito anteriormente, o valor do fator de segurança resulta da multiplicação do valor obtido pela versão simplificada por um coeficiente que depende do tipo de solo que constitui o talude.

Em relação ao programa TALUDES_Mv1, este permite o cálculo das duas versões (simplificada e rigorosa), tendo sido escolhido entre as várias versões implementadas relativas à versão rigorosa, o valor que mais se aproximava do obtido pelos restantes métodos. Mais à frente será analisada a problemática associada ao método de Janbu no que diz respeito à convergência dos resultados finais do fator de segurança e das forças atuantes nas fatias.

As superfícies de deslizamento obtidas são constituídas por 26 fatias e encontram-se representadas nas figuras 6.10 a 6.12.

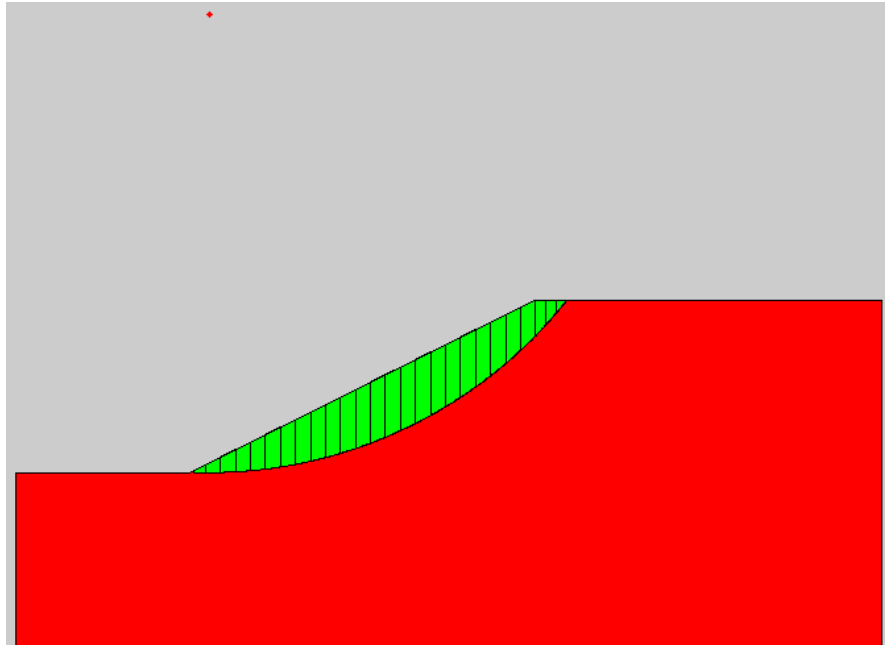


Fig. 6.10 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – TALUDES_Mv1)

0.937

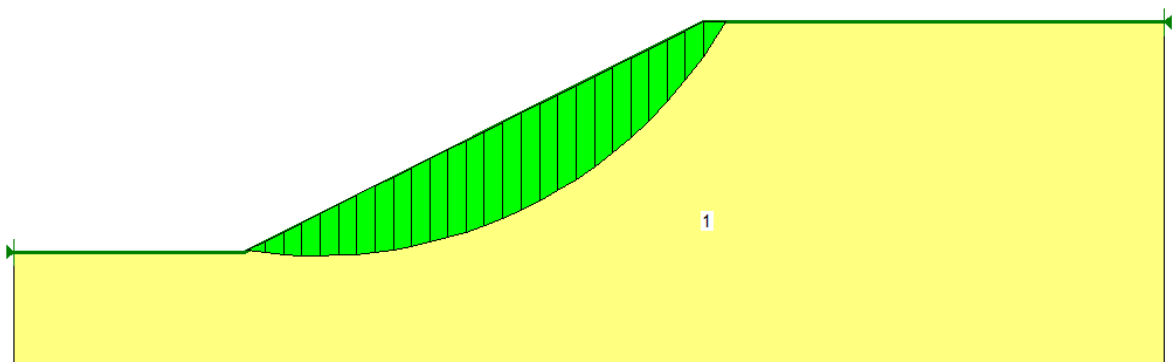


Fig. 6.11 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – Slope)

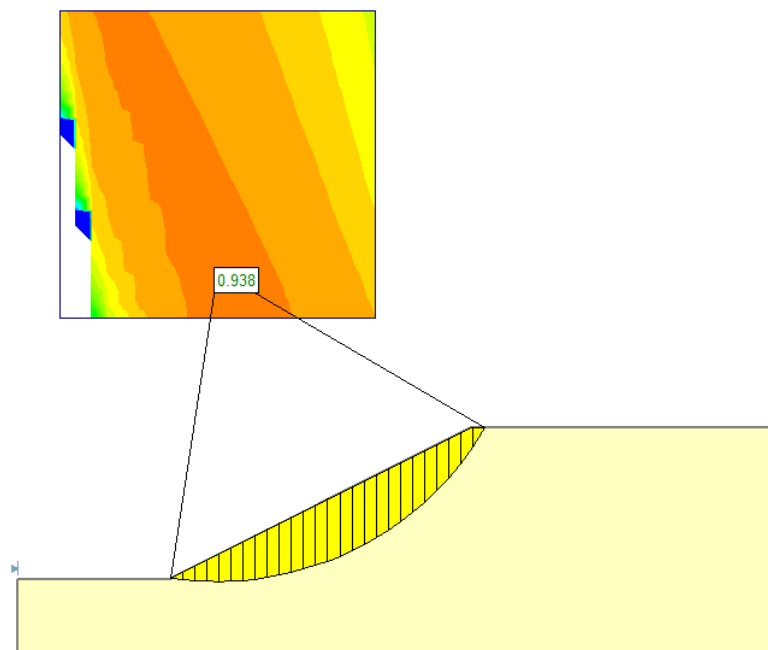


Fig. 6.12 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.1 – Slide)

Em relação às tensões atuantes na base das fatias, estas encontram-se representadas nas figuras 6.13 e 6.14.

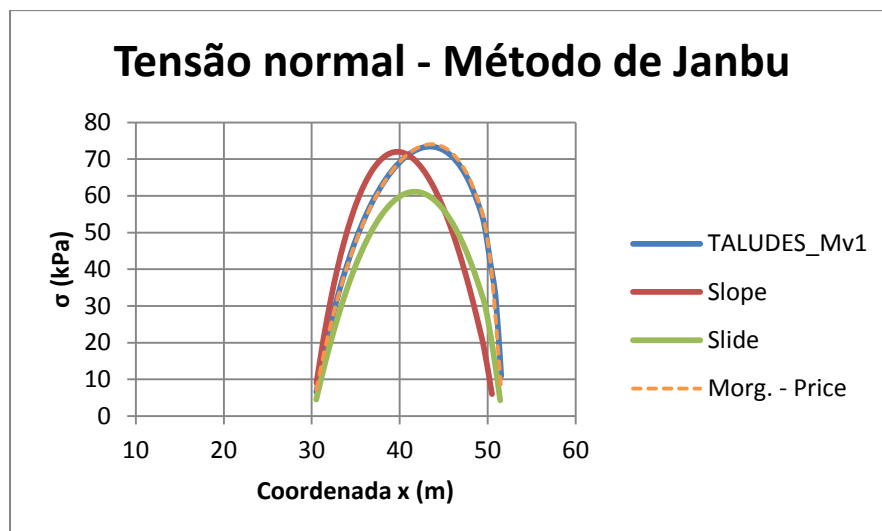


Fig. 6.13 - Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.1)

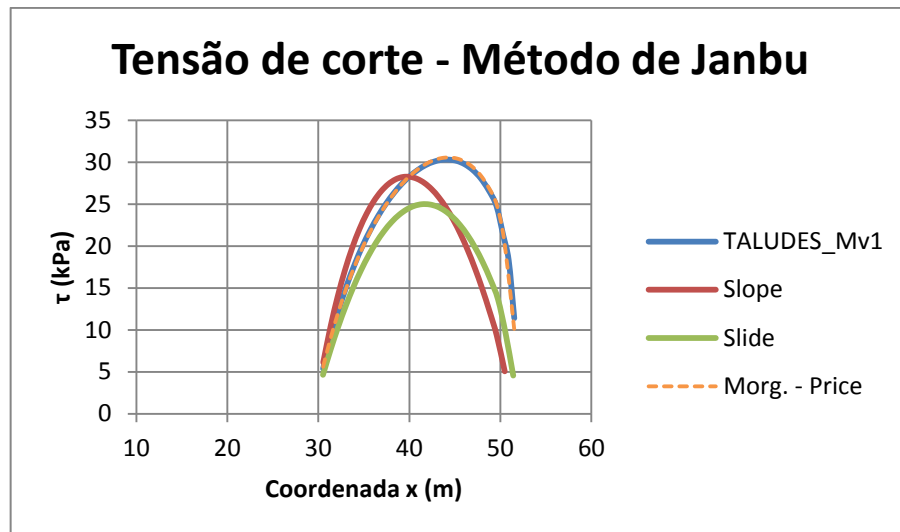


Fig. 6.14 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.1)

Da observação e análise das figuras anteriores verificamos que todos os programas apresentam a uma distribuição de tensões semelhante ao longo das fatias. As diferenças de valores entre os vários programas podem ser explicadas pelo facto de os três utilizarem diferentes formas de cálculo, isto é, no caso do TALUDES_Mv1, este utiliza a versão rigorosa do método, no caso do Slope, utiliza a versão simplificada, e no caso do Slide, utiliza a versão corrigida. Uma vez que tal acontece, adicionou-se a distribuição de tensões por outro método rigoroso, método de Morgenstern-Price, de forma a ter-se termos equiparáveis. Pela observação da figura verificamos uma total coincidência de valores entre os métodos de Janbu e de Morgenstern-Price.

Em relação às forças de interação entre fatias importa salientar que os programas Slope e Slide apenas calculam as forças normais entre fatias. Desta forma apenas existem valores das forças de interação tangenciais resultantes do programa TALUDES_Mv1.

As figuras 6.15 e 6.16 mostram a distribuição das forças de interação entre fatias ao longo do talude.

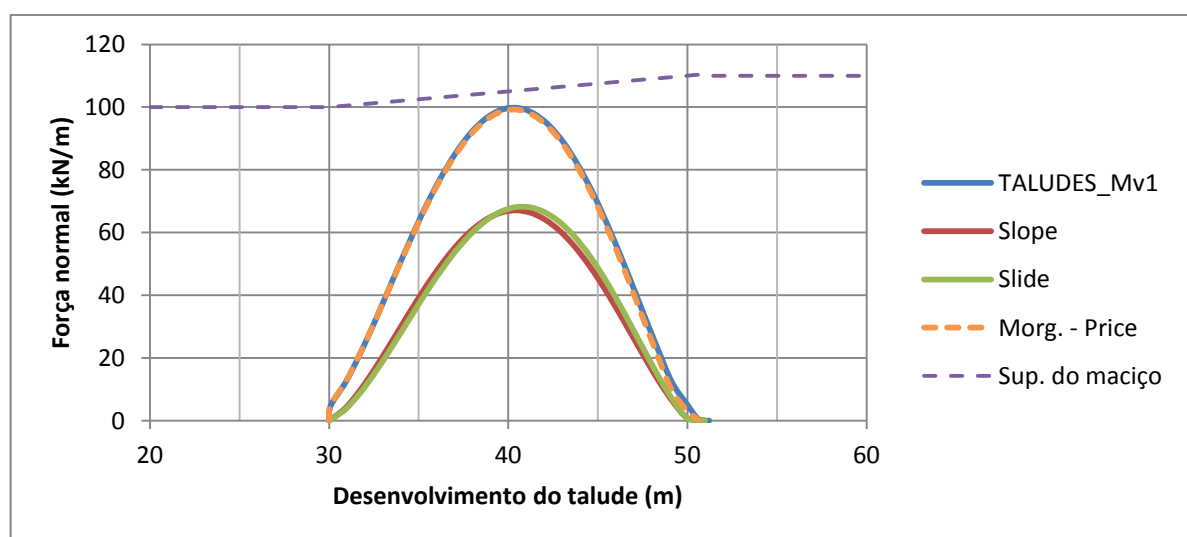


Fig. 6.15 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.1)

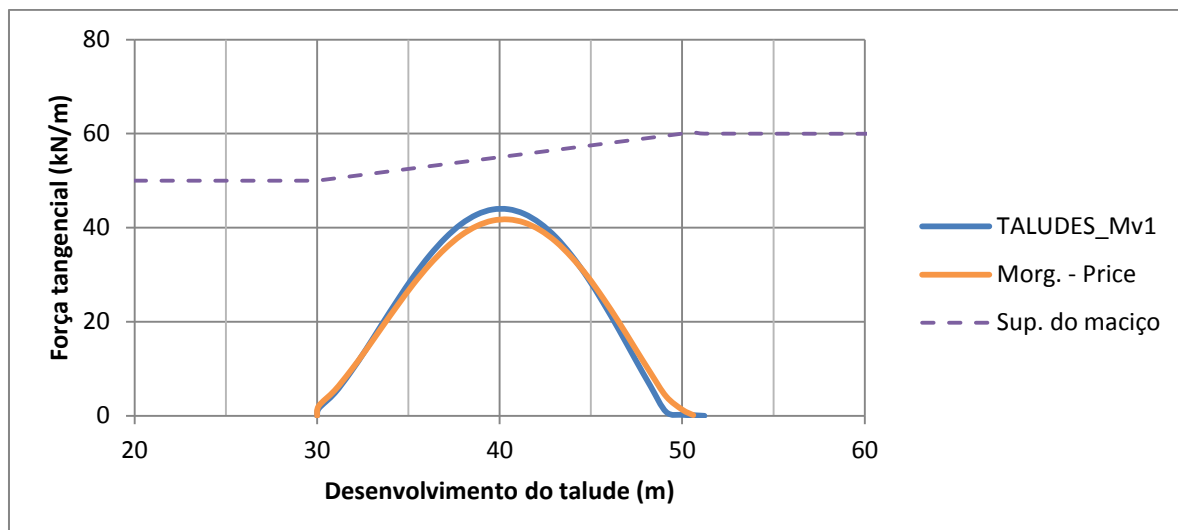


Fig. 6.16 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.1)

Da observação das figuras 6.15 e 6.16 verificamos que todos os programas apresentam uma distribuição de forças idêntica ao longo do talude havendo porém ligeiras diferenças que podem estar relacionadas com o facto de os três programas utilizarem métodos de cálculo distintos. Em comparação com outro método rigoroso verifica-se que os dois métodos chegam a valores coincidentes ou muito próximos entre eles.

Em relação à linha de impulso tal como foi dito anteriormente esta é definida antes do cálculo do fator de segurança e das forças atuantes nas fatias.

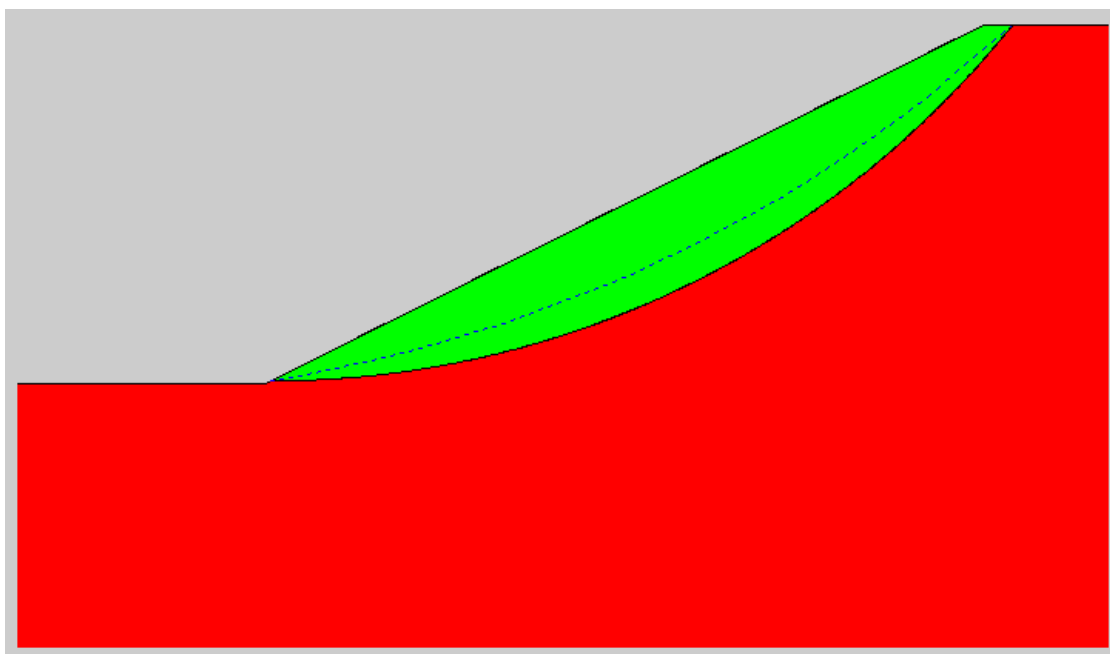


Fig. 6.17 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.1)

6.2.1.3. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos vários métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.5 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.1)

Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
0,985	0,985	0,985	0,989

Assim, verifica-se que todos os métodos implementados convergem para valores muito semelhantes. Outro facto interessante está relacionado com o número de iterações e o tempo necessário para os métodos convergirem. O quadro seguinte mostra o número de iterações e o tempo necessário para os diferentes métodos:

Quadro 6.6 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.1)

	Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
nº iterações	4	7	5	7
tempo (s)	0,183	0,155	0,5	0,347

Pela observação do quadro verifica-se que o método mais rápido é o método de Morgenstern-Price tendo precisado de 7 iterações e 0,155 segundos para convergir. Embora o método de Spencer seja um método que necessite de menos iterações em comparação com o de Morgenstern-Price ou Janbu, este demora mais tempo a convergir uma vez que o modo de cálculo a ele associado exige um maior processamento de cálculo.

6.2.2. EXEMPLO 1.2

Para este exemplo foi considerada a mesma geometria do exemplo anterior mas neste caso o talude é constituído por três materiais distintos. As propriedades dos materiais e a sua distribuição no talude encontram-se apresentadas no Quadro 6.7:

Quadro 6.7 – Propriedades dos materiais

	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)
Solo 1	0,0	38,0	19,5
Solo 2	5,3	23,0	19,5
Solo 3	7,2	20,0	19,5

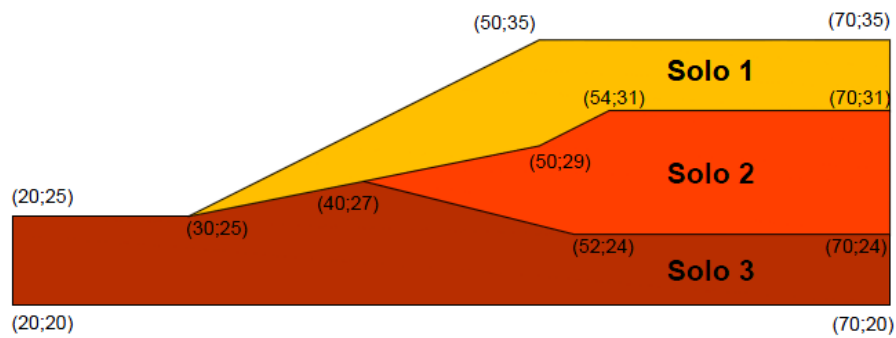


Fig. 6.18 – Exemplo 1.2

Para a análise deste exemplo foi considerada uma malha de centros com as coordenadas (22,8 ; 55), (22,8 ; 34,7), (43,7 ; 55) e (43,7 ; 34,7) dividida em 20 intervalos segundo a direção horizontal e vertical.

6.2.2.1. Método de Spencer

Da análise deste exemplo pelo programa Slide, resultou uma superfície de deslizamento crítica com centro nas coordenadas (34,295 ; 42,820) e raio igual a 18,432m. Analisando esta superfície pelos diferentes programas obtiveram-se os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.8 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.2)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,373	1,372	1,374

Pela observação dos valores obtidos verificamos que todos os programas chegaram a valores muito semelhantes entre eles havendo apenas uma pequena diferença na terceira casa decimal.

Embora a geometria do talude seja igual à do exemplo anterior, verifica-se que houve uma aumento do valor do fator de segurança uma vez que os solos que constituem o maciço neste exemplo apresentam melhores propriedades mecânicas do que o solo do exemplo anterior.

