

FENÓMENOS TRANSITÓRIOS DE HUMIDIFICAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES NA REGIÃO DEMARCADA DO DOURO

PATRÍCIA ALEXANDRA MOREIRA CANEDO

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

Orientador: Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

Coorientador: Engenheira Carmina da Conceição Fonseca Costa

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

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 - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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.

Ao Daniel

If liberty means anything at all, it means the right to tell people what they do not want to hear.

George Orwell

AGRADECIMENTOS

Ao professor Campos e Matos pela disponibilidade, delicadeza e prontidão para facultar novos dados e facilitar contactos que possibilitaram a elaboração deste estudo.

À Carmina Costa, pelo auxílio prestado, interesse demonstrado e tempo disponibilizado durante todo o trabalho.

Ao professor António Topa Gomes, pela ajuda e tempo dedicados aquando da modelação numérica.

Ao Engenheiro José Eduardo Costa pela gentileza com que me recebeu no Douro e pela ajuda na percepção dos interesses das quintas durienses; e à Quinta do Noval por facultar dados da sua estação meteorológica, muito importantes para a realização deste estudo.

À Joana, pela conversa informal durante o café, e pela iniciação no *software* utilizado.

Ao Daniel, pela introdução ao Visual Basic, e pela paciência, carinho, dedicação e companheirismo ao longo dos anos.

À minha família, por fazerem de mim a pessoa que sou hoje.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio e incentivo.

RESUMO

As encostas da Região Demarcada do Douro são de uma morfologia e geologia únicas, e na existência de fenómenos de precipitação mais intensos ou extensos registam-se escorregamentos que poderão ser nocivos, não só pelos estragos provocados, mas também pelo impacto negativo que isso tem nas finanças das entidades gestoras das quintas onde estes escorregamentos ocorrem. Assim, é importante fazer uma gestão controlada da vinha, e aquando da reestruturação da mesma considerar formas de mitigar os escorregamentos. Este trabalho faz uma abordagem geotécnica a este problema, procurando avaliar que fatores são responsáveis pelo controlo da estabilidade deste tipo de encostas, e sobre os quais se poderá atuar aquando da construção, reconstrução ou manutenção das mesmas, por forma a minimizar os custos e riscos associados. Sabe-se que a água infiltrada no solo aumenta o seu grau de saturação, pelo avanço de uma frente de humedecimento, alterando o estado de tensão das camadas mais superficiais, mais fracas, passíveis de escorregar. A granulometria extensa dos solos desta região dificulta o estudo das características geológicas e geotécnicas dos mesmos, enquanto a geometria acidentada e a pequena espessura da camada de solo superficial implicam que os fatores de segurança sejam reduzidos, o que é ainda agravado aquando da sua saturação, registando-se claramente uma perda de coesão no solo.

Para estudar estes fenómenos e fazer um compêndio de informação que poderá ser útil para os agricultores e engenheiros agrónomos da região, recorreu-se a uma ferramenta de cálculo automático, Slide 6.0 da Rocscience, que faz análises de estabilidade de taludes completamente integradas com a análise de infiltração.

PALAVRAS-CHAVE: Infiltração, Solos Não Saturados, Sucção, Estabilidade de Taludes, Rentabilidade, Região Demarcada do Douro.

ABSTRACT

The slopes from the Douro Demarcated Region present a unique morphology and geology, and in the existence of more intense or extended precipitation phenomena landslides occur which might be harmful, not only because of the damages instigated, but also because of the negative impact in the finances of the administrative entities of the *quintas* where these accidents happen. Therefore, it is important to have a controlled management of the vineyard, and when restructuring it, ways of mitigating the landslides must be considered. This paper makes a geotechnical approach to this problem, trying to evaluate which factors are responsible in the stability control of such slopes, and on which we can act during the construction, reconstruction or maintenance of the same, in order to minimize associated costs and risks. It is known that the water infiltrated into the soil increases its degree of saturation, by the advancing of a wetting front, changing the stress state of the most superficial layers, which are weaker, susceptible to slip. The wide soil gradation from the soils of this region hampers the study of their geological and geotechnical characteristics, while the rugged geometry allied with the small thickness of the topsoil imply that the safety factors are reduced, which is exacerbated when the soil gets saturated, and a clear loss of cohesion in the soil is noticed.