As superfícies de deslizamento obtidas são constituídas por 27 fatias e encontram-se representadas nas figuras 6.19 a 6.21:

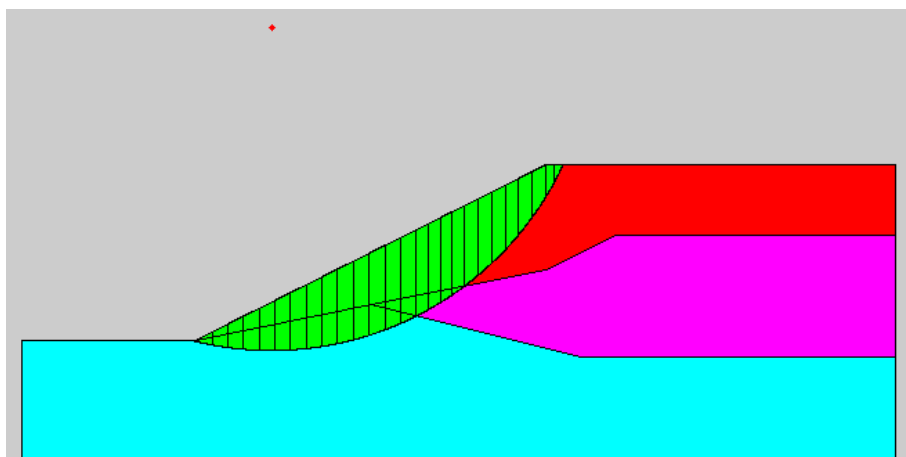


Fig. 6.19 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – TALUDES_Mv1)

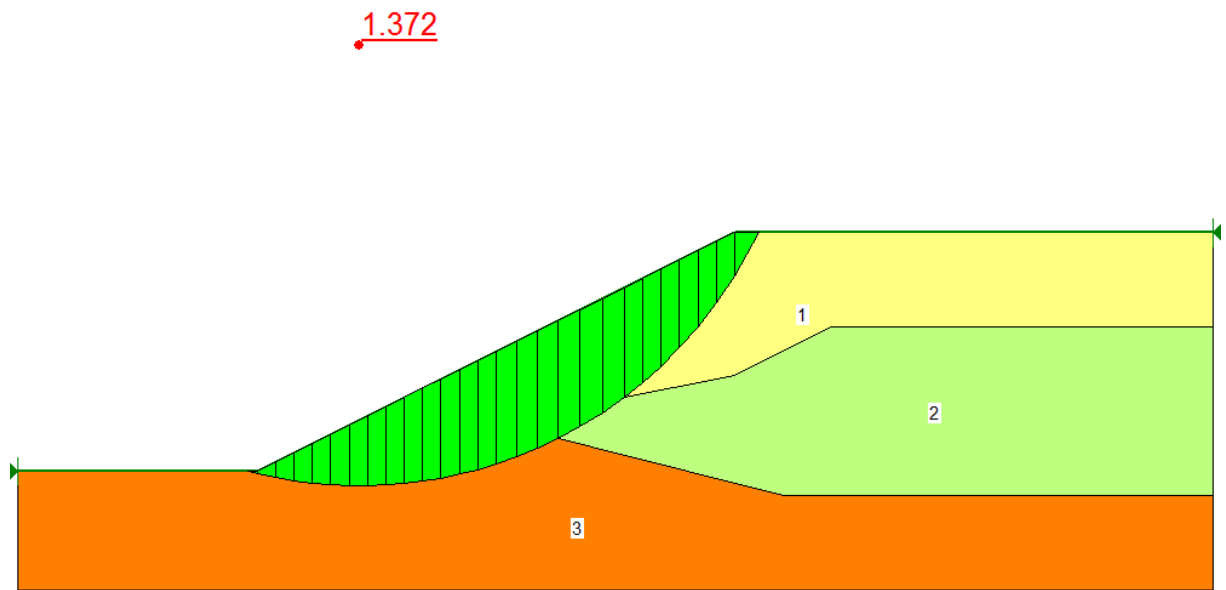


Fig. 6.20 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – Slope)

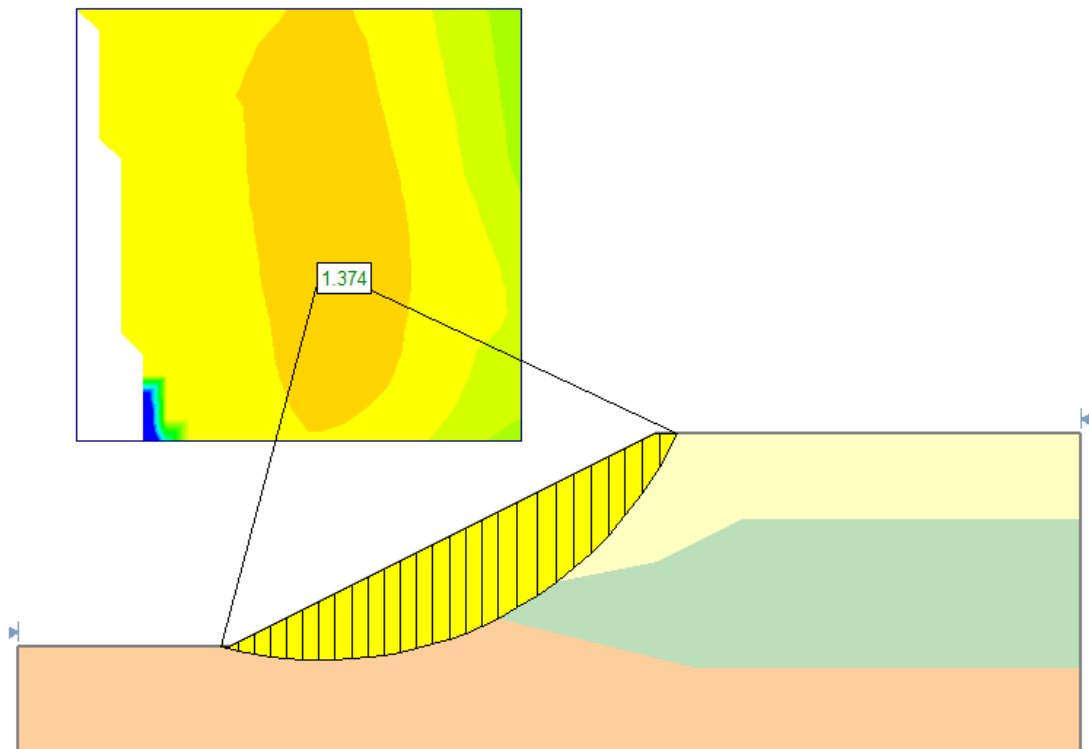


Fig. 6.21 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.2 – Slide)

Em relação às tensões atuantes na base das fatias, estas encontram-se representadas nas figuras 6.22 e 6.23:

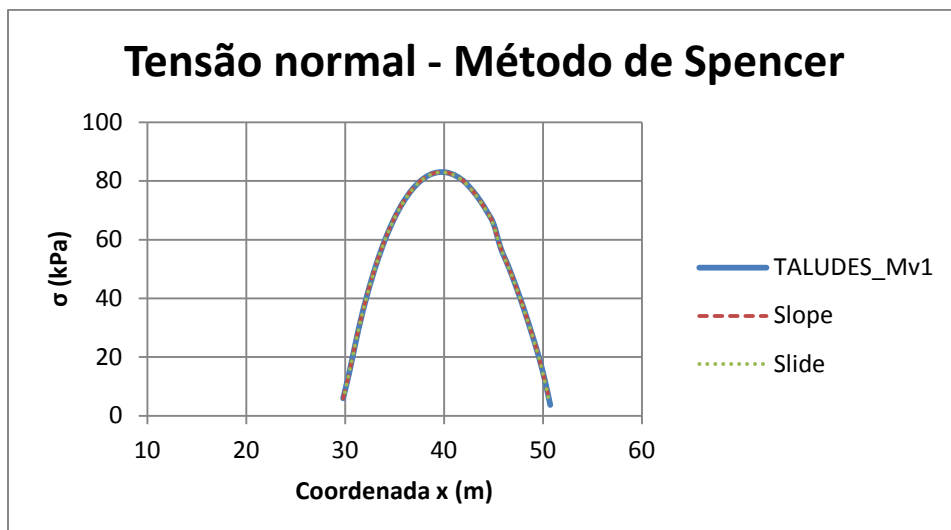


Fig. 6.22 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.2)

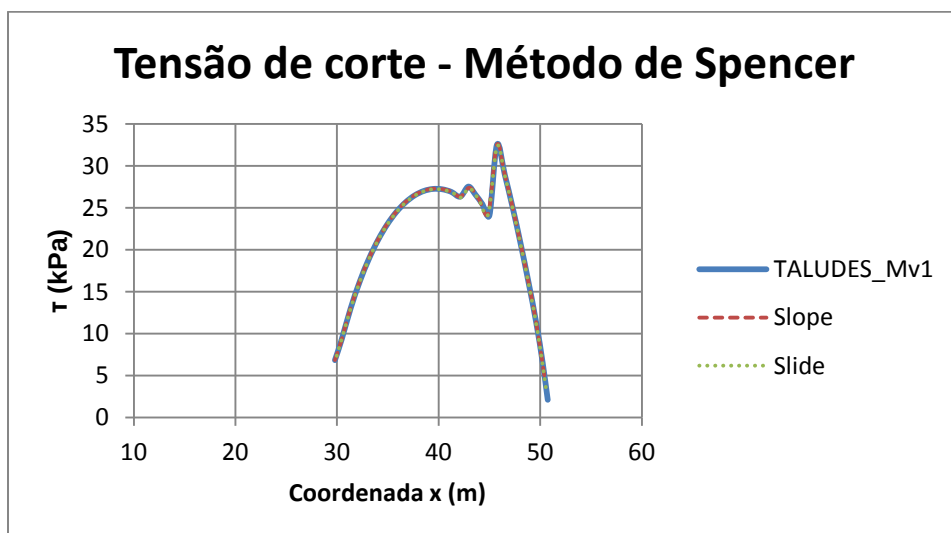


Fig. 6.23 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.2)

Da observação das figuras verificamos que todos os programas apresentam uma distribuição idêntica de tensões ao nível da base das fatias.

Em relação à distribuição de forças de interação entre fatias ao longo da superfície de deslizamento, esta encontra-se representada nas figuras 6.24 e 6.25.

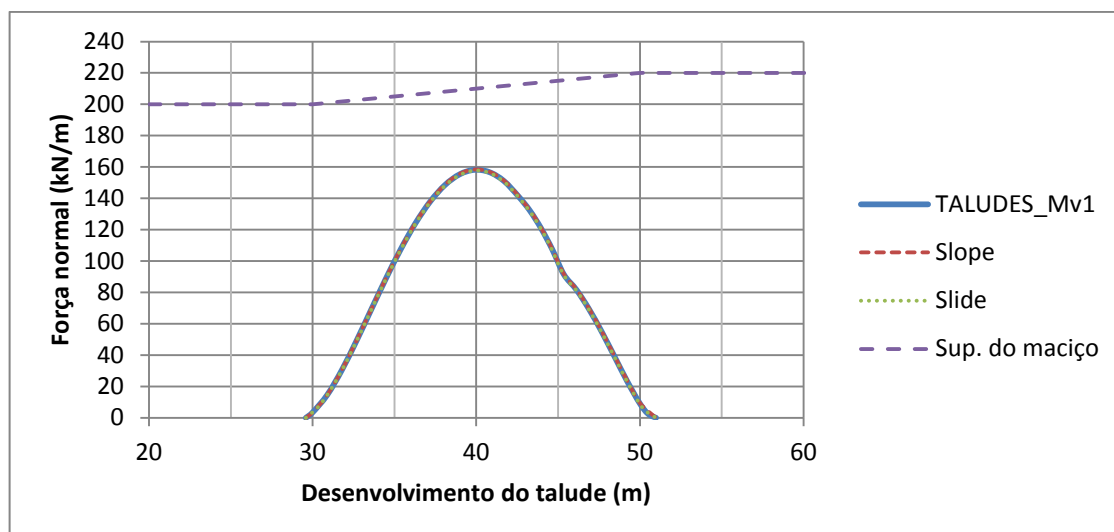


Fig. 6.24 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.2)

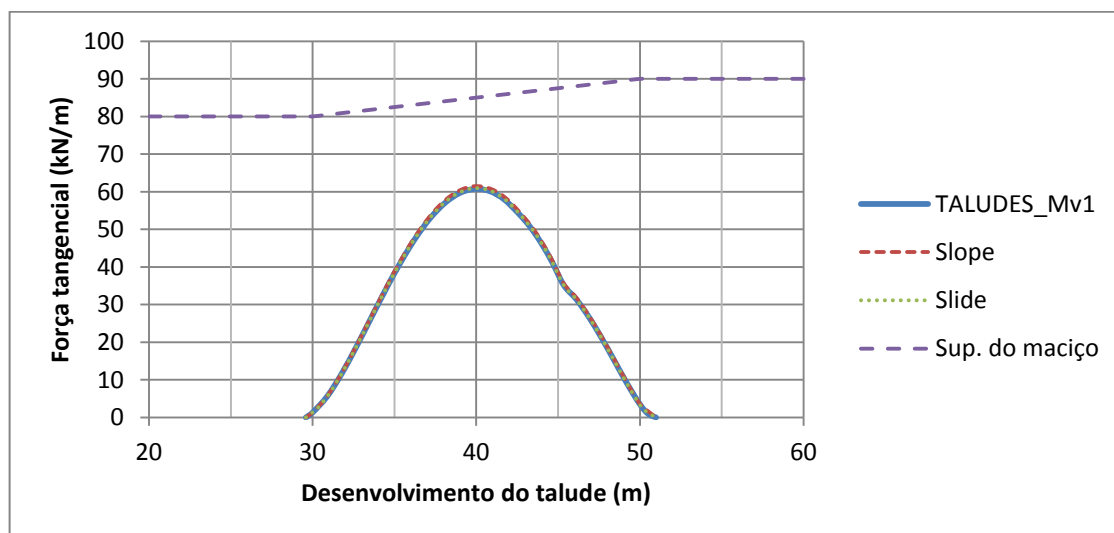


Fig. 6.25 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.2)

Verifica-se que todos os programas apresentam uma distribuição de forças de interação entre fatias equivalente.

Uma vez calculadas as forças atuantes nas fatias define-se a trajetória da linha de impulso.

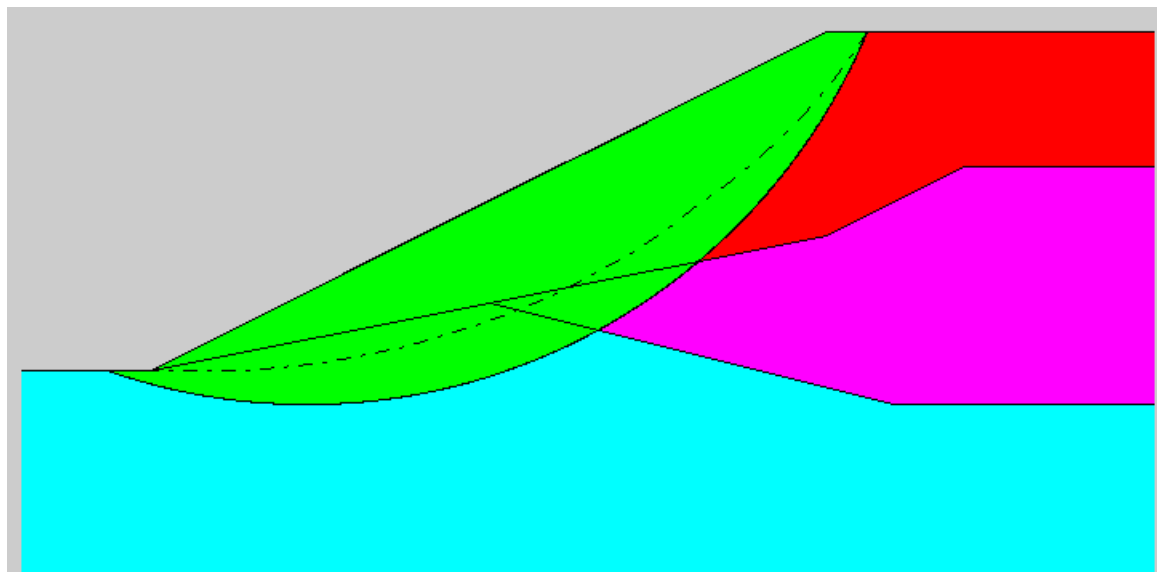


Fig. 6.26 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.2)

Da observação da figura verifica-se que a linha de impulso se encontra na zona delimitada entre a superfície de maciço e a superfície de deslizamento, o que significa que toda a massa deslizante se encontra à compressão, não havendo por isso necessidade de introduzir uma fenda de tração para que o valor do fator de segurança seja o mais próximo possível da realidade.

6.2.2.2. Método de Janbu

Efetuada a análise deste exemplo utilizando agora a versão simplificada e rigorosa do método de Janbu, a superfície crítica associada a este método, tanto na versão simplificada como na rigorosa, tem como centro as coordenadas (35,340 ; 39,775) e raio de valor 16,063m. Após análise pelos vários programas obtiveram-se os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.9 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.2)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,258	1,258	1,260

Quadro 6.10 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.2)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,379	-	1,357

Pela observação dos quadros verificamos que embora os valores sejam idênticos até à casa das décimas existem ligeiras alterações nas restantes casas decimais entre os programas. Esta diferença pode estar associada à complexidade e à forma como o processo de cálculo é desenvolvido nos diferentes programas.

As superfícies de deslizamento são constituídas por 27 fatias e encontram-se de seguida representadas:

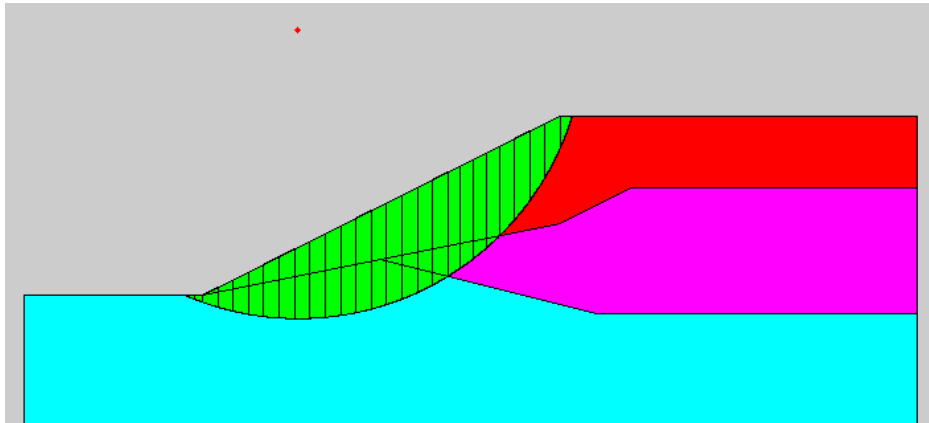


Fig. 6.27 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – TALUDES_Mv1)

1.257

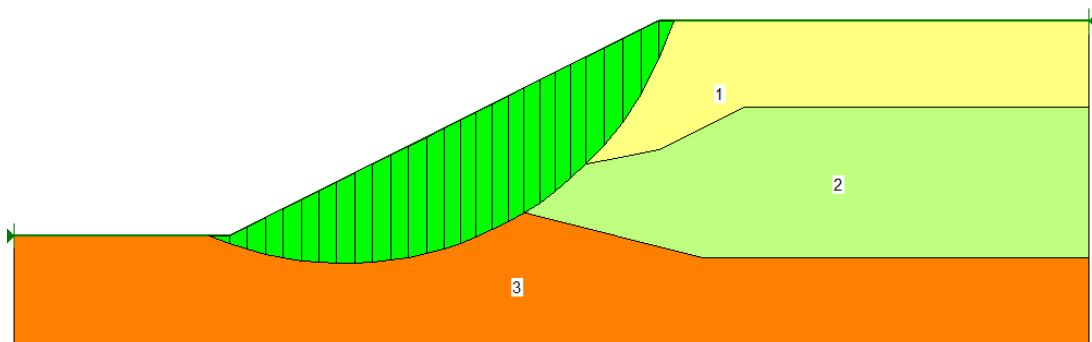


Fig. 6.28 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – Slope)

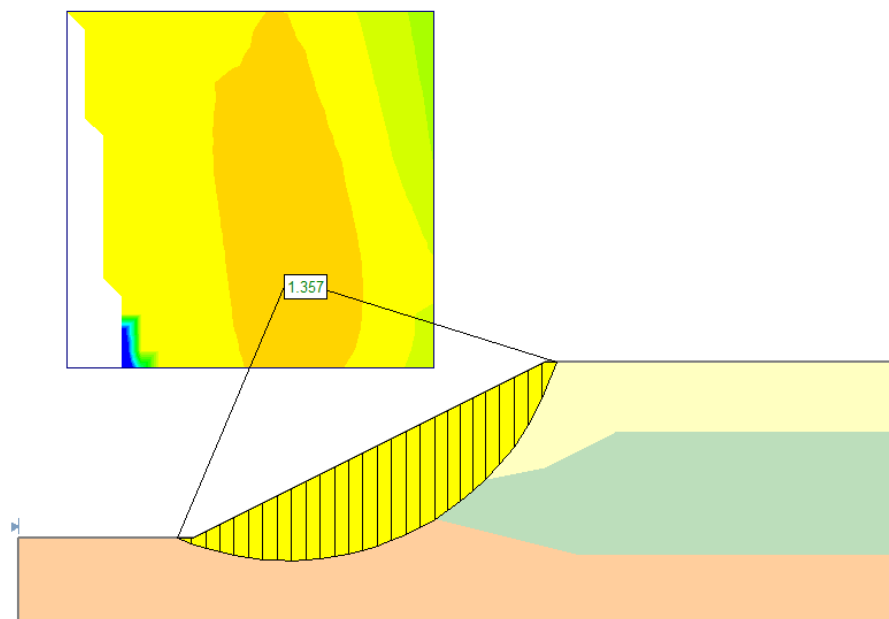


Fig. 6.29 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.2 – Slide)

No que diz respeito às tensões atuantes na base das fatias, estas encontram-se representadas nas figuras 6.30 e 6.31:

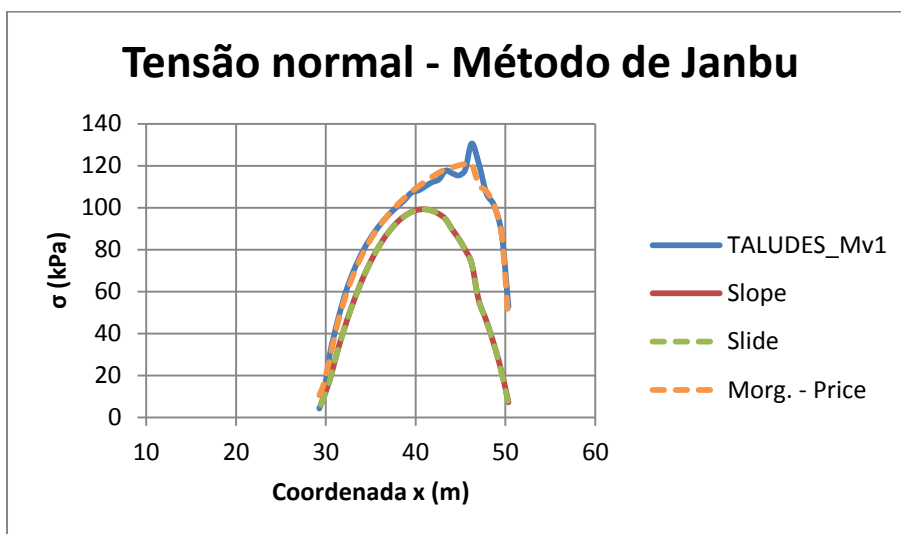


Fig. 6.30 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.2)

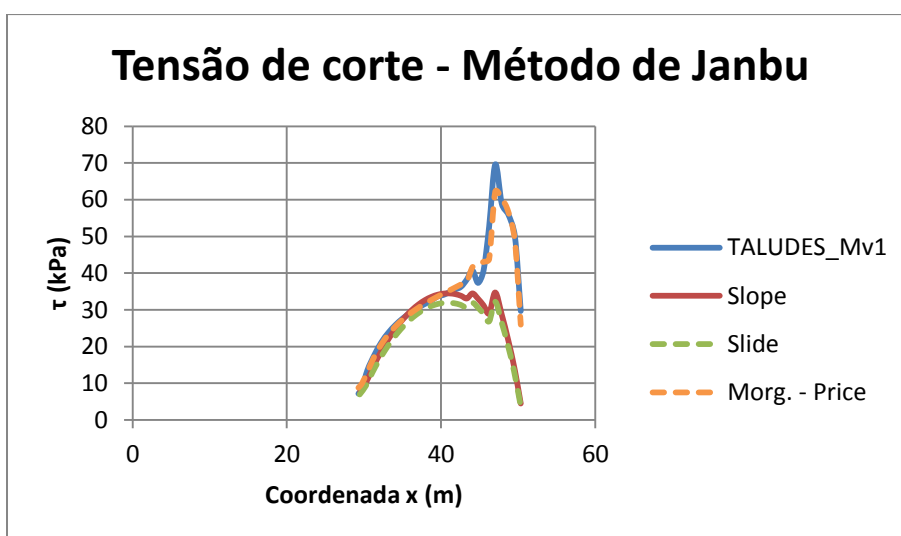


Fig. 6.31 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.2)

Pela observação das figuras verifica-se que os programas Slope e Slide apresentam uma distribuição e valores muito semelhantes entre eles. Já o programa TALUDES_Mv1, numa primeira parte apresenta uma distribuição idêntica à dos programas comerciais mas a partir de um certo ponto diverge consideravelmente. Comparando com a distribuição relativa ao método de Morgenstern-Price, verifica-se que as duas distribuições são similares havendo apenas pequenas diferenças na zona de tensão mais elevada.

Em relação às forças de interação entre fatias estas apresentam a seguinte distribuição:

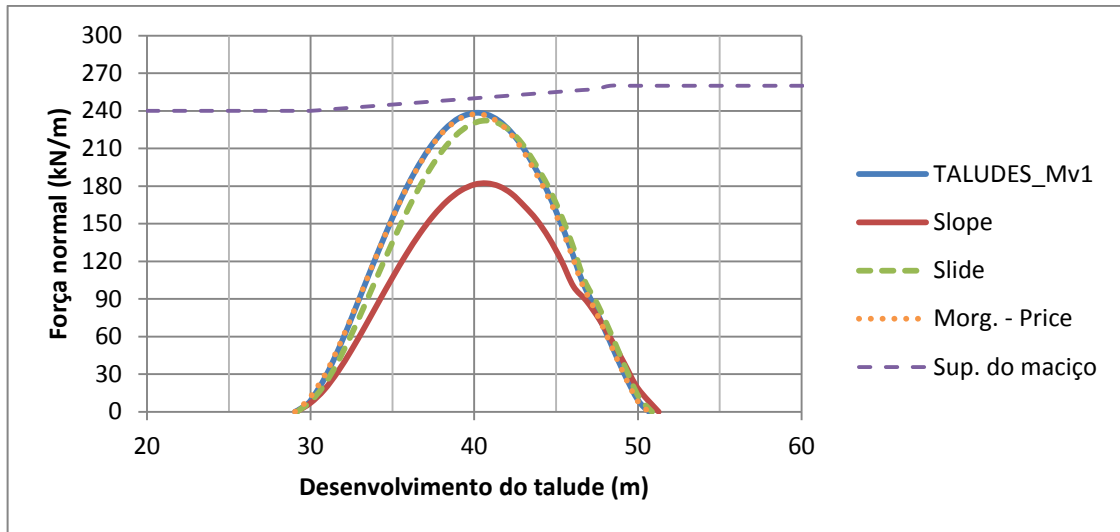


Fig. 6.32 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.2)

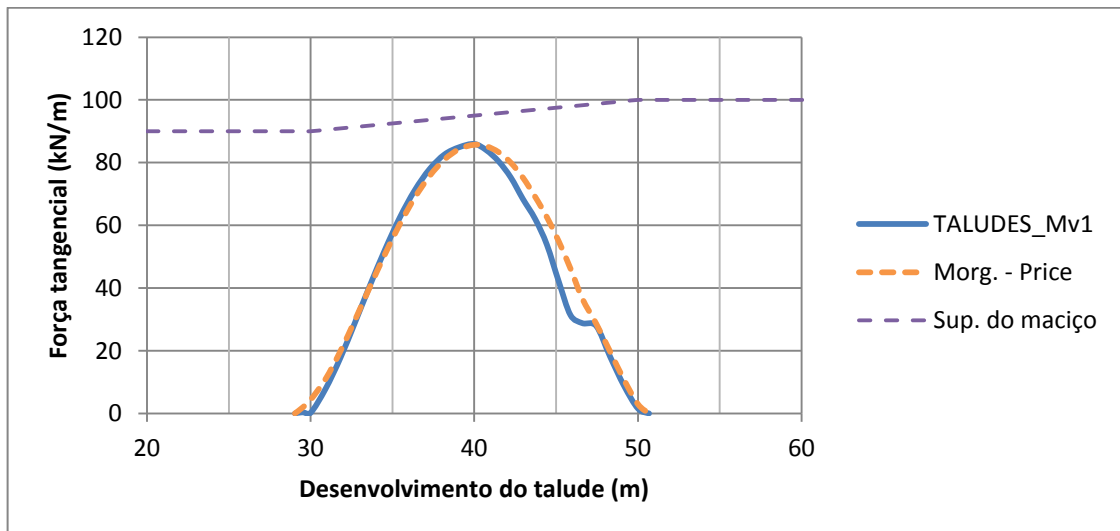


Fig. 6.33 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.2)

Em relação às forças de interação verifica-se que todos programas apresentam uma distribuição idêntica. No que diz respeito à força normal, verifica-se uma proximidade muito grande entre os valores apresentados pelo programa TALUDES_Mv1 e o programa Slide, havendo até uma parte onde os valores são coincidentes. Comparando com o método de Morgenstern-Price verifica-se total coincidência ao longo da superfície de deslizamento.

No que concerne à força tangencial, verifica-se uma coincidência de valores entre os dois métodos havendo apenas uma pequena parte onde os valores diferem um pouco entre eles.

A linha de impulso é definida antes do cálculo do fator de segurança e das forças atuantes na base e nas faces das fatias e tem a seguinte configuração:

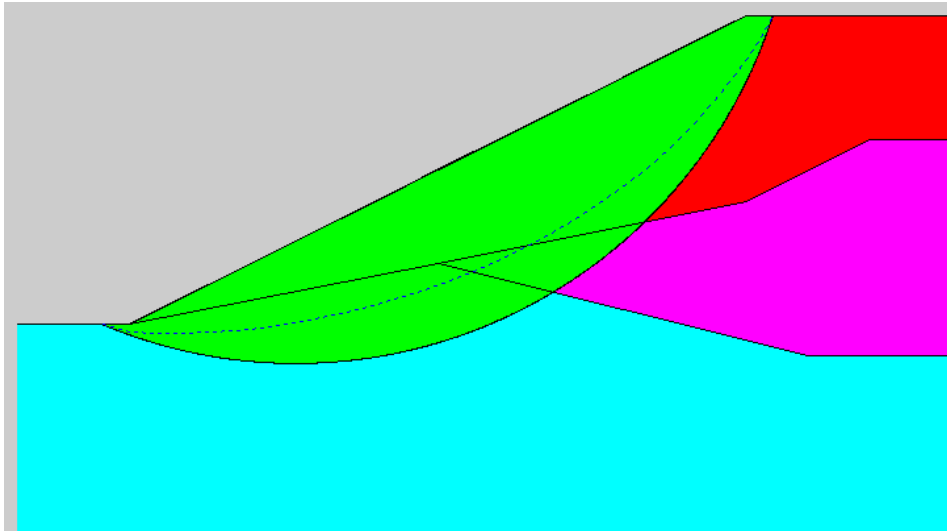


Fig. 6.34 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.2)

6.2.2.3. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.11 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.2)

Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
1,371	1,373	1,373	1,379

Desta forma verifica-se que todos os métodos implementados convergem para valores de fator de segurança muito semelhantes entre eles. No que diz respeito ao número de iterações e tempo necessário para a convergência de valores obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.12 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.2)

	Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
nº iterações	5	9	4	7
tempo (s)	0,179	0,190	0,764	0,451

Da observação do quadro e em comparação com o exemplo anterior verifica-se que todos os métodos precisaram de mais tempo para convergir. Um facto curioso está relacionado com o método de Spencer em que, embora tenha demorado mais tempo, neste exemplo convergiu em menos uma iteração em comparação com o anterior. O método de Correia mostrou ser o método mais rápido e o de Spencer o mais demorado, dada a necessidade de um maior processamento de cálculo a ele associado.

6.2.3. EXEMPLO 1.3

Neste exemplo utilizou-se a mesma geometria e características dos materiais do exemplo 1.2 mas adicionou-se um coeficiente de ação sísmica horizontal (k_h) de 0,15.

Para a análise deste exemplo escolheu-se a mesma malha de centros e o mesmo número de intervalos utilizados no exemplo anterior.

6.2.3.1. Método de Spencer

Da análise pelos diferentes programas obteve-se os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.13 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.3)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,990	0,990	0,990

Observando os valores obtidos verificamos que todos os programas convergiram para o mesmo valor do fator de segurança e que, embora a geometria e as características dos materiais sejam as mesmas do exemplo anterior, o valor do fator de segurança é bastante menor dada a introdução do coeficiente de ação sísmica.

As superfícies de deslizamento obtidas são constituídas por 26 fatias e encontram-se de seguida ilustradas:

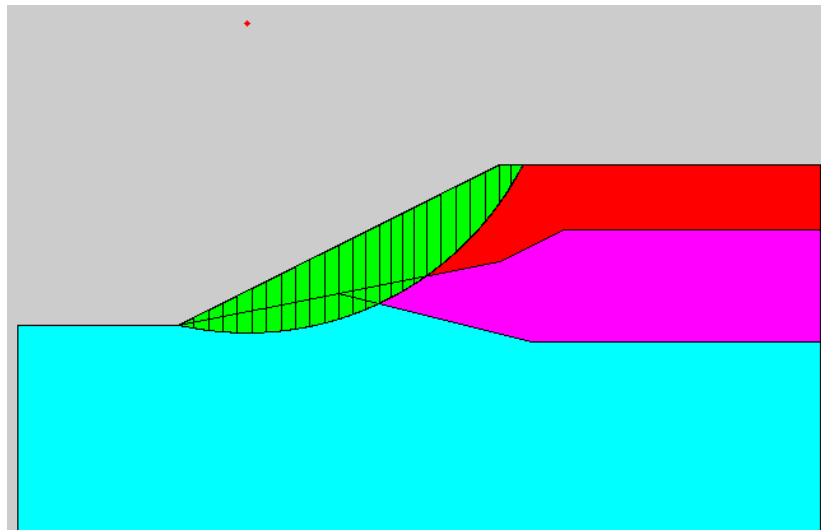


Fig. 6.35 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – TALUDES_Mv1)

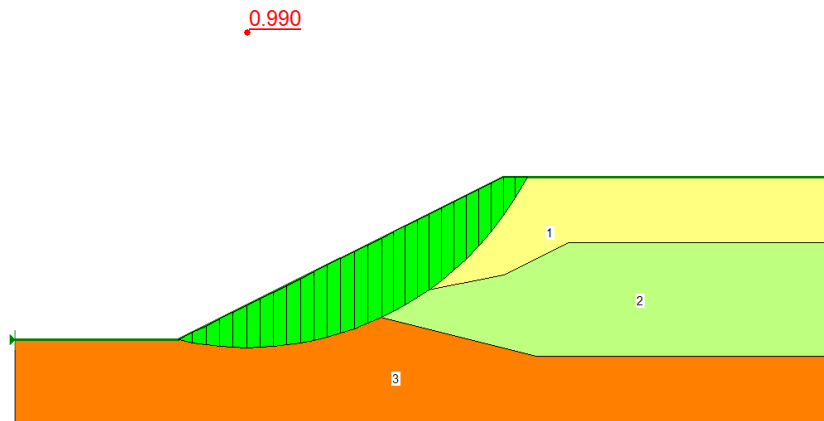


Fig. 6.36 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – Slope)

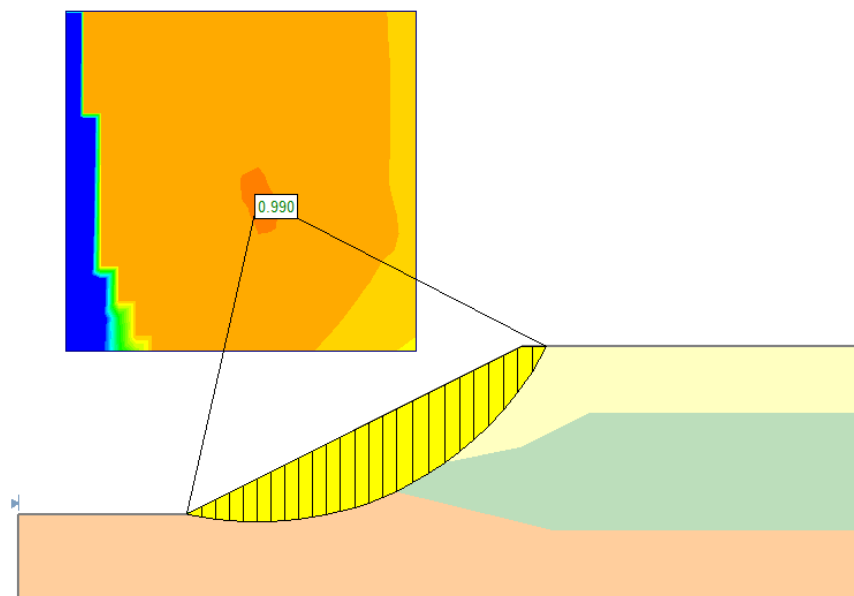


Fig. 6.37 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.3 – Slide)

Em relação às tensões atuantes na base das fatias, estas apresentam a seguinte distribuição:

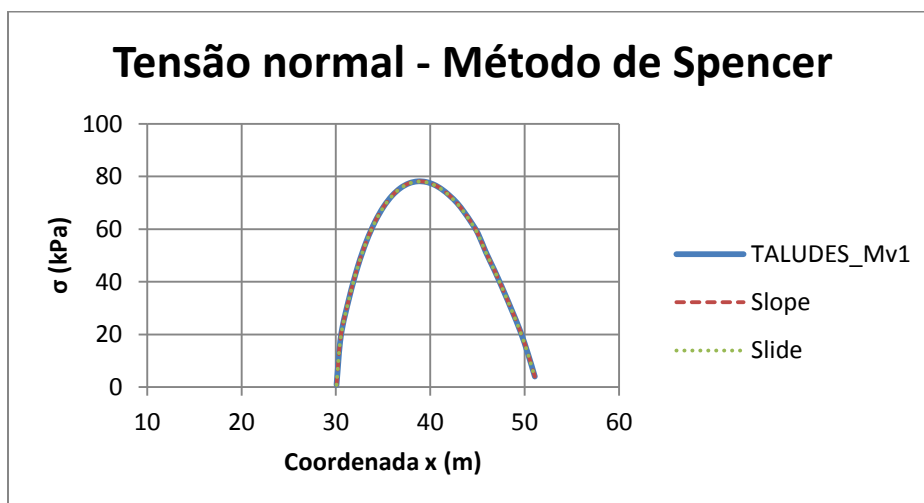


Fig. 6.38 – Tensão normal na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.3)

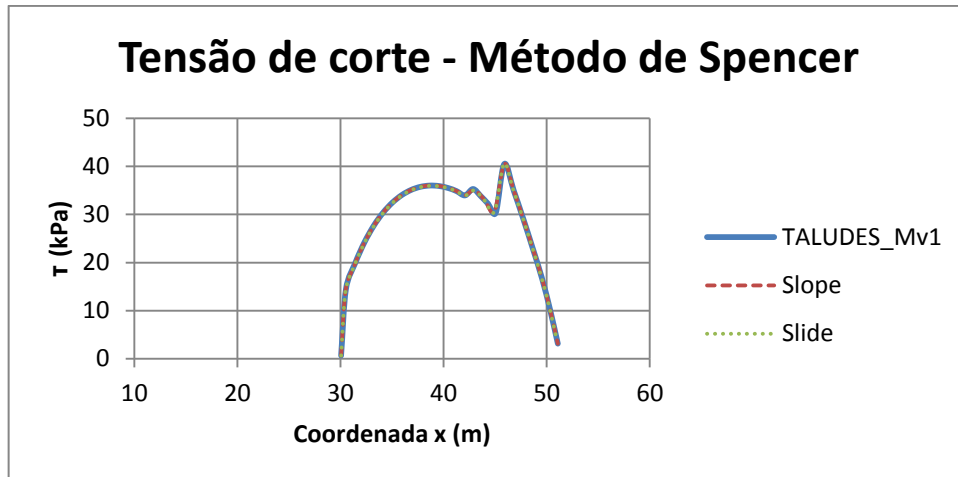


Fig. 6.39 – Força tangencial na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.3)

Da análise das figuras verifica-se que os três programas apresentam uma distribuição de tensões idêntica entre eles. Relativamente às forças de interação entre fatias resultaram as seguintes distribuições:

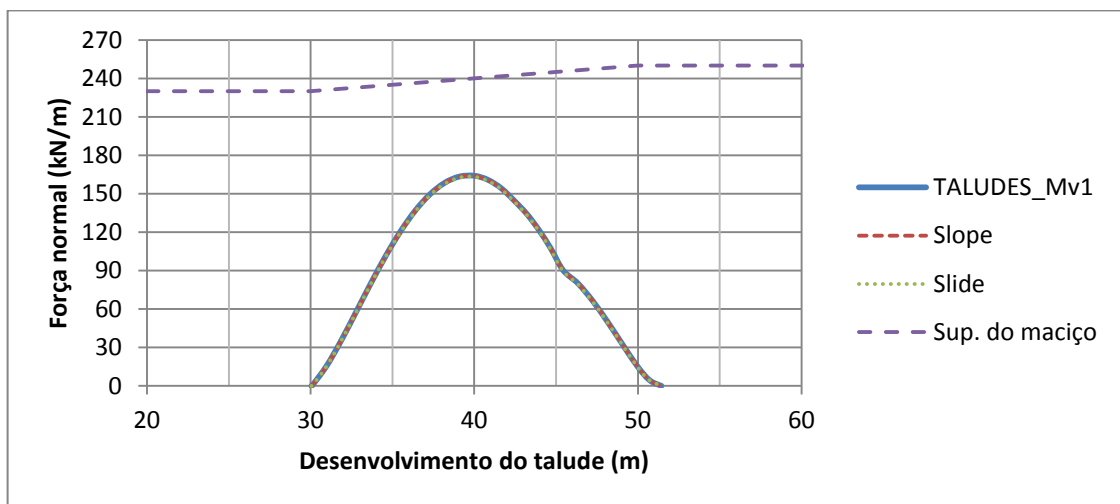


Fig. 6.40 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.3)

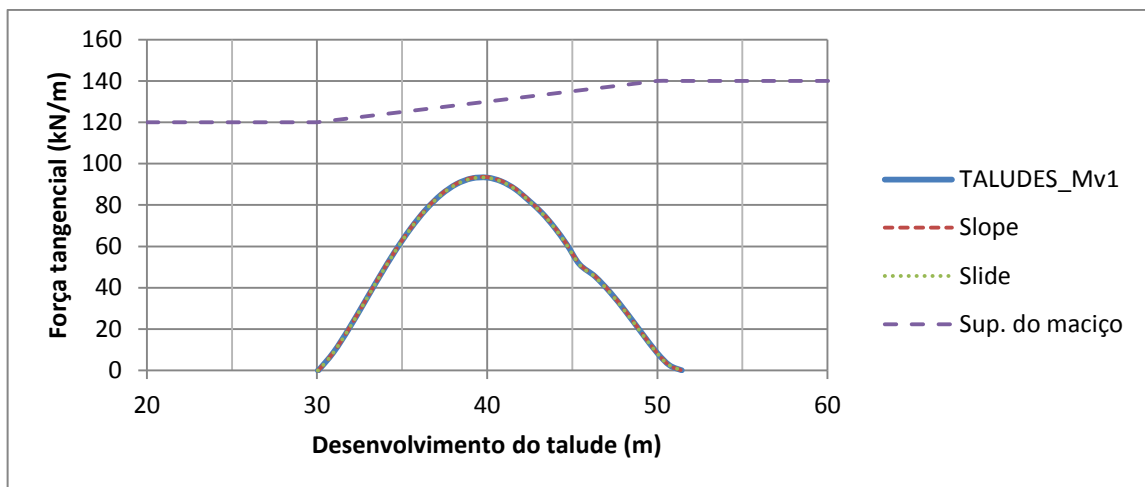


Fig. 6.41 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.3)

Pela observação das figuras concluímos que os programas apresentam uma distribuição de forças de interação idêntica entre eles.

A linha de impulso apresenta a seguinte configuração:

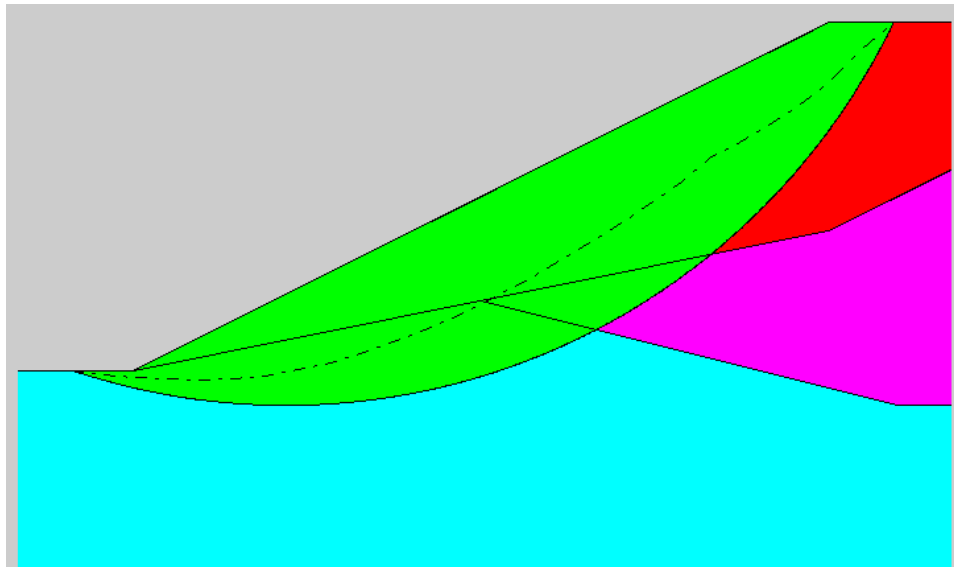


Fig. 6.42 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.3)

Como se verifica a linha de impulso encontra-se na zona delimitada pela superfície do maciço e a superfície de deslizamento o que significa que toda a massa deslizante se encontra à compressão. Assim conclui-se que não é necessária a aplicação de uma fenda de tração para um estudo mais realista do problema.

6.2.3.2. Método de Janbu

Realizando agora a análise do problema mas através das versões simplificada e rigorosa do método de Janbu, obtiveram-se respetivamente as superfícies de deslizamento com centro em (35,340 ; 39,775) e raio igual a 10,063m, e com centro em (35,340 ; 40,790) e raio igual a 16,875m. Da análise pelos diferentes programas resultaram os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.14 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.3)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,896	0,895	0,897

Quadro 6.15 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.3)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
0,987	-	0,964

Da observação dos quadros anteriores verifica-se que existem ligeiras alterações entre os valores do fator de segurança sobretudo na versão rigorosa do método. Esta diferença pode estar associada ao facto de no programa Slide, o fator de segurança é calculado pela versão corrigida do método, no

programa TALUDES_Mv1, o fator de segurança é calculado de forma rigorosa. Mais adiante se verá que este valor se aproxima mais dos obtidos por outros métodos.

As superfícies de deslizamento obtidas pelos diferentes programas são constituídas por 26 fatias e apresentam-se nas seguintes figuras:

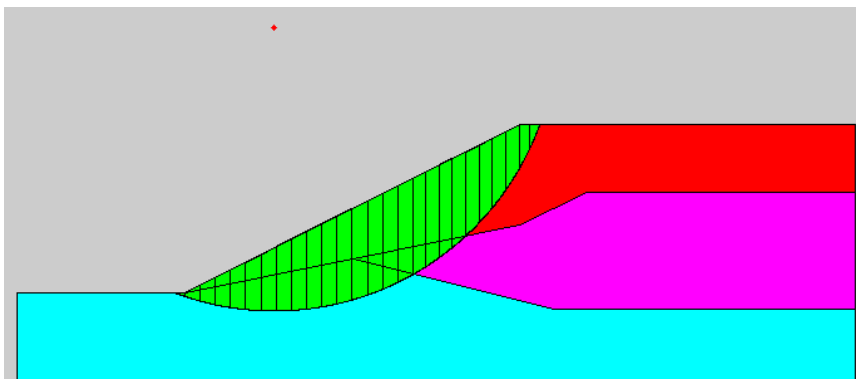


Fig. 6.43 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – TALUDES_Mv1)

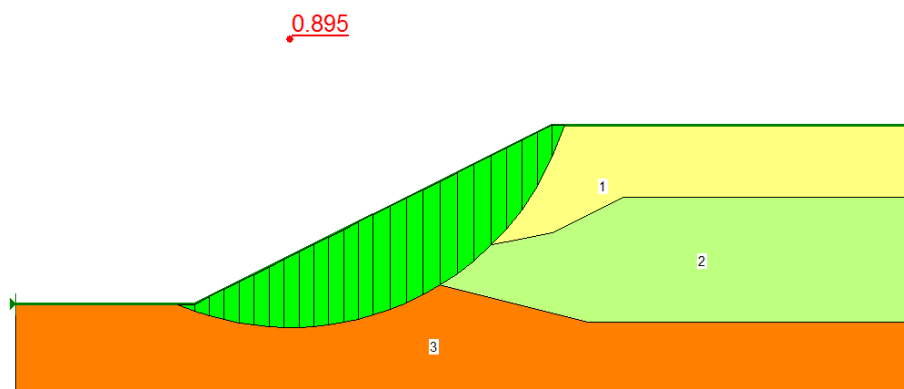


Fig. 6.44 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – Slope)

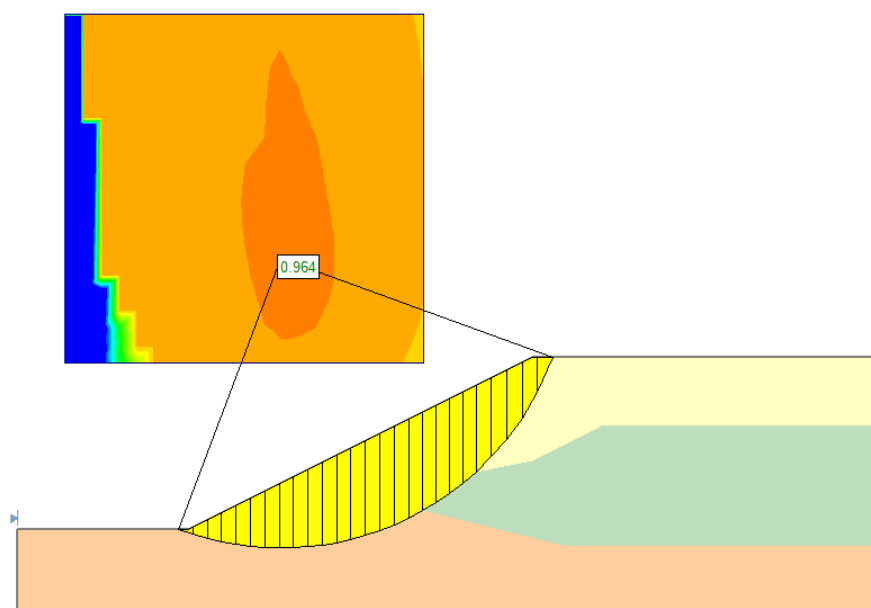


Fig. 6.45 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.3 – Slide)

Em relação às tensões atuantes na base das fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

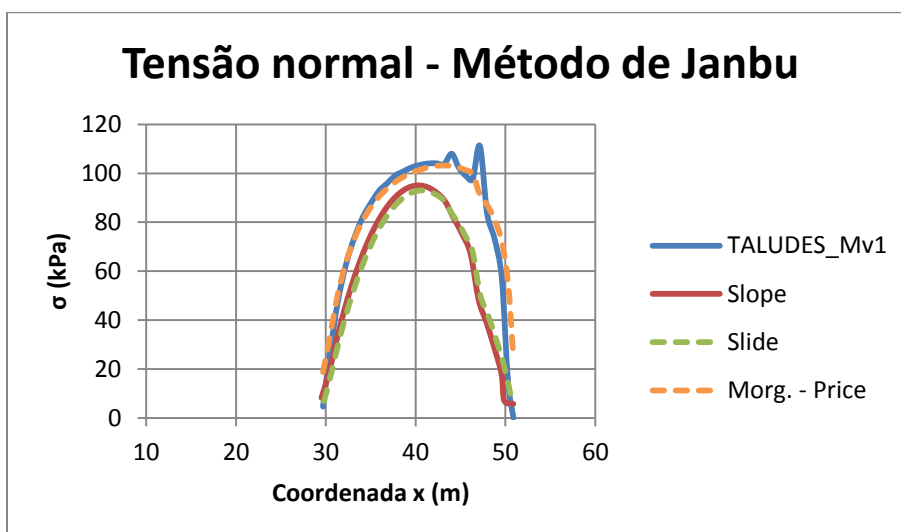


Fig. 6.46 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.3)

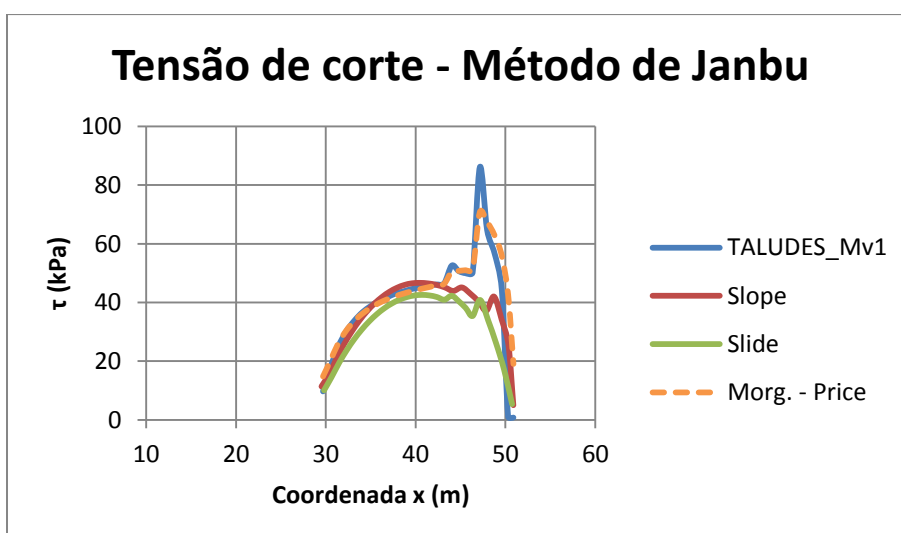


Fig. 6.47 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.3)

Pela observação das figuras anteriores verifica-se que a distribuição de tensões apresentada pelo programa TALUDES_Mv1 apresenta uma distribuição de tensões normais semelhante com a obtida pelos programas comerciais, havendo apenas uma diferença de valores que pode ser explicada pelo facto de os programas comerciais aplicarem o método seguindo uma metodologia diferente. Comparando com o método de Morgenstern-Price verifica-se que apenas na zona de tensões máximas existe alguma discrepância de valores.

Em relação às tensões de corte verifica-se que na parte inicial e final todos os programas apresentam uma distribuição similar mas na zona de tensões máximas existe alguma divergência de valores. Comparando com o outro método rigoroso verifica-se que em grande parte do traçado os dois métodos apresentam valores equivalentes havendo apenas uma diferença na zona de tensões máximas.

No que concerne às forças de interação entre fatias, as figuras seguintes mostram a distribuição obtida pelos diferentes programas:

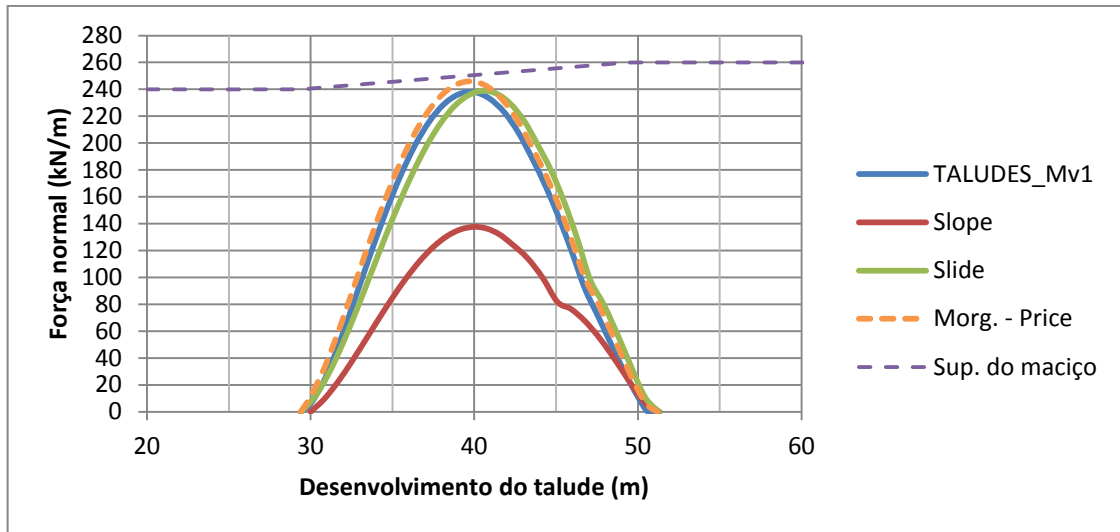


Fig. 6.48 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.3)

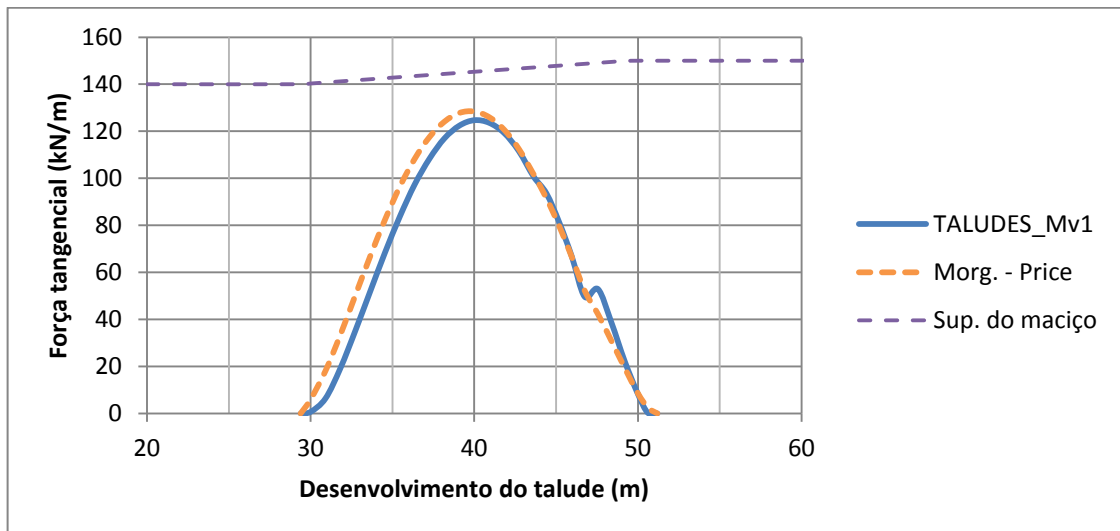


Fig. 6.49 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.3)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que as forças de interação apresentam uma distribuição ao longo da superfície de deslizamento idêntica havendo algumas diferenças de valores que podem ser explicadas pelas mesmas razões anteriormente apontadas.

A linha de impulso associada a este estudo encontra-se representada na seguinte figura:

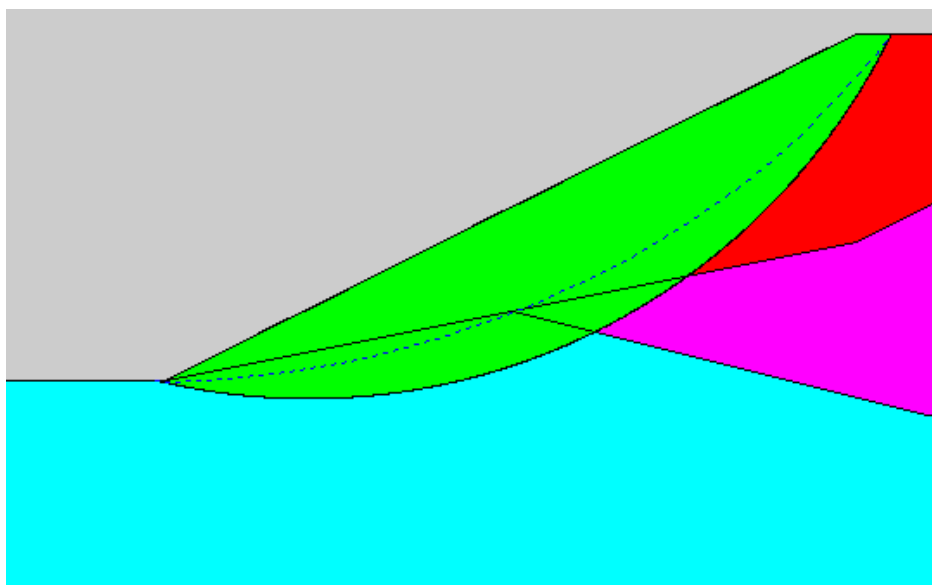


Fig. 6.50 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.3)

6.2.3.3. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.16 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.3)

Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
0,982	0,987	0,990	0,987

Da observação do quadro anterior verifica-se que todos os métodos convergiram para um valor do fator de segurança muito próximo entre eles, sendo apenas o método de Correia o que apresenta uma maior diferença em relação aos outros. Em relação ao número de iterações e tempo necessário para a convergência obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.17 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.3)

	Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
nº iterações	5	11	4	5
tempo (s)	0,186	0,149	0,536	0,319

Analisando o quadro anterior verificamos que neste caso o método de Morgenstern-Price, embora tenha precisado de mais iterações em comparação com os restantes métodos, foi o que convergiu mais rapidamente.

6.2.4. EXEMPLO 1.4

Neste exemplo considerou-se a mesma geometria e propriedades dos solos consideradas no exemplo 1.2, mas neste caso adicionou-se o nível freático à cota do pé do talude tal como mostra a seguinte figura:

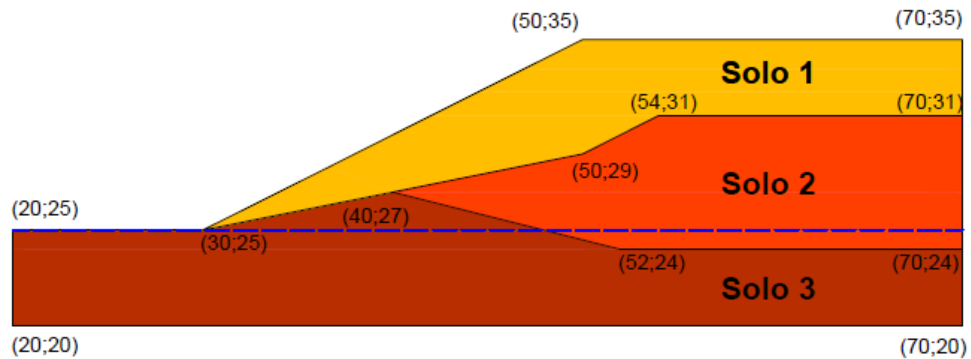


Fig. 6.51 – Exemplo 1.4

Para a análise deste exemplo foi considerada a mesma malha de centros e espaçamentos dos dois exemplos anteriores.

6.2.4.1. Método de Spencer

Efetuada a análise pelo método de Spencer nos diferentes programas, obtiveram-se os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.18 – Fator de segurança (Método de Spencer, exemplo 1.4)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,295	1,297	1,300

Analisando o quadro anterior verifica-se que todos os programas convergem para valores muito próximos entre eles. Outro aspeto relevante está relacionado com os valores obtidos neste exemplo em comparação com os dos dois exemplos anteriores. De facto nota-se uma diminuição do fator de segurança mas não tão acentuada quanto a induzida por um sismo.

As superfícies de deslizamento obtidas pelos diferentes programas para este exemplo são constituídas por 26 fatias e encontram-se representadas nas seguintes figuras:

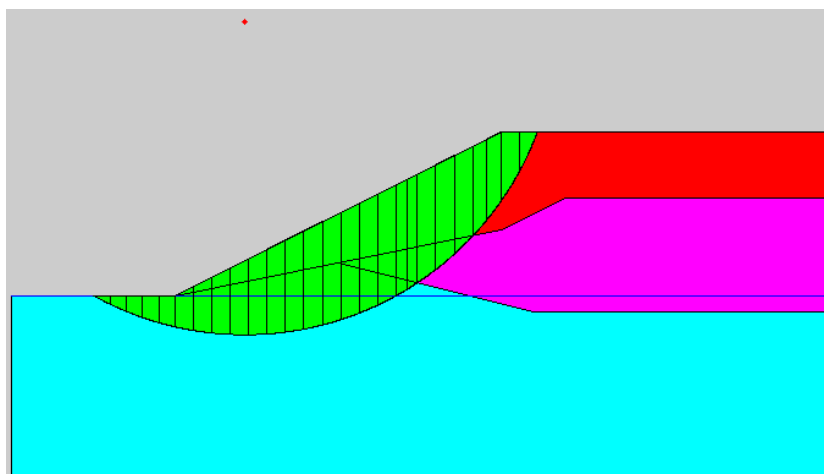


Fig. 6.52 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – TALUDES_Mv1)

1.297

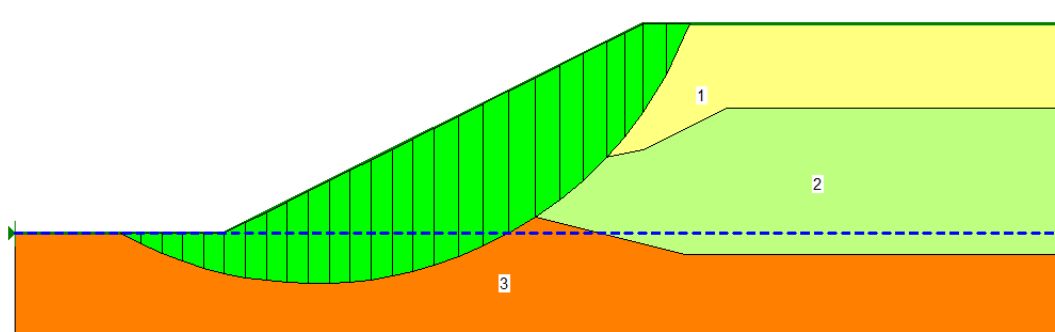


Fig. 6.53 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – Slope)

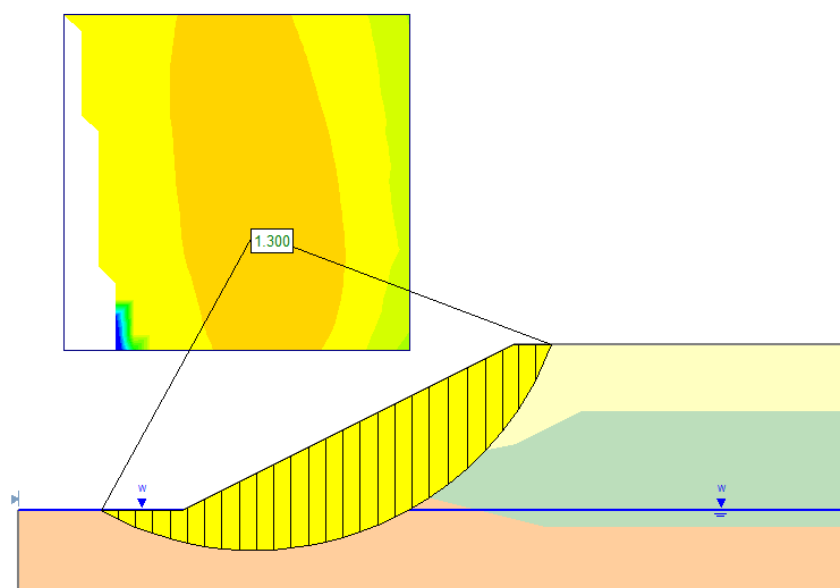


Fig. 6.54 – Superfície de deslizamento (Método de Spencer, exemplo 1.4 – Slide)

Em relação às tensões atuantes na base das fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

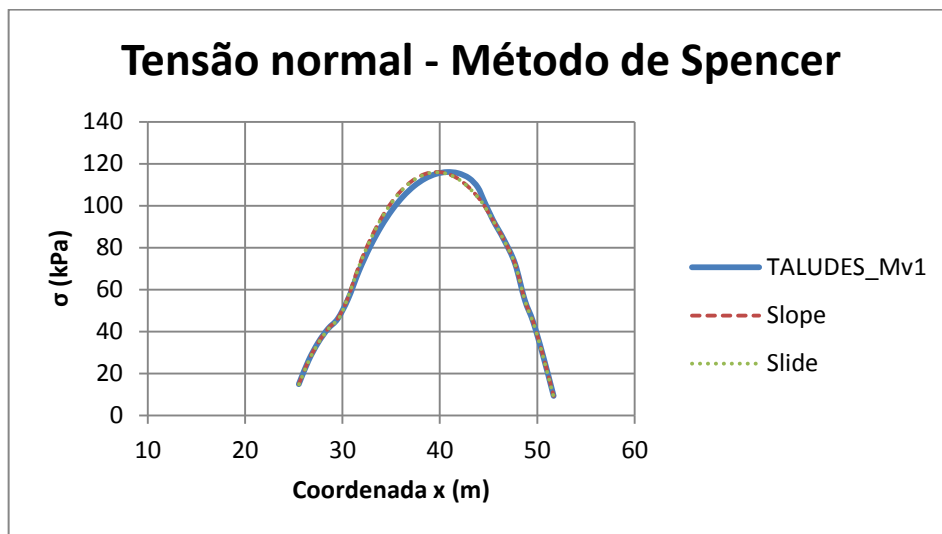


Fig. 6.55 – Tensão normal efetiva na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.4)

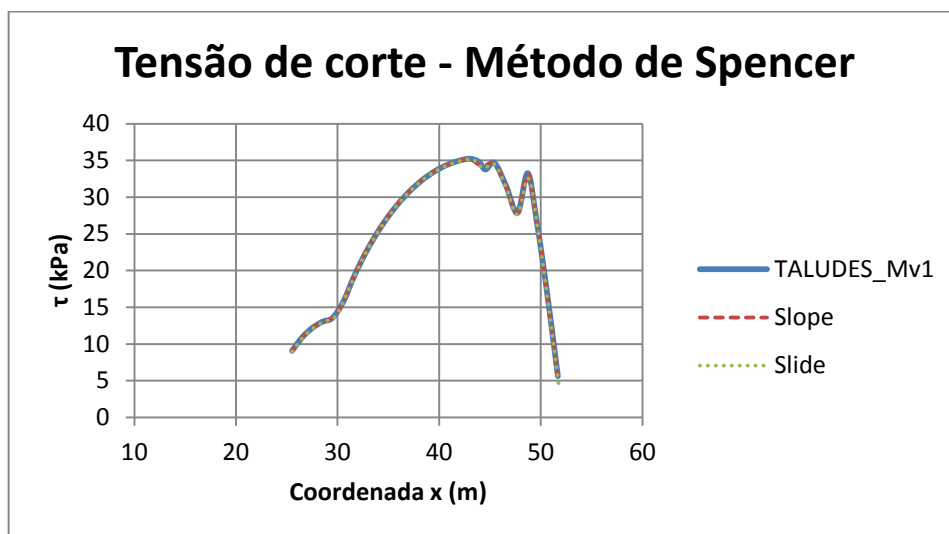


Fig. 6.56 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Spencer, exemplo 1.4)

Analisando as figuras anteriores verificamos que os programas apresentam uma distribuição idêntica de tensões entre eles ao longo da superfície de deslizamento.

No que diz respeito às forças de interação entre fatias, as figuras 6.57 e 6.58 mostram os resultados obtidos.

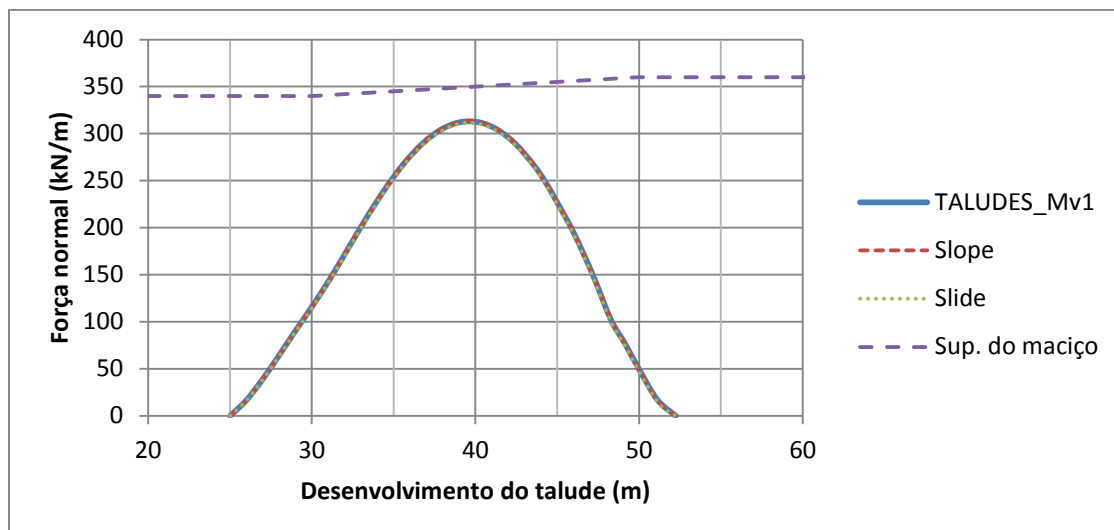


Fig. 6.57 – Distribuição da força normal E (Método de Spencer, exemplo 1.4)

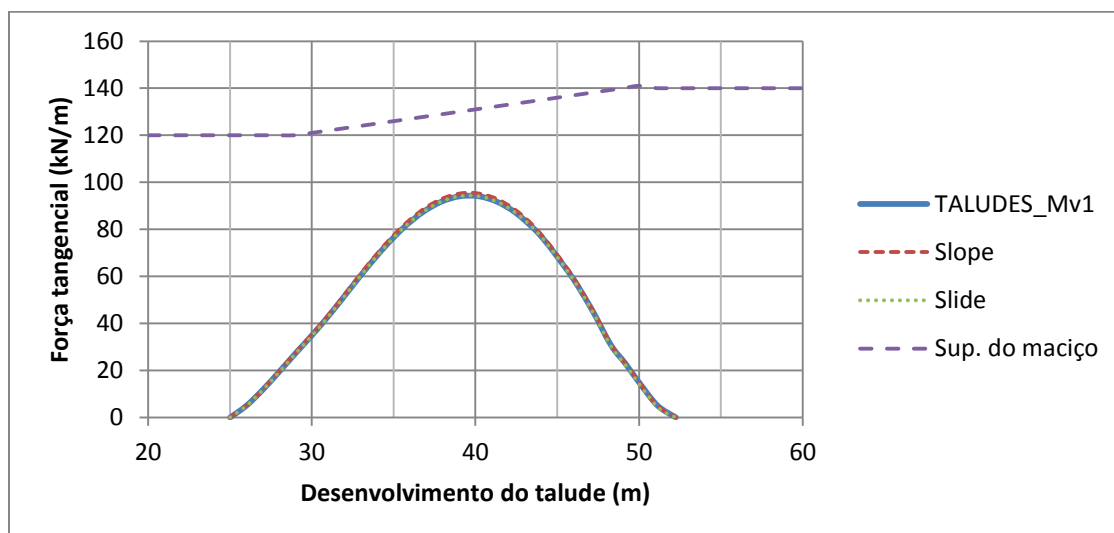


Fig. 6.58 – Distribuição da força tangencial X (Método de Spencer, exemplo 1.4)

Pela observação das figuras anteriores verificamos que todos os programas apresentam uma distribuição idêntica das forças de interação ao longo da superfície de deslizamento havendo apenas ligeiras diferenças nas forças tangenciais na parte inicial da superfície de deslizamento.

Com os valores das forças atuantes nas fatias é então possível definir a trajetória da linha de impulso.

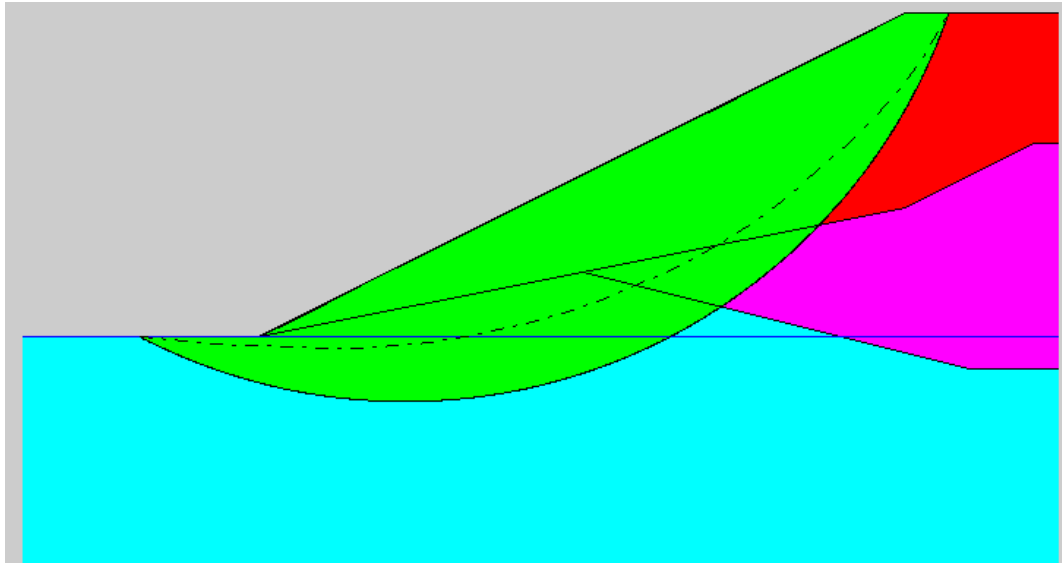


Fig. 6.59 – Linha de impulso (Método de Spencer, exemplo 1.4)

Pela figura anterior e à semelhança do que foi dito nos exemplos anteriores, podemos concluir que toda a massa deslizante se encontra à compressão não sendo por isso necessária a introdução de uma fenda de tração.

6.2.4.2. Método de Janbu

Analizando agora através do método de Janbu obtiveram-se para as versões simplificada e rigorosa, duas superfícies com as mesmas coordenadas de centro (35,340 ; 37,745) mas com raios distintos, respetivamente 16,445m e 15,461m. Os valores do fator de segurança obtidos pelos vários programas apresentam-se nos seguintes quadros:

Quadro 6.19 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 1.4)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,141	1,142	1,148

Quadro 6.20 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 1.4)

TALUDES_Mv1	Slope	Slide
1,284	-	1,246

Analizando os quadros anteriores verifica-se que nas duas versões os programas convergem para valores idênticos, embora se verifique uma maior diferença entre eles em comparação com outro método. Verifica-se também que na versão rigorosa a diferença entre o valor obtido entre os programas é maior do que na versão simplificada. Esta discrepância pode estar relacionada pelo facto de no programa TALUDES_Mv1 o valor do fator de segurança é calculado de forma rigorosa, no programa Slide, o valor resulta da multiplicação por um coeficiente corretivo. Comparando estes valores com os obtidos nos exemplos 1.2 e 1.3 verifica-se que, como era de esperar a introdução de

nível freático fez com que o valor do fator de segurança baixasse, embora essa redução não seja tão acentuada como a verificada aquando da ocorrência de um sismo.

As superfícies de deslizamento desenvolvidas pelos diferentes programas são constituídas por 28 fatias e encontram-se ilustradas nas seguintes figuras:

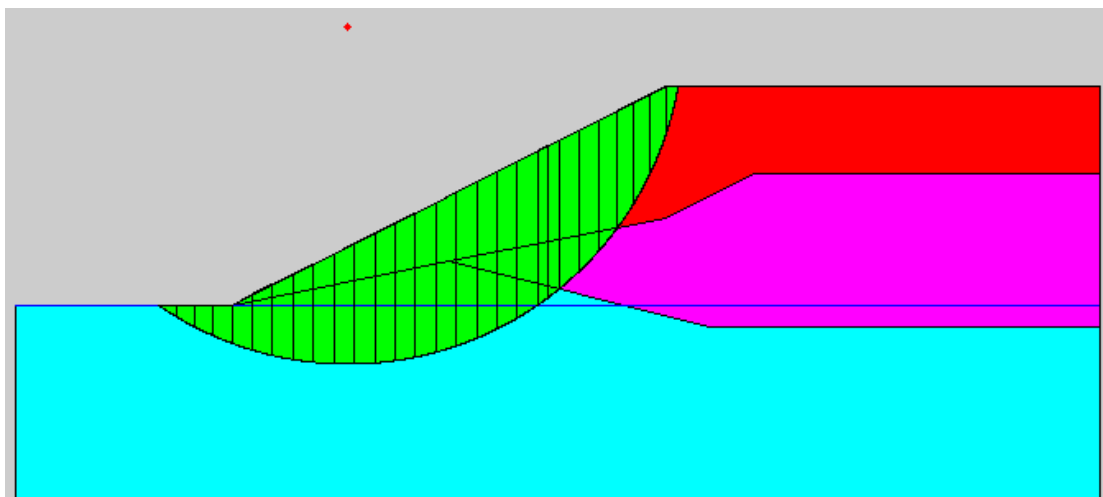


Fig. 6.60 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – TALUDES_Mv1)

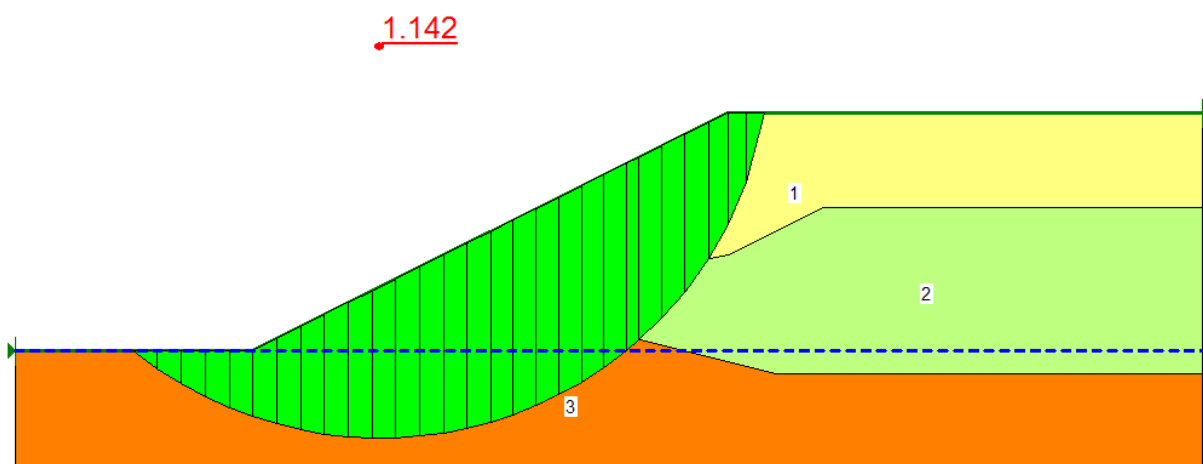


Fig. 6.61 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – Slope)

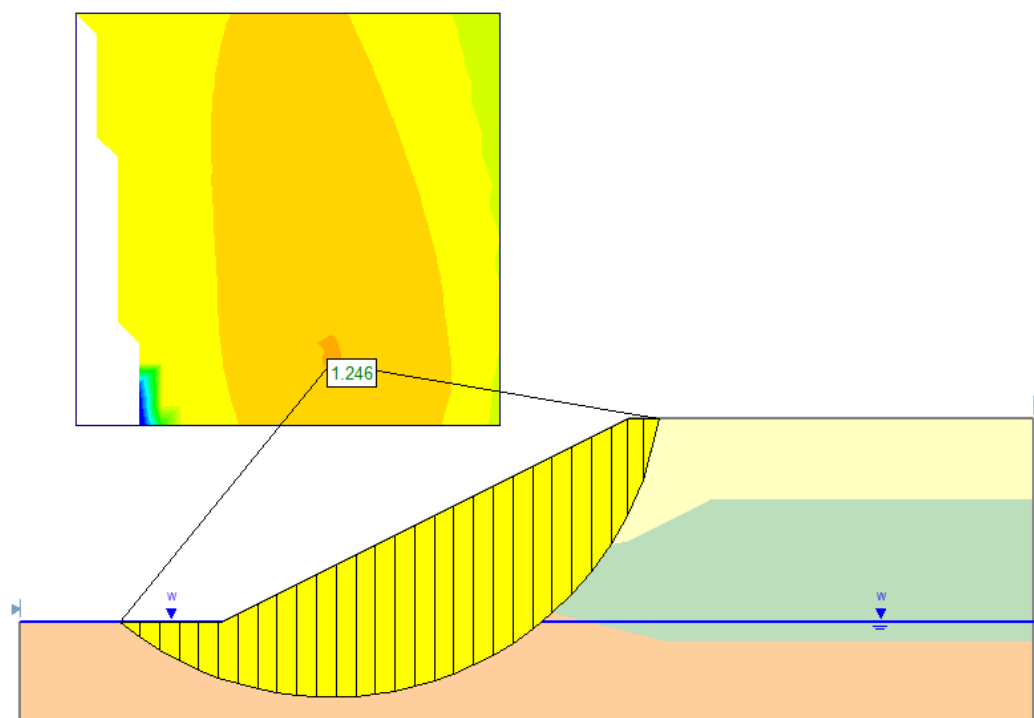


Fig. 6.62 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 1.4 – Slide)

As tensões atuantes na base das fatias obtidas encontram-se representadas nas seguintes figuras:

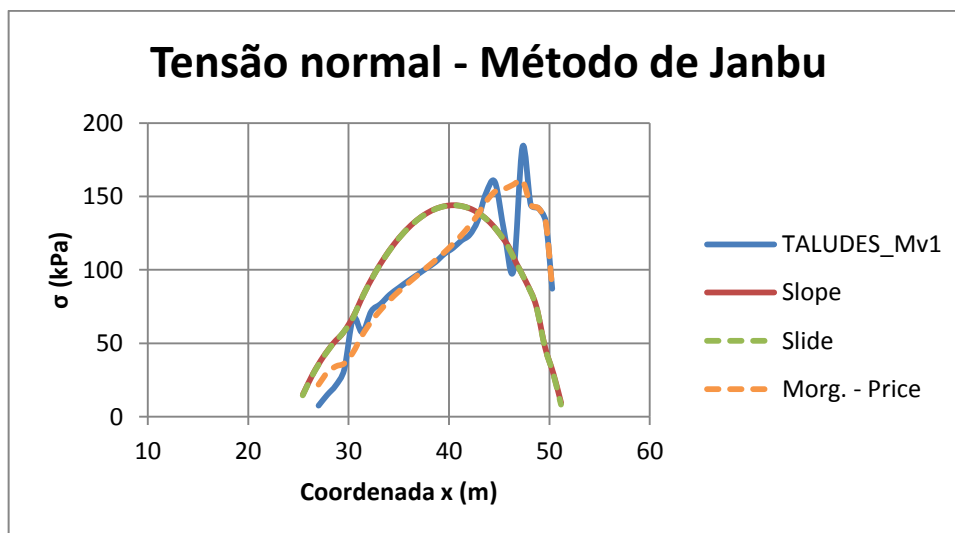


Fig. 6.63 – Tensão normal efetiva na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.4)

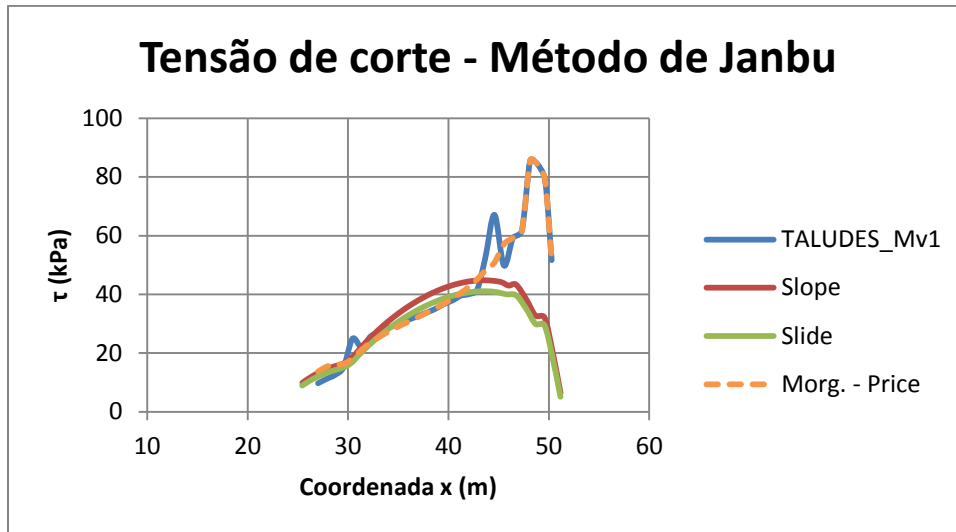


Fig. 6.64 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 1.4)

No que diz respeito à tensão normal, verifica-se que os dois programas comerciais apresentam uma total coincidência de valores. O mesmo já não acontece com o programa TALUDES_Mv1, apresentando uma distribuição distinta dos dois programas comerciais. Contudo a sua distribuição é muito idêntica à apresentada pelo método de Morgenstern-Price havendo apenas algumas flutuações de valores na zona de tensões máximas.

Relativamente à tensão de corte verifica-se que em grande parte da superfície de deslizamento os vários programas apresentam valores muito idênticos entre eles, mas a partir de um certo ponto os valores divergem bastante. Em comparação com outro método rigoroso verifica-se que os valores são coincidentes ao longo da superfície de deslizamento, havendo apenas uma oscilação de valores numa pequena parte da superfície de deslizamento.

Em relação às forças de interação entre fatias, estas apresentam a seguinte distribuição:

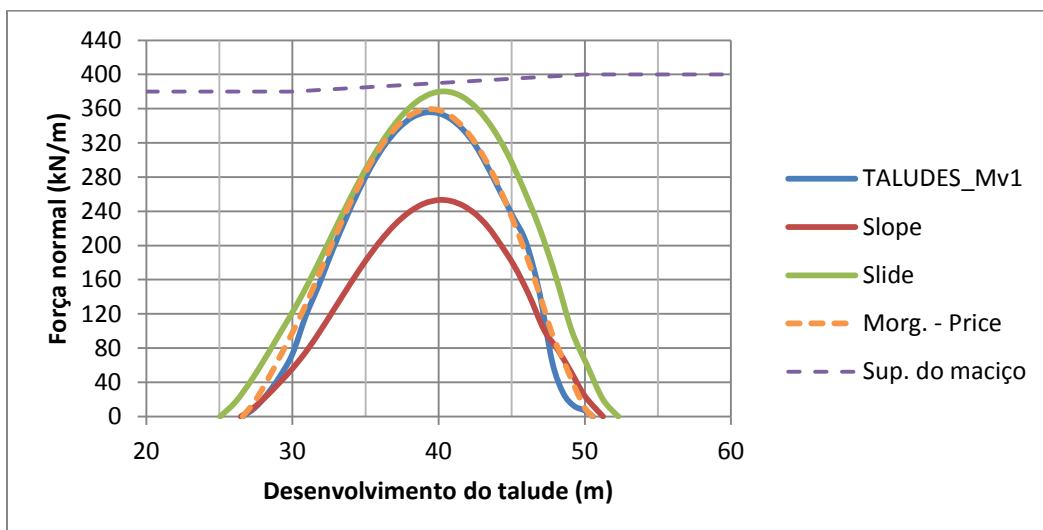


Fig. 6.65 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 1.4)

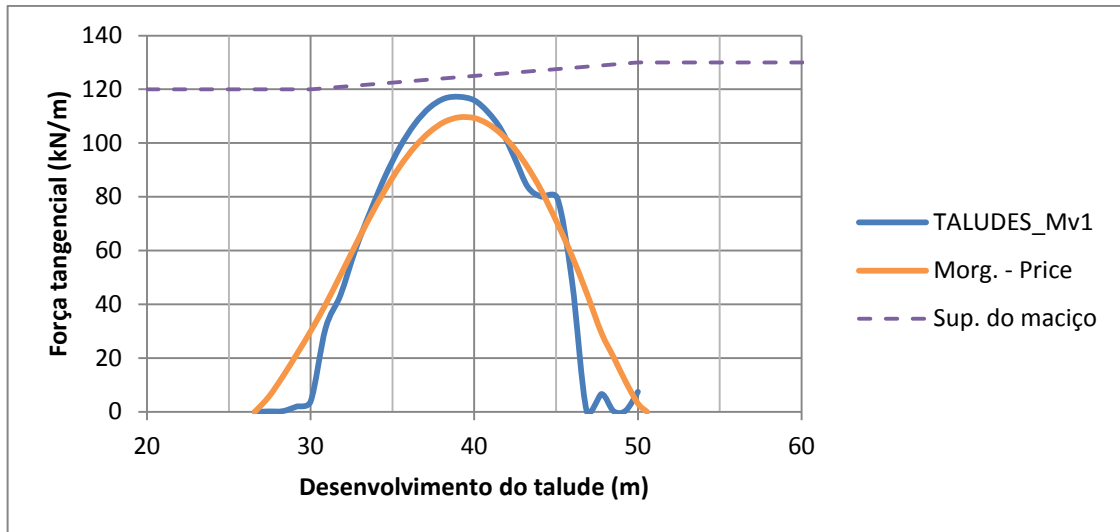


Fig. 6.66 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 1.4)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que todos os programas apresentam uma distribuição de forças de interação idêntica entre eles, havendo algumas diferenças nos valores das forças que podem estar relacionadas com o facto de os programas utilizarem diferentes metodologias de cálculo no método de Janbu. Em comparação com o método de Morgenstern-Price verifica-se que as tensões normais são coincidentes em grande parte da superfície de deslizamento havendo apenas pequenas diferenças no topo do talude. Em relação às tensões tangenciais os dois métodos apresentam uma distribuição idêntica mas com algumas diferenças e flutuações de valores. Em relação à linha de impulso, a sua trajetória é determinada antes do cálculo do fator de segurança e das forças atuantes nas fatias e tem a seguinte configuração:

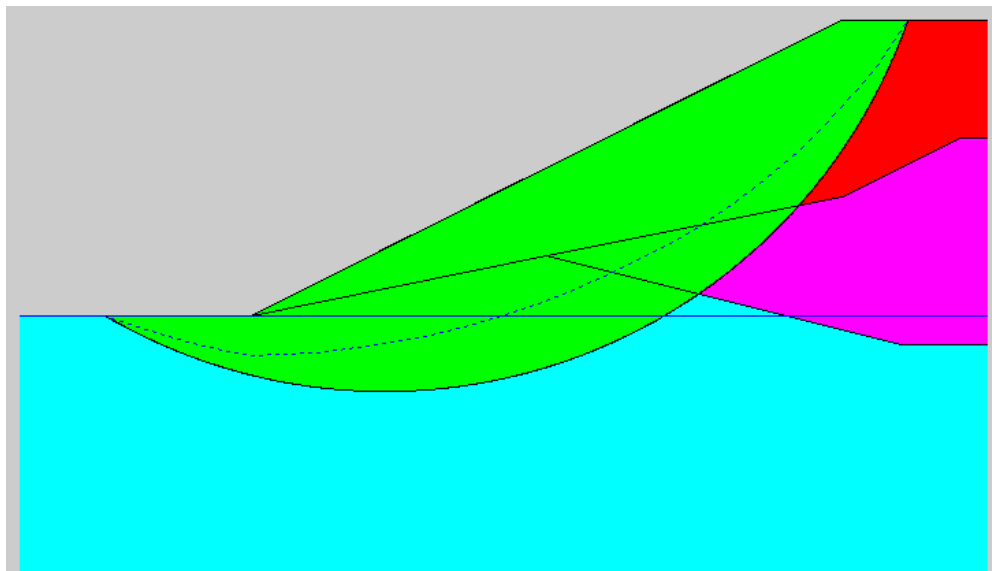


Fig. 6.67 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 1.4)

6.2.4.3. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.21 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price, Spencer e Janbu, exemplo 1.4)

Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
1,302	1,300	1,295	1,284

Analisando os valores obtidos pelos diferentes métodos verifica-se que todos convergiram para um valor bastante idêntico sendo apenas o método de Janbu o que apresenta uma maior diferença em relação aos outros. No que diz respeito ao número de iterações e tempo necessário para a convergência de valores, estes encontram-se descritos no seguinte quadro:

Quadro 6.22 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 1.4)

	Correia	Morgenstern-Price	Spencer	Janbu
nº iterações	5	10	3	5
tempo (s)	0,181	0,156	0,530	0,256

À semelhança do exemplo anterior, o método de Morgenstern-Price embora necessite de mais iterações, foi o que convergiu mais rapidamente. De salientar também que o método de Spencer foi na mesma o mais demorado, mas neste caso convergiu em menos uma iteração do que nos exemplos anteriores.

6.3. CASO DE ESTUDO 2

Este caso de estudo tem como objetivo avaliar os resultados obtidos para uma superfície de deslizamento de forma poligonal pelo método de Janbu uma vez que, apenas este novo método implementado no programa permite avaliar superfícies de deslizamento de qualquer formato.

Uma vez que o programa TALUDES_Mv1 apenas permite avaliar uma superfície de deslizamento específica, optou-se por seguir os mesmos exemplos do caso de estudo anterior implementando uma superfície de deslizamento poligonal específica. Os valores obtidos serão alvo de comparação com os obtidos pelo programa Slide uma vez que, à semelhança do programa TALUDES_Mv1, apenas este permite a análise de superfícies específicas.

6.3.1. EXEMPLO 2.1

Neste exemplo, utilizou-se as mesmas características do material e geometria do talude do exemplo 1.1 do caso de estudo anterior. A superfície de deslizamento considerada apresenta a seguinte configuração:

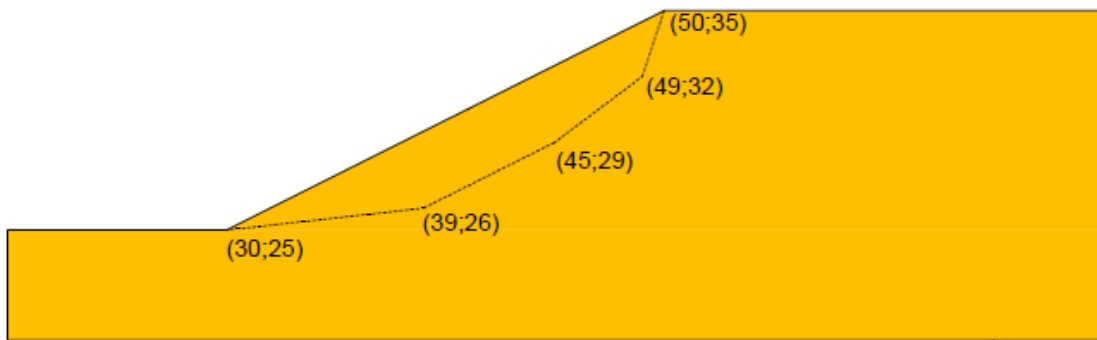


Fig. 6.68 – Exemplo 2.1

6.3.1.1. Método de Janbu

Da análise dos programas TALUDES_Mv1 e Slide resultaram os seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.23 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.1)

TALUDES_Mv1	Slide
0,967	0,978

Quadro 6.24 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.1)

TALUDES_Mv1	Slide
1,024	1,033

Importa salientar que à semelhança do caso de estudo anterior, os valores apresentados referentes à versão rigorosa do método no programa TALUDES_Mv1, dizem respeito a valores de uma das versões onde os resultados se mostraram próximos dos obtidos pelos restantes métodos.

Da análise dos quadros verificamos que os dois programas convergiram para valores próximos do fator de segurança. As superfícies de deslizamento são constituídas por 26 fatias e encontram-se ilustradas nas seguintes figuras:

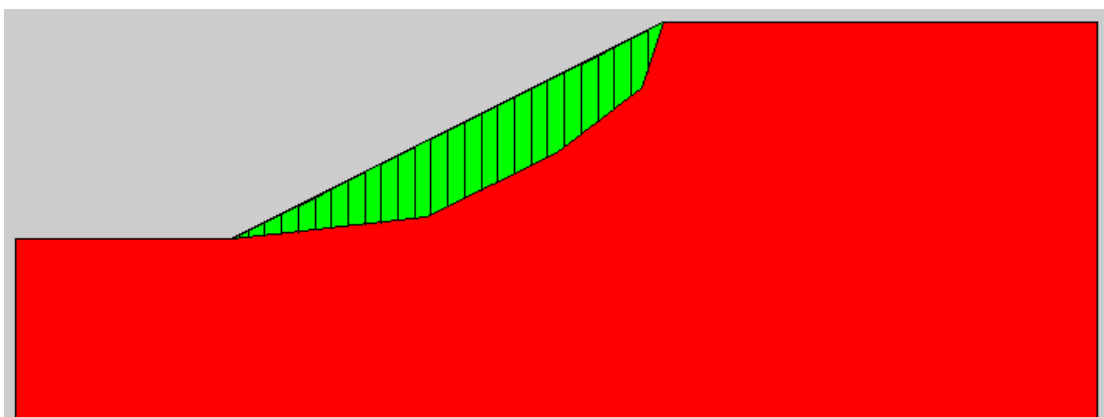


Fig. 6.69 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.1 – TALUDES_Mv1)

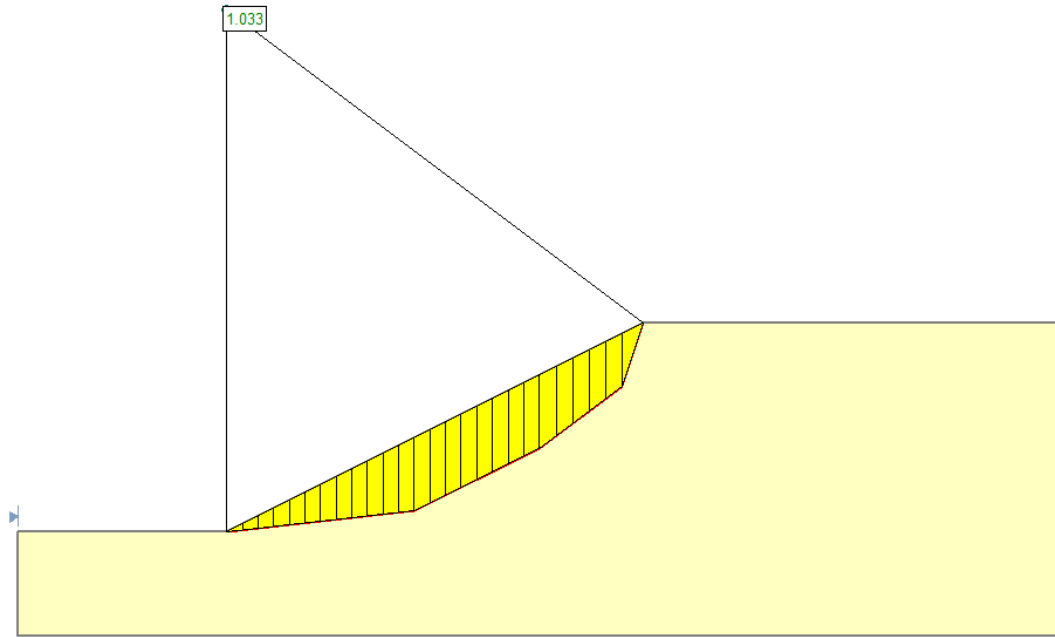


Fig. 6.70 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.1 – Slide)

Em relação às forças atuantes na base das fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

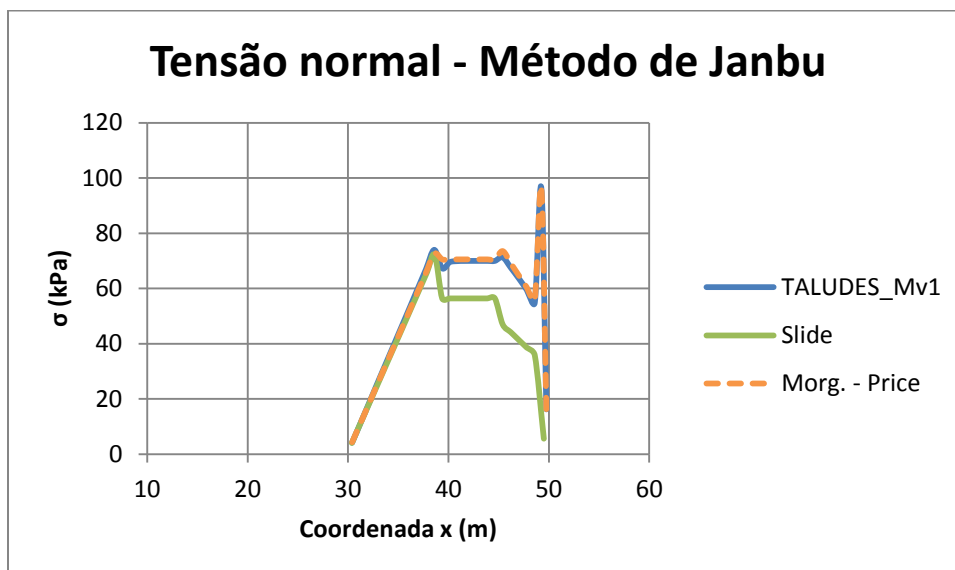


Fig. 6.71 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.1)

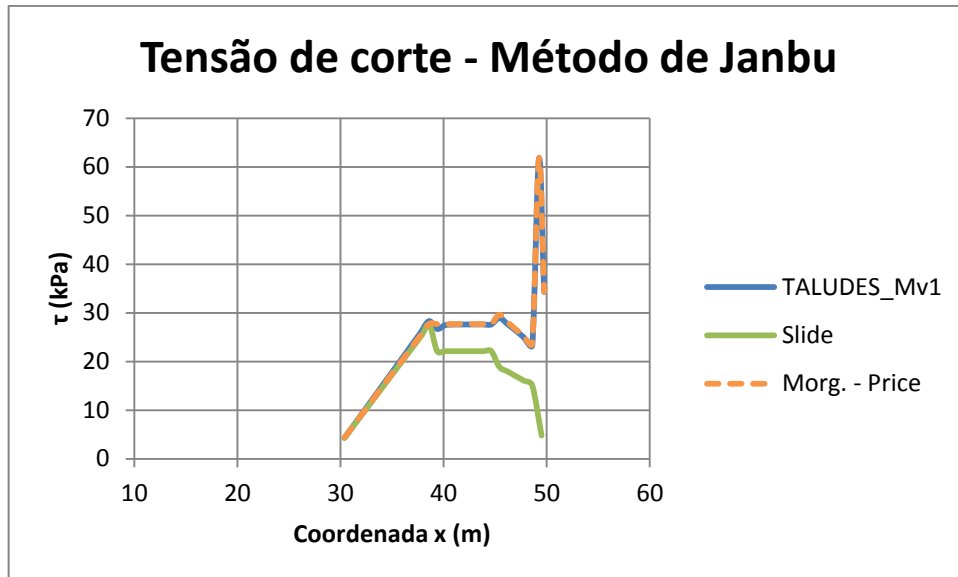


Fig. 6.72 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.1)

Da análise das figuras concluímos que os dois programas apresentam uma distribuição de tensões idêntica numa primeira parte da superfície de deslizamento mas a partir de um certo ponto os valores divergem entre eles. Comparando com outro método rigoroso verifica-se uma total coincidência de valores ao longo de toda a superfície de deslizamento.

Em relação às forças de interação entre fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

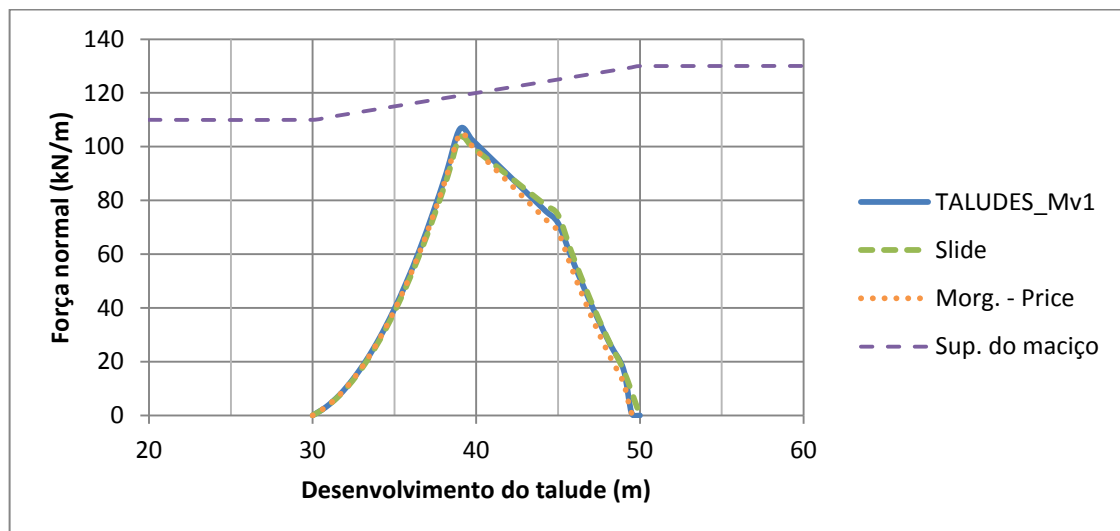


Fig. 6.73 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.1)

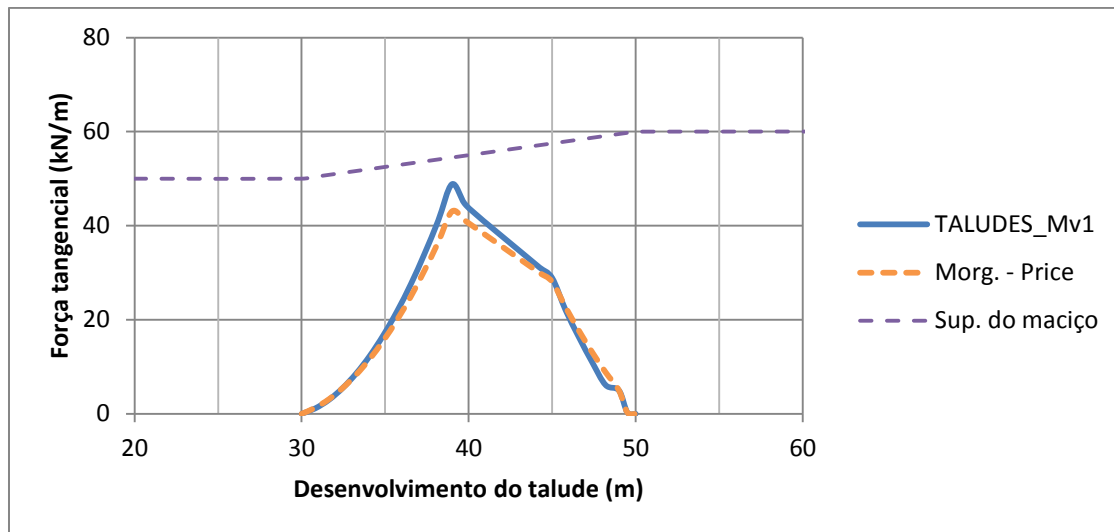


Fig. 6.74 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.1)

Pela observação das figuras verifica-se que a distribuição das forças apresentados pelos dois programas e pelo método de Morgenstern-Price são muito semelhantes.

A linha de impulso associada ao cálculo no fator de segurança e das forças atuantes nas fatias apresenta a seguinte configuração:

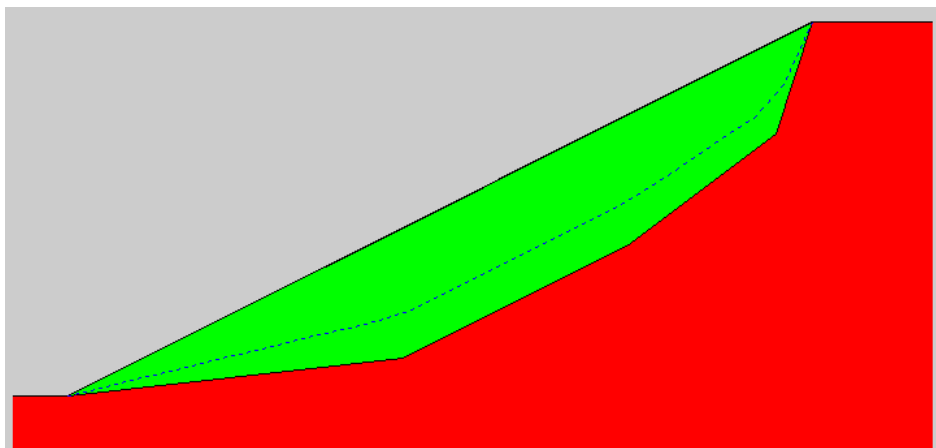


Fig. 6.75 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.1)

6.3.1.2. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.25 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.1)

Correia	Morgenstern-Price	Janbu
1,022	1,032	1,024

Pela análise dos valores obtidos verificamos que todos os métodos convergem para valores bastante próximos entre eles. Em relação ao número de iterações e tempo necessário para a convergência obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.26 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.1)

	Correia	Morgenstern-Price	Janbu
nº iterações	4	8	5
tempo (s)	0,251	0,182	0,227

Observando os valores obtidos verificamos que o método de Morgenstern-Price, embora necessite de mais iterações, foi o que convergiu mais rapidamente. O oposto acontece em relação ao método de Correia que, embora seja o que necessite de menos iterações para convergir, é o método mais demorado em comparação com os restantes. O método de Janbu apresenta valores intermédios em relação aos outros métodos supracitados.

6.3.2. EXEMPLO 2.2

Para este exemplo, adotou-se a mesma geometria e características dos materiais do exemplo 1.1, implementando a superfície de rotura considerada tal como mostra a seguinte figura:

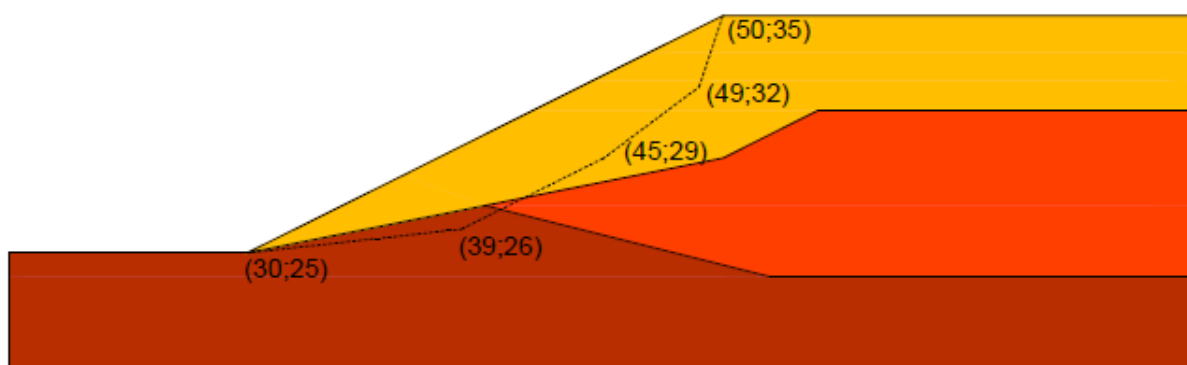


Fig. 6.76 – Exemplo 2.2

6.3.2.1. Método de Janbu

Efetuada a análise pelo método de Janbu nos dois programas considerados, chegou-se aos seguintes valores do fator de segurança:

Quadro 6.27 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.2)

TALUDES_Mv1	Slide
1,473	1,489

Quadro 6.28 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.2)

TALUDES_Mv1	Slide
1,529	1,573

Observando os valores apresentados nos quadros verificamos que os dois programas convergiram para valores próximos do fator de segurança.

As superfícies de deslizamento obtidas pelos programas são constituídas por 27 fatias e encontram-se ilustradas nas seguintes figuras:

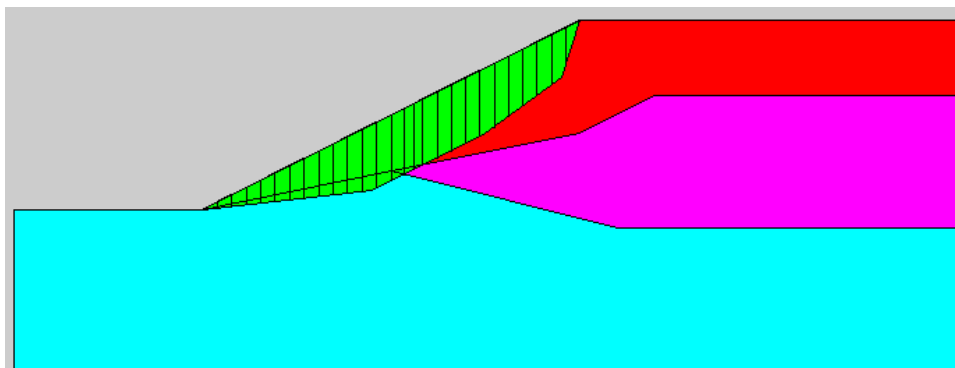


Fig. 6.77 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.2 – TALUDES_Mv1)

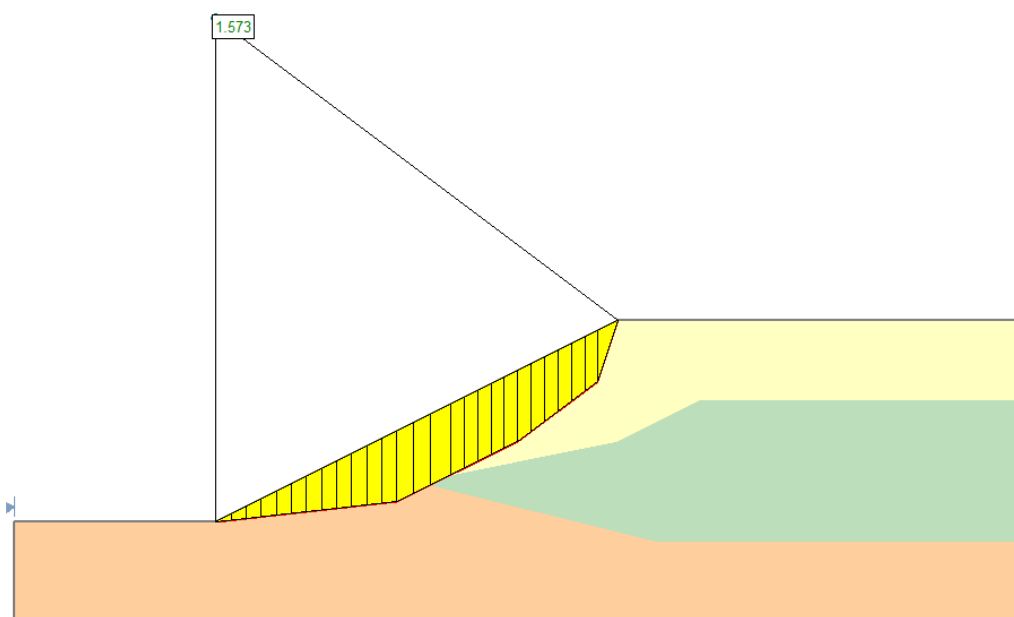


Fig. 6.78 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.2 – Slide)

Relativamente às tensões atuantes na base das fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

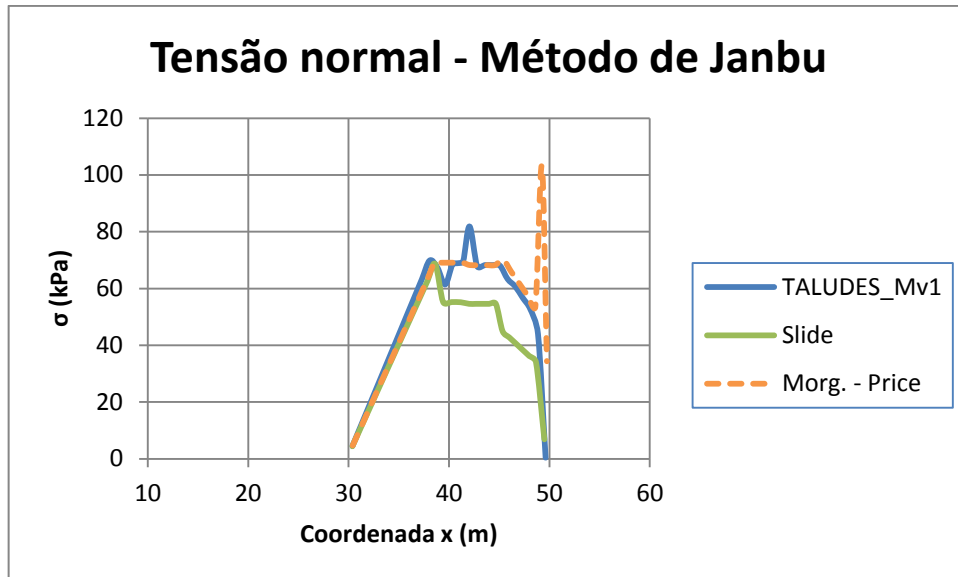


Fig. 6.79 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.2)

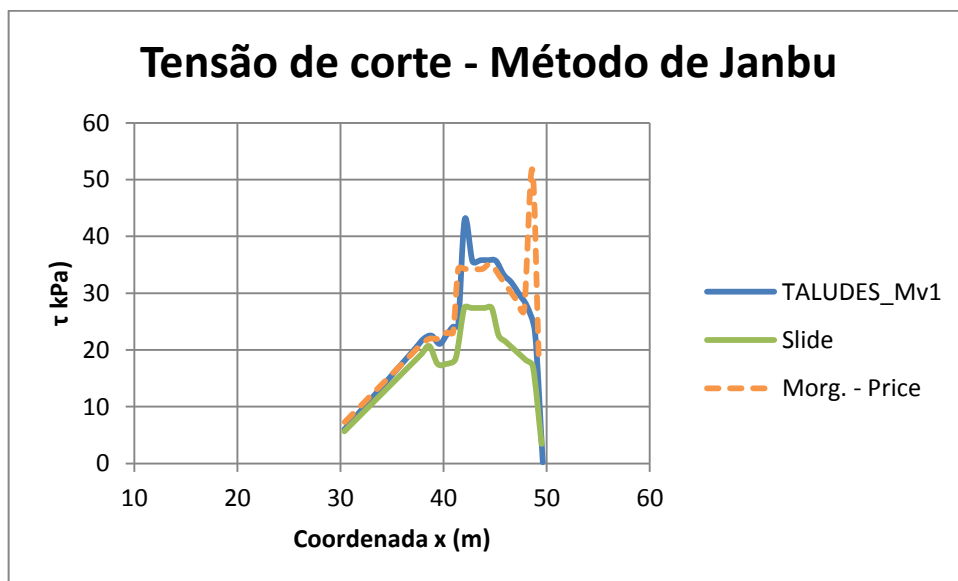


Fig. 6.80 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.2)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que na parte inicial e final, os dois programas apresentam valores similares entre eles, contudo verifica-se alguma discrepância de valores na zona média da superfície de deslizamento. Esta diferença pode estar relacionada pelo facto de o programa Slide e TALUDES_Mv1 aplicarem diferentes formulações do método.

Comparando com o método de Morgenstern-Price verifica-se que, apesar de alguma oscilação de valores associada ao método de Janbu, apenas na parte final da superfície de deslizamento os valores divergem consideravelmente entre os dois métodos.

Em relação à distribuição das forças de interação entre fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

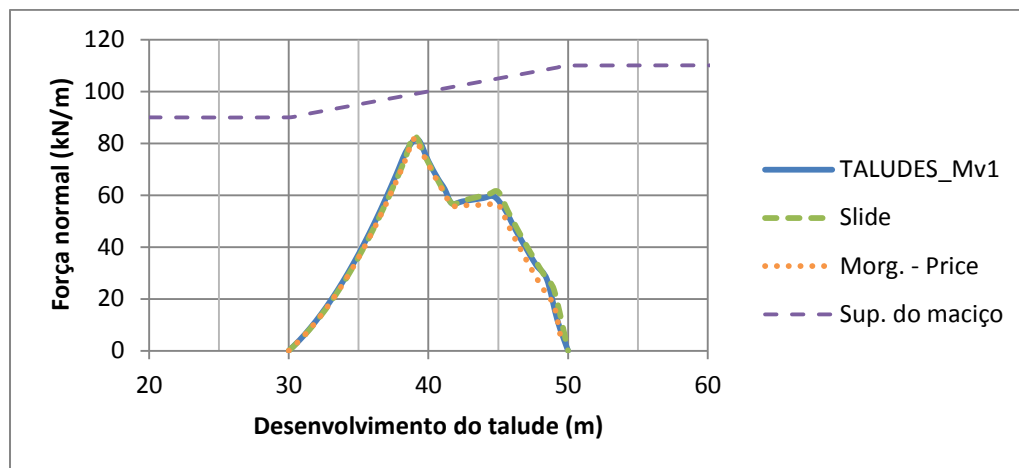


Fig. 6.81 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.2)

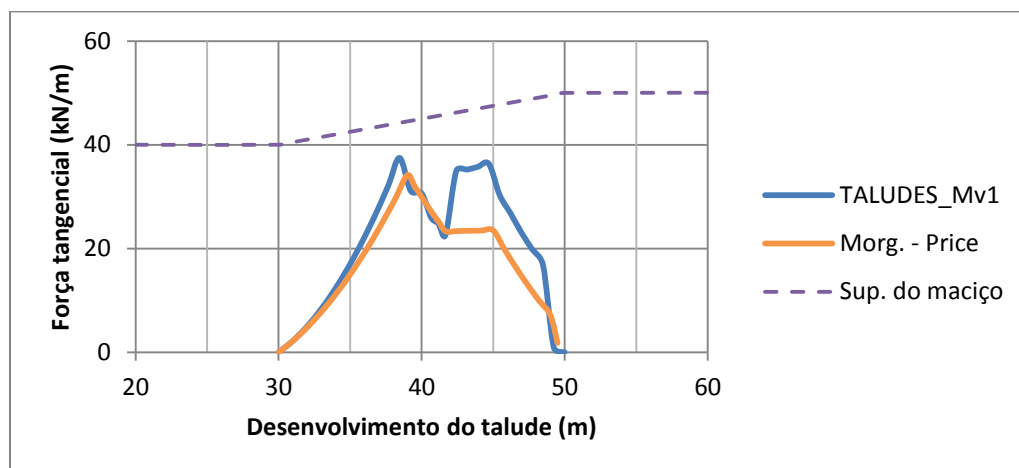


Fig. 6.82 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.2)

No que concerne às forças de interação verifica-se que, para as forças normais os dois programas apresentam valores coincidentes entre eles assim como com o método de Morgenstern-Price, em relação às forças tangenciais verifica-se alguma semelhança de valores na parte inicial da superfície de deslizamento entre os dois métodos, contudo a partir de um certo ponto os valores divergem consideravelmente.

A linha de impulso associada ao estudo deste exemplo encontra-se ilustrada na seguinte figura:

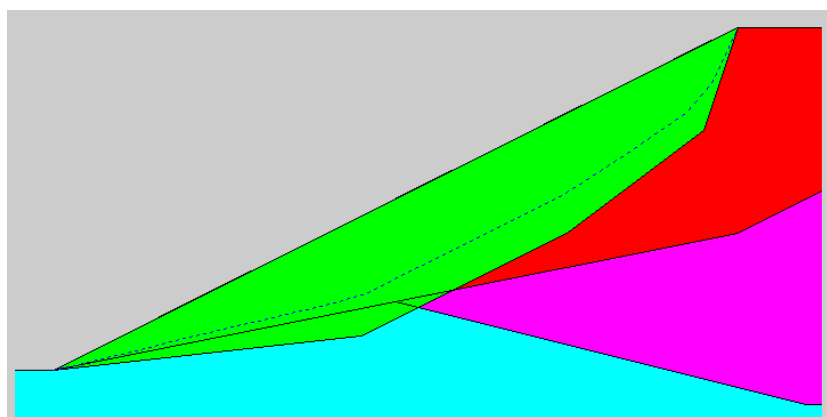


Fig. 6.83 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.2)

6.3.2.2. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.29 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.2)

Correia	Morgenstern-Price	Janbu
1,508	1,528	1,529

Analisando os valores obtidos verificamos que todos os métodos convergem para valores bastante idênticos, sendo apenas o método de Correia o que apresenta o valor mais afastado em comparação com os outros. Relativamente ao número de iterações e tempo de cálculo obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.30 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.2)

	Correia	Morgenstern-Price	Janbu
nº iterações	5	8	7
tempo (s)	0,419	0,275	0,373

As conclusões a retirar são em tudo semelhantes às apresentadas no exemplo anterior.

6.3.3. EXEMPLO 2.3

Neste exemplo considerou-se a mesma geometria e propriedades adotadas no exemplo anterior mas adicionou-se um coeficiente de ação sísmica horizontal de 0,15.

Os valores do fator de segurança obtidos pelos programas apresentam-se nos seguintes quadros:

Quadro 6.31 – Fator de segurança (Método de Janbu simplificado, exemplo 2.3)

TALUDES_Mv1	Slide
1,047	1,057

Quadro 6.32 – Fator de segurança (Método de Janbu rigoroso, exemplo 2.3)

TALUDES_Mv1	Slide
1,084	1,117

Da observação dos quadros verifica-se que os dois programas convergiram para valores um pouco distintos entre eles o que mostra o problema de convergência associado ao método.

As superfícies de deslizamento obtidas são constituídas por 27 fatias e apresentam-se representadas nas seguintes figuras:

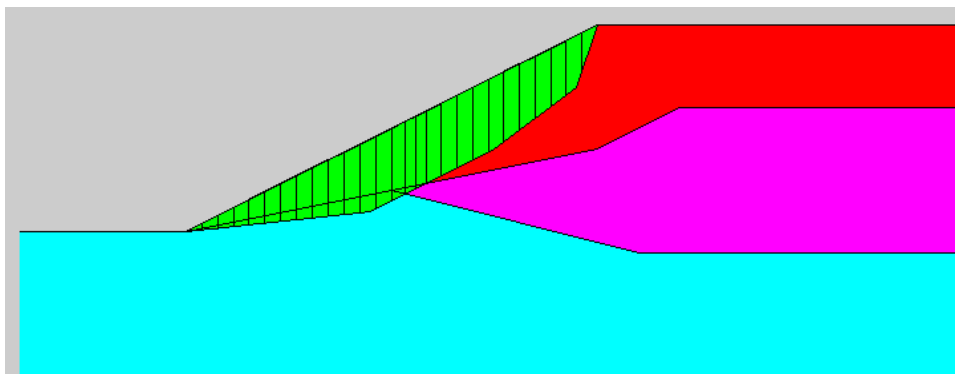


Fig. 6.84 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.3 – TALUDES_Mv1)

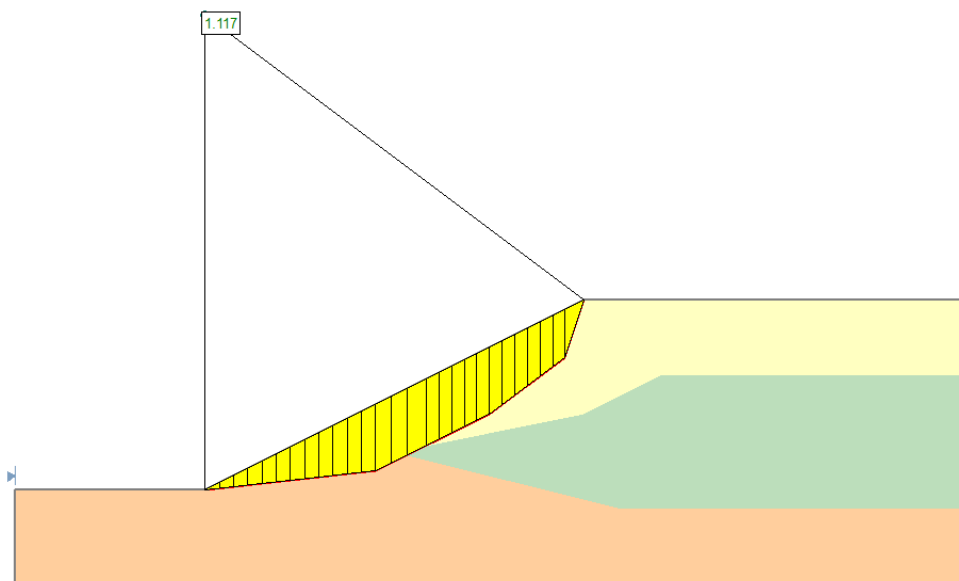


Fig. 6.85 – Superfície de deslizamento (Método de Janbu, exemplo 2.3 – Slide)

No que diz respeito às tensões atuantes na base das fatias, as figuras seguintes mostram os resultados obtidos:

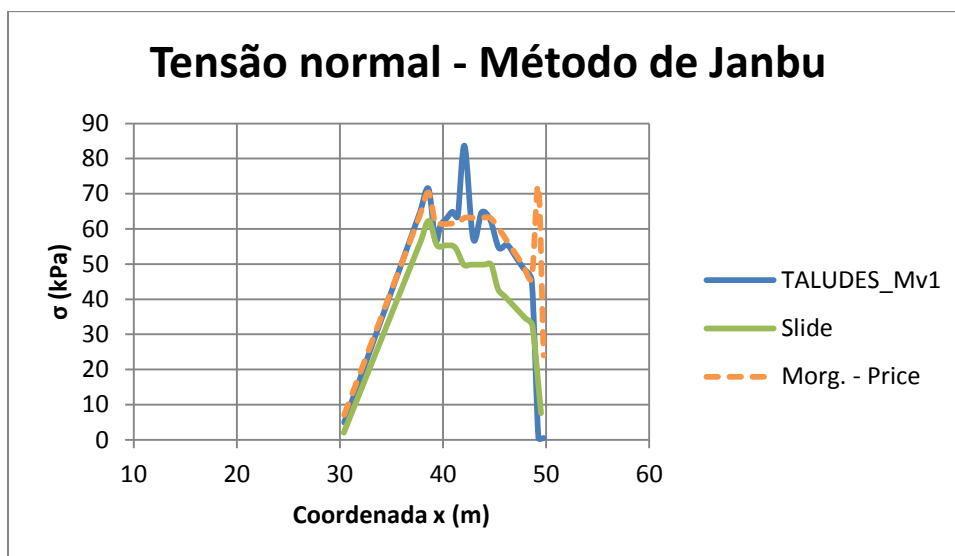


Fig. 6.86 – Tensão normal na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.3)

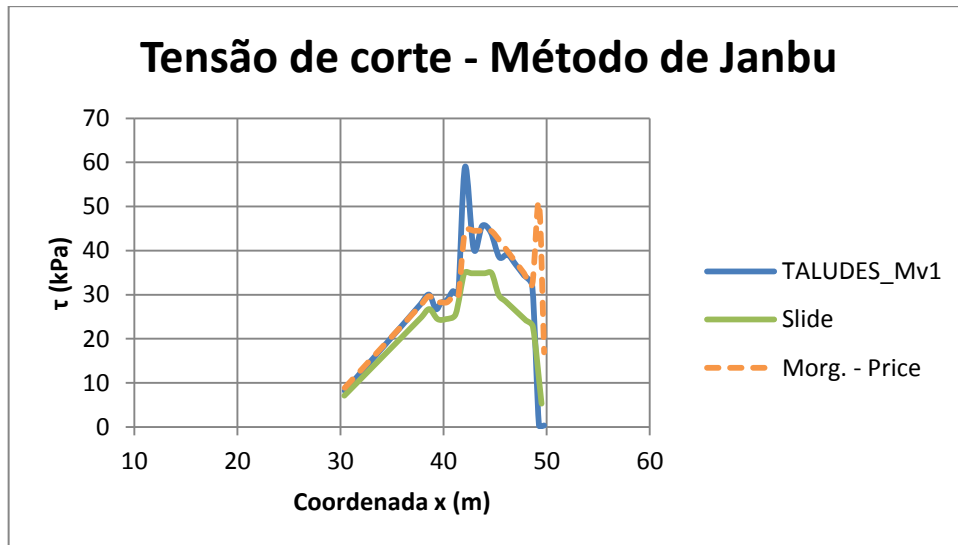


Fig. 6.87 – Tensão de corte na base das fatias (Método de Janbu, exemplo 2.3)

Da análise das figuras anteriores verifica-se que na parte inicial e final da superfície de deslizamento, os dois programas apresentam uma distribuição similar entre eles, havendo apenas alguma discrepância de valores na zona média da superfície de deslizamento. Comparando com a distribuição apresentada pelo método de Morgenstern-Price, apesar de alguma oscilação de valores associada ao método de Janbu, apenas se verifica uma maior discrepância de valores na parte final da superfície de deslizamento.

Relativamente às forças de interação entre fatias obtiveram-se os seguintes resultados:

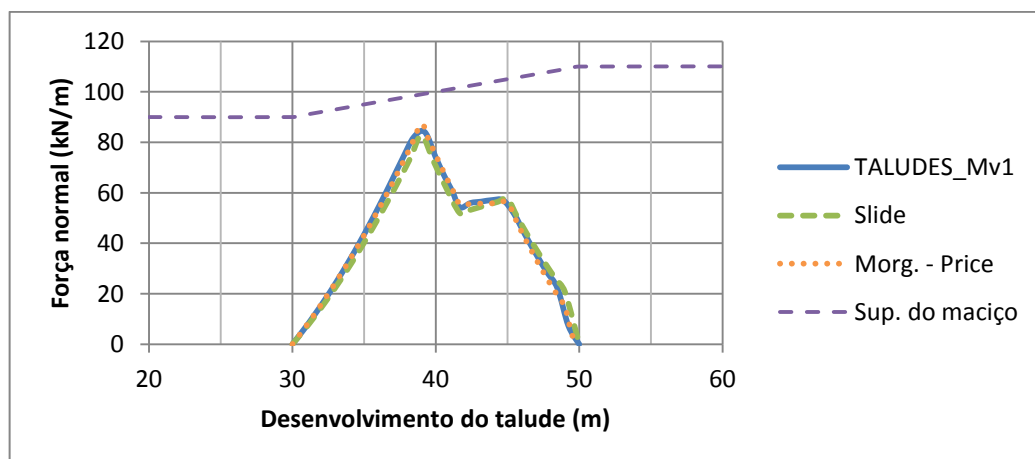


Fig. 6.88 – Distribuição da força normal E (Método de Janbu, exemplo 2.3)

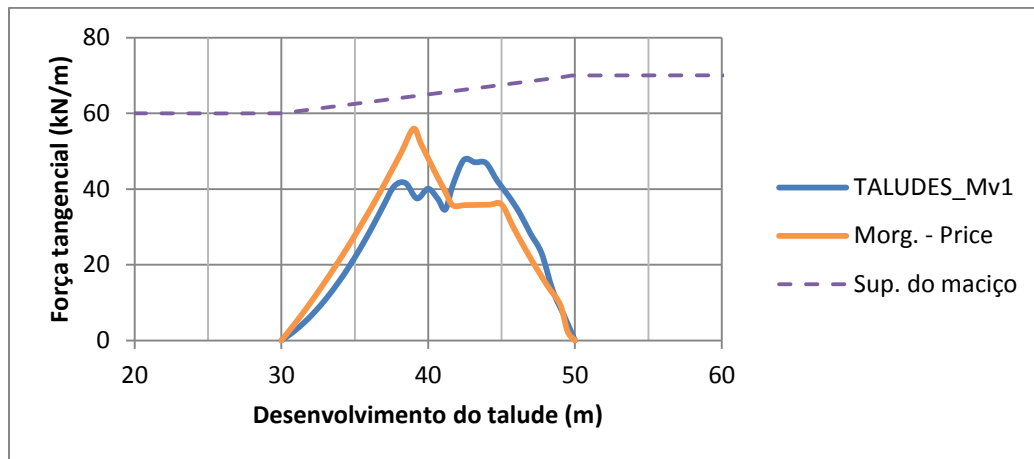


Fig. 6.89 – Distribuição da força tangencial X (Método de Janbu, exemplo 2.3)

Tal como nos exemplos anteriores, verifica-se uma coincidência de valores entre o programa TALUDES_Mv1 e Slide, assim como com o método de Morgenstern-Price. Já no que diz respeito às forças tangenciais, essa coincidência de valores já não é verificada, contudo em grande parte da superfície de deslizamento verifica-se que os dois métodos apresentam valores muito semelhantes, havendo apenas uma maior disparidade na zona média da superfície de deslizamento.

A linha de impulso associada ao estudo deste exemplo encontra-se ilustrada na seguinte figura:

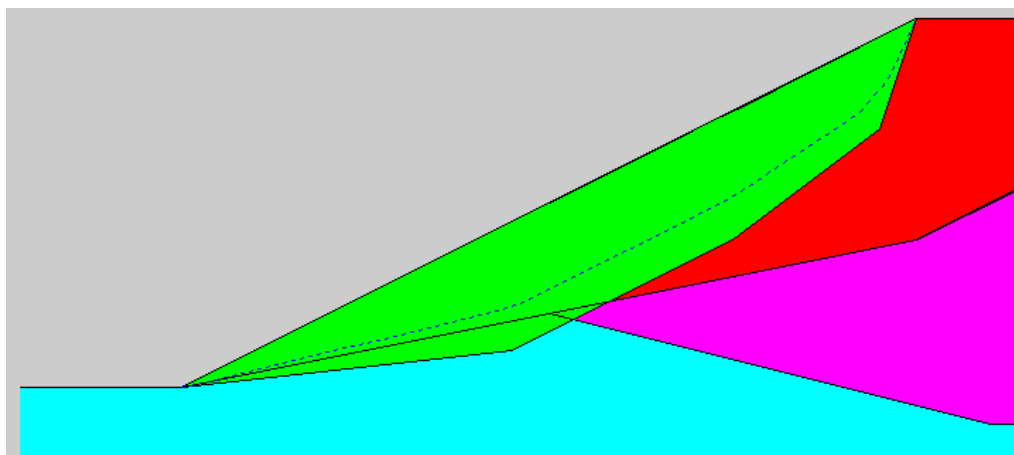


Fig. 6.90 – Linha de impulso (Método de Janbu, exemplo 2.3)

6.3.3.1. Comparação com outros métodos

Calculando o fator de segurança pelos outros métodos implementados no programa TALUDES_Mv1 obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.33 – Fator de segurança (Métodos de Correia, Morgenstern-Price e Janbu, exemplo 2.3)

Correia	Morgenstern-Price	Janbu
1,071	1,089	1,084

Observando os valores obtidos verificamos que todos os métodos convergem para valores idênticos do fator de segurança, sendo apenas o método de Correia o que apresenta uma maior discrepância em relação aos outros valores. No que diz respeito ao número de iterações e tempo de cálculo, o quadro seguinte mostra os valores obtidos:

Quadro 6.34 – Número de iterações e tempo para os vários métodos (exemplo 2.3)

	Correia	Morgenstern-Price	Janbu
nº iterações	4	9	5
tempo (s)	0,178	0,150	0,186

Neste caso o método de Morgenstern-Price mostra ser mais uma vez o mais rápido, apesar de ter necessitado de realizar mais uma iteração em comparação com o exemplo anterior. Já o método de Janbu mostrou ser para este caso o mais demorado, apesar de ter realizado menos duas iterações em comparação com o exemplo anterior.

6.3.4. EXEMPLO 2.4

Para este exemplo considerou-se a mesma geometria e propriedades utilizadas no exemplo 2.2 e adicionou-se o nível freático à cota do pé do talude.

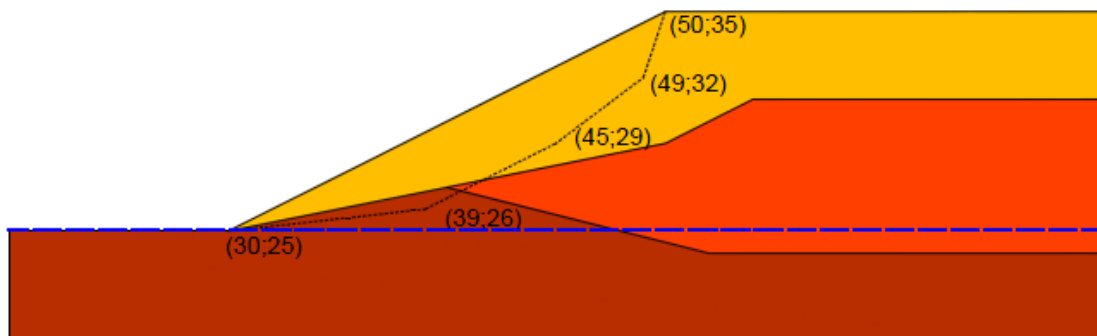


Fig. 6.91 – Exemplo 2.4

Neste exemplo os resultados obtidos são coincidentes com os obtidos no exemplo 2.2 uma vez que, tal como mostra a figura 6.47, o nível freático não abrange a superfície de deslizamento. Desta forma não há introdução de forças provocadas pela água nas fatias sendo o estudo realizado, à semelhança do exemplo 2.2, apenas com o peso das fatias e as forças na base e de interação entre fatias.

6.4. CASO DE ESTUDO 3

Este caso de estudo tem como objetivo analisar a problemática inerente ao método de Janbu, no que diz respeito à convergência de valores. Para tal, considerou-se a geometria e propriedades do material utilizadas no exemplo 1.1 e estudou-se uma superfície circular específica indicada no tutorial do programa slide, constituída por 25 fatias e com centro em (30,149 ; 51,471) e raio igual a 26,407. O fator de segurança esperado deverá ser próximo de 0,986 tal como é referido no tutorial.

O estudo consiste na avaliação dos resultados obtidos para a análise com 7, 20, 50 e 100 fatias e nas quais o número de iterações máximas também varia, sendo consideradas 30, 50 100 e 500 iterações por análise. Desta forma serão avaliados os valores obtidos pelas várias versões implementadas no programa relativas ao método de Janbu.

O quadro seguinte apresenta os valores obtidos relativos ao estudo com 7 fatias:

Quadro 6.35 – Método de Janbu - 7 fatias

	itermáx=30		itermáx=50		itermáx=100		itermáx=500	
	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter
Simp. V1	0,942	7	0,942	7	0,942	7	0,942	7
Simp. V2	0,942	3	0,942	3	0,942	3	0,942	3
Simp. V3	0,942	6	0,942	6	0,942	6	0,942	6
Gen. V1	0,984	18	0,984	18	0,984	18	0,984	18
Gen. V2	0,979	20	0,979	20	0,979	20	0,979	20
Gen. V3	0,979	14	0,979	14	0,979	14	0,979	14
Gen. V4	0,979	14	0,979	14	0,979	14	0,979	14
Gen. V5	0,966	30	0,963	50	1,011	100	1,064	500
Gen. V6	0,979	26	0,979	26	0,979	26	0,979	26
Gen. V7	0,966	30	0,963	50	1,011	100	1,064	500
Gen. V8	0,984	13	0,984	13	0,984	13	0,984	13
Gen. V9	0,984	13	0,984	13	0,984	13	0,984	13
Gen. V10	0,984	16	0,984	16	0,984	16	0,984	16
Gen. V11	0,984	12	0,984	12	0,984	12	0,984	12
Gen. V12	0,984	8	0,984	8	0,984	8	0,984	8
Gen. V13	0,988	10	0,988	10	0,988	10	0,988	10
Gen. V14	0,989	30	0,987	40	0,987	40	0,987	40
Gen. V15	0,986	30	0,987	50	0,987	100	0,987	141
Gen. V16	0,986	24	0,986	24	0,986	24	0,986	24
Gen. V17	0,942	1	0,942	1	0,942	1	0,942	1
Rig. V1	0,899	10	0,899	10	0,899	10	0,899	10
Rig. V2	0,899	10	0,899	10	0,899	10	0,899	10
Rig. V3	0,832	9	0,832	9	0,832	9	0,832	9
Rig. V4	0,984	21	0,984	21	0,984	21	0,984	21
Rig. V5	0,987	9	0,987	9	0,987	9	0,987	9
Rig. V6	0,815	7	0,815	7	0,815	7	0,815	7
Rig. V7	0,899	7	0,899	7	0,899	7	0,899	7
Rig. V8	0,899	7	0,899	7	0,899	7	0,899	7
Rig. V9	NaN	3	NaN	3	NaN	3	NaN	3
Rig. V10	0,907	10	0,907	10	0,907	10	0,907	10
Rig. V11	0,981	9	0,981	9	0,981	9	0,981	9
Rig. V12	1,328	30	1,328	36	1,328	36	1,328	36
Rig. V13	0,122	30	502,096	50	8,46E+08	100	2,66E+60	500

Pela observação do quadro verifica-se que, a maioria das versões convergiram em menos de 30 iterações, contudo algumas das versões convergiram para um valor afastado daquele que seria de esperar. Embora se verifique que algumas das versões chegam a valores próximos do esperado realizando mais do que 30 iterações (versões generalizadas 14 e 15) no caso das versões generalizadas

5 e 7 verifica-se que com apenas 30 iterações os valores obtidos são próximos do esperado, mas à medida que o número de iterações aumenta o valor do fator de segurança afasta-se desse valor tal como é referido em Li (1986). Verifica-se também que algumas das versões convergiram para valores totalmente despropositados como é o caso da versão rigorosa 9 e 13.

Realizando agora a mesma análise mas utilizando 20 fatias foram obtidos os seguintes valores:

Quadro 6.36 – Método de Janbu – 20 fatias

	itermáx=30		itermáx=50		itermáx=100		itermáx=500	
	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter
Simp. V1	0,944	7	0,944	7	0,944	7	0,944	7
Simp. V2	0,944	3	0,944	3	0,944	3	0,944	3
Simp. V3	0,944	6	0,944	6	0,944	6	0,944	6
Gen. V1	0,986	20	0,986	20	0,986	20	0,986	20
Gen. V2	0,984	30	0,984	38	0,984	38	0,984	38
Gen. V3	0,984	15	0,984	15	0,984	15	0,984	15
Gen. V4	0,984	15	0,984	15	0,984	15	0,984	15
Gen. V5	0,974	30	0,971	50	1,01	100	1,071	500
Gen. V6	0,984	25	0,984	25	0,984	25	0,984	25
Gen. V7	0,974	30	0,971	50	1,01	100	1,071	500
Gen. V8	0,986	13	0,986	13	0,986	13	0,986	13
Gen. V9	0,986	14	0,986	14	0,986	14	0,986	14
Gen. V10	0,986	19	0,986	19	0,986	19	0,986	19
Gen. V11	0,986	14	0,986	14	0,986	14	0,986	14
Gen. V12	0,986	6	0,986	6	0,986	6	0,986	6
Gen. V13	0,99	10	0,99	10	0,99	10	0,99	10
Gen. V14	0,284	30	0,284	47	0,284	47	0,284	47
Gen. V15	0,284	26	0,284	26	0,284	26	0,284	26
Gen. V16	1,2	30	-0,062	50	-0,062	100	-0,062	500
Gen. V17	0,944	1	0,944	1	0,944	1	0,944	1
Rig. V1	0,898	10	0,898	10	0,898	10	0,898	10
Rig. V2	0,899	10	0,899	10	0,899	10	0,899	10
Rig. V3	0,83	11	0,83	11	0,83	11	0,83	11
Rig. V4	3,40E-07	27	3,40E-07	27	3,40E-07	27	3,40E-07	27
Rig. V5	0,988	13	0,988	13	0,988	13	0,988	13
Rig. V6	0,882	12	0,882	12	0,882	12	0,882	12
Rig. V7	0,899	8	0,899	8	0,899	8	0,899	8
Rig. V8	0,899	8	0,899	8	0,899	8	0,899	8
Rig. V9	NaN	3	NaN	3	NaN	3	NaN	3
Rig. V10	0,902	9	0,902	9	0,902	9	0,902	9
Rig. V11	0,985	12	0,985	12	0,985	12	0,985	12
Rig. V12	1,61E-06	30	1,60E-07	32	1,60E-07	32	1,60E-07	32
Rig. V13	7,60E-30	2	7,60E-30	2	7,60E-30	2	7,60E-30	2

Analisando os valores obtidos, verifica-se que com o aumento do número de fatias algumas versões que para 7 fatias convergiam 30 ou menos iterações, neste caso precisaram de mais iterações para convergir para o mesmo valor.

Verifica-se também que algumas versões que para 7 fatias chegavam a valores próximos do esperado, neste caso convergiram para valores bastante afastados desse valor como é o caso da versão generalizada nº16 ou da versão rigorosa nº4.

Realizando agora o estudo para 50 fatias obtiveram-se os seguintes valores:

Quadro 6.37 – Método de Janbu – 50 fatias

	itermáx=30		itermáx=50		itermáx=100		itermáx=500	
	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter
Simp. V1	0,944	7	0,944	7	0,944	7	0,944	7
Simp. V2	0,944	3	0,944	3	0,944	3	0,944	3
Simp. V3	0,944	6	0,944	6	0,944	6	0,944	6
Gen. V1	0,987	30	0,987	30	0,987	30	0,987	30
Gen. V2	0,986	30	0,986	50	-8,275	100	-0,438	500
Gen. V3	0,986	30	0,986	50	0,909	100	0,94	500
Gen. V4	0,986	30	0,986	50	0,866	100	0,963	500
Gen. V5	0,967	30	0,944	50	0,089	100	0,567	500
Gen. V6	0,986	24	0,986	24	0,986	24	0,986	24
Gen. V7	0,967	30	0,944	50	0,752	100	0,752	102
Gen. V8	0,987	15	0,987	15	0,987	15	0,987	15
Gen. V9	0,987	18	0,987	18	0,987	18	0,987	18
Gen. V10	0,987	16	0,987	16	0,987	16	0,987	16
Gen. V11	0,987	18	0,987	18	0,987	18	0,987	18
Gen. V12	0,987	8	0,987	8	0,987	8	0,987	8
Gen. V13	0,991	8	0,991	8	0,991	8	0,991	8
Gen. V14	0,284	12	0,284	12	0,284	12	0,284	12
Gen. V15	0,284	10	0,284	10	0,284	10	0,284	10
Gen. V16	-1,727	30	-1,727	50	-1,727	100	NaN	360
Gen. V17	0,944	1	0,944	1	0,944	1	0,944	1
Rig. V1	0,897	11	0,897	11	0,897	11	0,897	11
Rig. V2	0,898	11	0,898	11	0,898	11	0,898	11
Rig. V3	0,838	30	0,838	33	0,838	33	0,838	33
Rig. V4	3,33E-07	20	3,33E-07	20	3,33E-07	20	3,33E-07	20
Rig. V5	0,988	27	0,988	27	0,988	27	0,988	27
Rig. V6	0,108	30	0,066	50	0,071	59	0,071	59
Rig. V7	0,898	11	0,898	11	0,898	11	0,898	11
Rig. V8	0,898	10	0,898	10	0,898	10	0,898	10
Rig. V9	NaN	3	NaN	3	NaN	3	NaN	3
Rig. V10	0,899	10	0,899	10	0,899	10	0,899	10
Rig. V11	0,986	12	0,986	12	0,986	12	0,986	12
Rig. V12	4,88E-07	17	4,88E-07	17	4,88E-07	17	4,88E-07	17
Rig. V13	7,34E-40	2	7,34E-40	2	7,34E-40	2	7,34E-40	2

À semelhança do exemplo anterior, verifica-se que a maioria das versões necessitou de um maior número de iterações para convergir. Verifica-se também que com o aumento do número de fatias algumas versões que nos exemplos anteriores davam valores próximos do esperado, neste caso, mesmo para um número reduzido de iterações, convergem logo para valores irrisórios do fator de segurança.

Realizando agora o mesmo exemplo mas considerando 100 fatias obtemos os seguintes resultados:

Quadro 6.38 – Método de Janbu – 100 fatias

	itermáx=30		itermáx=50		itermáx=100		itermáx=500	
	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter	FS	nº iter
Simp. V1	0,944	7	0,944	7	0,944	7	0,944	7
Simp. V2	0,944	3	0,944	3	0,944	3	0,944	3
Simp. V3	0,944	6	0,944	6	0,944	6	0,944	6
Gen. V1	0,988	30	0,353	50	0,28	100	0,582	500
Gen. V2	-2,465	30	-16,049	50	-2,129	100	NaN	391
Gen. V3	1,273	30	-0,261	50	-0,261	70	-0,261	70
Gen. V4	0,732	30	0,567	50	-0,2	100	-0,2	105
Gen. V5	0,967	30	-0,171	50	-1,985	100	NaN	500
Gen. V6	0,986	23	0,986	23	0,986	23	0,986	23
Gen. V7	0,937	30	-0,171	50	-0,047	100	NaN	365
Gen. V8	0,988	9	0,988	9	0,988	9	0,988	9
Gen. V9	0,987	8	0,987	8	0,987	8	0,987	8
Gen. V10	0,987	22	0,987	22	0,987	22	0,987	22
Gen. V11	0,987	14	0,987	14	0,987	14	0,987	14
Gen. V12	0,987	7	0,987	7	0,987	7	0,987	7
Gen. V13	0,991	8	0,991	8	0,991	8	0,991	8
Gen. V14	0,284	10	0,284	10	0,284	10	0,284	10
Gen. V15	0,284	8	0,284	8	0,284	8	0,284	8
Gen. V16	-0,605	30	-0,605	50	-0,605	100	NaN	229
Gen. V17	0,944	1	0,944	1	0,944	1	0,944	1
Rig. V1	0,897	11	0,897	11	0,897	11	0,897	11
Rig. V2	0,897	11	0,897	11	0,897	11	0,897	11
Rig. V3	0,88	30	-4,26	50	0,214	100	NaN	444
Rig. V4	3,85E-07	18	3,85E-07	18	3,85E-07	18	3,85E-07	18
Rig. V5	1,042	30	-0,058	50	-1,85E-11	68	-1,85E-11	68
Rig. V6	-0,049	30	-0,093	50	0,065	98	0,065	98
Rig. V7	0,897	9	0,897	9	0,897	9	0,897	9
Rig. V8	0,897	9	0,897	9	0,897	9	0,897	9
Rig. V9	NaN	3	NaN	3	NaN	3	NaN	3
Rig. V10	0,897	12	0,897	12	0,897	12	0,897	12
Rig. V11	0,987	13	0,987	13	0,987	13	0,987	13
Rig. V12	3,14E-07	22	3,14E-07	22	3,14E-07	22	3,14E-07	22
Rig. V13	1,75E-75	2	1,75E-75	2	1,75E-75	2	1,75E-75	2

Tal como no exemplo anterior verifica-se que com o aumento do número de fatias mais versões convergiram para valores desapropriados do fator de segurança como é o caso da versão generalizada nº 2 e nº3 que para os restantes exemplos chegavam a valores próximos do esperado, neste exemplo tal não aconteceu. Outras versões como é o caso da versão generalizada nº 7 chega a um valor próximo do esperado em 30 iterações mas com o aumento destas o valor afasta-se bastante acabando por não convergir para um valor coerente, o que mostra bem o citado em Li (1986).

Em suma podemos concluir que, para um número reduzido de iterações e de fatias, o método de Janbu chega a valores próximos dos esperados, mas à medida que estes aumentam o método está mais suscetível à introdução de erros durante o cálculo que podem estar associados à divisão por número pequenos. Embora não sejam aqui apresentadas, o mesmo se passa no cálculo das forças atuantes na base das fatias e de interação entre fatias, havendo casos em que, embora o fator de segurança seja próximo do obtido pelos outros métodos, as forças a que se chegam apresentam valores bastante afastados dos que seriam de esperar sendo até alguns irrisórios para este tipo de análise.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de Spencer mostrou ser um método bastante estável e que necessita de poucas iterações para convergir, chegando a valores que pouco diferem em relação aos obtidos nos programas comerciais Slope e Slide ou utilizando outros métodos. Apesar das poucas iterações necessárias o maior esforço de cálculo a ele associado torna a convergência mais lenta em comparação com outros métodos. No que diz respeito ao valor das forças e distribuição ao longo da superfície de deslizamento obtidas por este método, todos os exemplos mostraram uma distribuição idêntica à obtida pelos restantes programas, havendo apenas algumas diferenças de valores que podem estar relacionadas com diferenças nas dimensões das fatias entre os programas. Um aspeto relevante associado a este método, na sua formulação original considerada neste trabalho, diz respeito à impossibilidade da sua utilização no estudo de superfícies de forma poligonal, fazendo com que este seja um dos principais aspetos limitadores da sua aplicação.

Quanto ao método de Janbu, este mostrou ser um método com alguma instabilidade devido à sensibilidade e flutuação de valores que apresenta resultantes da divisão por números pequenos. Apesar das várias versões implementadas na tentativa de contornar o problema associado a este método, os resultados mostram que a propagação de erros durante o cálculo leva a que muitas das versões cheguem a valores irrisórios do fator de segurança e das forças atuantes nas fatias. Como tal é aconselhável a utilização de um número reduzido de fatias e de iterações, e um critério de paragem com uma tolerância menos “apertada” para que a indução de erros numéricos seja a menor possível. Dos resultados obtidos verifica-se que se chega a valores bastante próximos dos esperados do fator de segurança, embora se verifique algumas diferenças nos valores das tensões de forças obtidas pelos diferentes programas. Esta diferença deve-se ao facto de os três programas utilizados aplicarem diferentes versões do método de Janbu, isto é, o Slope aplica a versão simplificada do método, onde o cálculo do fator de segurança é feito desprezando as forças de interação entre fatias, o Slide aplica a versão corrigida, onde o fator de segurança resulta do produto do fator de segurança calculado pela versão simplificada por coeficiente corretivo dependente do tipo de solo, e o TALUDES_Mv1 aplica a versão rigorosa, seguindo a formulação apresentada por Janbu. Comparando os valores das tensões e das forças obtidas com as obtidas pelo método de Morgenstern-Price verificamos que os resultados são bastante idênticos entre eles, o que mostra que o método apresenta uma distribuição de tensões e forças satisfatória em comparação com a apresentada por outros métodos rigorosos.

Contudo poderá haver casos em que, para um valor do fator de segurança próximo do esperado, as forças atuantes nas fatias e a sua distribuição ao longo da superfície de deslizamento em nada se aproximem das obtidas por outros programas ou outros métodos. Desta forma podemos dizer que apesar deste método permitir o estudo de superfícies de qualquer forma, os problemas de convergência a ele associados fazem com que a sua aplicação deva ser cautelosa e verificada por outro método.

Em síntese, pode-se dizer que estes dois métodos de equilíbrio limite levam a resultados satisfatórios do fator de segurança e de forças atuantes nas fatias, embora os dois apresentem limitações, no caso no método de Spencer, a não possibilidade de calcular superfícies de qualquer forma, no caso do método de Janbu, a problemática de convergência a ele associada, fazendo com que a credibilidade de resultados seja reduzida em comparação com outros métodos.

Em relação ao programa TALUDES_Mv1, este revelou-se bastante interativo e eficiente nos resultados obtidos.

Existem no entanto alguns melhoramentos que se poderão incluir, nomeadamente:

- Inclusão de um desenvolvimento que permita a utilização do método de Spencer no estudo de superfícies de qualquer forma;
- Definição de um algoritmo que permita reduzir a flutuação de valores verificada no método de Janbu, levando a resultados mais fidedignos;
- Possibilidade de incluir sobrecargas;
- Possibilidade de incluir pregagens e ancoragens.

BIBLIOGRAFIA

- Aryal, K. P. (2006). *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods*. Dissertação de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology.
- Campos e Matos, A. (1980). *Um programa de cálculo automático da estabilidade de taludes*. Boletim do Gabinete de Estruturas, Setembro/1980, 1-9, FEUP, Porto.
- Duncan, J. M. (1996). *State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 7/July/1996, 577-596.
- Faustino, A.M. (2009), *Linguagem Matlab - Apontamentos*, FEUP.
- Ferreira, A.J.M (2009), *Matlab codes for Finite Elements analysis*, Springer, Porto.
- Fredlund, D.G., Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp.429-439.
- Fredlund, D.G., Krahn, J., and Pufahl, D.E. (1981). *The relationship between limit equilibrium slope stability methods*. In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 3: pp. 409-416.
- Freitas, Marco António (2011). *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Gerscovich, D. (2009). *Estabilidade de taludes*. <http://pt.scribd.com/doc/66276545/Estabilidade-de-Taludes-UERJ>. (acedido em 08/11/2011).
- Gomes, R. (2011). Aula 1 – Taludes e movimentos de massa. <http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~romerocesar/Aula1PPT.pdf>. (acedido em 08/11/2011).
- Guedes de Melo, P. (1993), *Taludes naturais em solos - Técnicas de estabilização e seu dimensionamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- Janbu, N. (1954). *Application of composite slip surface for stability analysis*. Proc. European conf. Stability of earth slopes, Vol. 3, pp. 43-49.
- Janbu, N. (1954). *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*. Ph.D. Thesis in Civil Engineering, Faculty of Arts and Sciences of Harvard University.
- Janbu, N. (1957). *Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices*. Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 2: pp. 207-212.
- Janbu, N. (1973). *Slope Stability Computation*. Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, ed. R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, John Wiley and Sons, N.Y. pp.49-86.
- Janbu, N. (1980). *Critical evaluation of the approaches to stability analysis of landslides and other mass movements*. Proc. Int. Symposium on Landslides, New Delhi, Vol. 2: pp. 109-128.
- Krahn, J. (2003). *The 2001 R.M. Hardy lecture: The limits of limit equilibrium analyses*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.40, pp. 643-660.
- Li, K.S. (1986). *A re-appraisal of Janbu's General Procedure of Slices*. Hong Kong Engineer, pp. 19-24.

- Li, K.S. and White, W. (1987). *Rapid evaluation of the critical slip surface in slope stability problems*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 11: pp. 449-473.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais*, Volume 1. FEUP Edições, Porto.
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos*, Volume 2. FEUP Edições, Porto.
- Siegel, R.A. (1975). *Computer Analysis of General Slope Stability Problems*. Publication FHWA/IN/JHRP-75/08. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Silva, André Filipe (2010). *Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo método de Correia*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Silva, João Paulo (2011). *Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na análise de estabilidade de taludes*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.
- Slide, Rocscience inc., manual.
- Slope, Geo-Slope inc., manual.
- Spencer, E. (1967). *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces*. Géotechnique, Vol. 17: pp. 11-26.
- Spencer, E. (1973). *Thrust line criterion in embankment stability analysis*. Géotechnique, Vol. 23(1): pp. 85-100.
- Terzaghi, K., e Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.
- Varnes, D.J. (1978). *Slope movement types and processes*. Landslides: Analysis and Control. Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, pp. 11-33.
- Whitman, R. and Bailey, W. (1967). *Use of computers for slope stability analysis*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 93(SM4): 475-498.
- Zhu, D.Y. (2008). *Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method*. Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds.), pp. 1055-1057, Taylor & Francis Group, London.