To study these phenomena and make a compendium of information that may be used by farmers and agronomists in the region, a tool for automatic computation was used, Slide 6.0 from Rocscience, which performs slope stability analysis completely integrated with seepage analysis.

KEYWORDS: Infiltration, Unsaturated Soils, Suction, Slope Stability, Profitability, Douro Demarcated Region.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. CASO DE ESTUDO E AS SUAS PARTICULARIDADES	3
2. REGIÃO DEMARCADA DO DOURO	5
2.1. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL	5
2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	6
2.3. A VINHA	8
2.3.1. TIPOS DE VINHA E A SUA EVOLUÇÃO HISTÓRICA	8
2.3.1.1. Vinha Pré-filoxera	8
2.3.1.2. Vinha Pós-filoxera	9
2.3.1.3. Vinha em Patamares de Dois Bardos	10
2.3.1.4. Vinha em Patamares de Um Bardo	11
2.3.1.5. Vinha ao Alto	11
2.3.1.6. Vinha em Micropatamares	12
2.3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
2.4. EVOLUÇÃO LEGISLATIVA	13
2.4.1. LEGISLAÇÃO POMBALINA 1755-1776: O INÍCIO DA MODERNIZAÇÃO DA VINHA	13
2.4.2. PERÍODO CONTEMPORÂNEO	14
2.4.2.1. Sobre o Local de Instalação da Vinha	14
2.4.2.2. Sobre as Formas de Armar o Terreno	14
2.4.2.3. Sobre a Densidade de Plantação	15
2.4.2.4. Sobre a Manutenção do Solo	16
2.4.2.5. Sobre os Declives do Terreno	17
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	17

3. SOLOS NÃO SATURADOS	19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. O CLIMA	19
3.3. FASES DE UM SOLO NÃO SATURADO	20
3.4. SUCÇÃO	21
3.4.1. CAPILARIDADE	21
3.4.2. SUCÇÃO MÁTRICA E OSMÓTICA	22
3.4.3. CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO	22
3.4.4. AJUSTE DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM SOLO	24
3.5. PERMEABILIDADE EM SOLOS NÃO SATURADOS	25
3.6. TENSÕES DE CORTE EM SOLOS NÃO SATURADOS	25
3.7. SOLOS SUSCETÍVEIS DE ATRAIR E RETER ÁGUA: SOLOS ARGILOSOS	27
3.7.1. CONSISTÊNCIA DO SOLO E LIMITES DE ATTERBERG	27
3.7.2. APLICABILIDADE NO CASO DE ESTUDO	28
4. INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA ESTABILIDADE DE TALUDES	29
4.1. CICLO DA ÁGUA	29
4.1.1. PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO	30
4.2. PRECIPITAÇÃO	31
4.2.1. INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO CONSTANTE: CURVAS IDF	31
4.2.2. PRECIPITAÇÕES REAIS MEDIDAS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E/OU POSTOS UDOMÉTRICOS	32
4.3. ESCOAMENTO SUPERFICIAL	32
4.4. INFILTRAÇÃO	33
4.4.1. GENERALIDADES	33
4.4.2. LEI DE DARCY	35
4.4.3. INFLUÊNCIA DA INFILTRAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES	35
4.4.4. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO OU VOLUME DE INFILTRAÇÃO	37
4.4.4.1. Equação de Kostiakov	38
4.4.4.2. Equação de Horton	38
4.4.4.3. Equação de Green-Ampt	39
4.5. INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO	39
4.5.1. EFEITOS MECÂNICOS	40

4.5.1.1. Reforço Radicular.....	40
4.5.1.2. Sobrecarga.....	41
4.5.1.3. Proteção da Superfície.....	42
4.5.2. EFEITOS HIDROLÓGICOS.....	42
4.5.2.1. Evapotranspiração.....	42
4.5.2.2. Interceção.....	42
4.5.2.3. Infiltração.....	43
4.5.3. RESUMO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	43
4.5.3.1. Vantagens.....	43
4.5.3.2. Desvantagens.....	44
4.5.3.3. Efeitos que Poderão ser Vantajosos e/ou Adversos.....	44

5. MODELOS DE RECONSTRUÇÃO DE MUROS DE XISTO DE PEDRA POSTA E MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS NA RDD.....	45
5.1. MODELOS DE RECONSTRUÇÃO DE MUROS DE XISTO DE PEDRA POSTA.....	45
5.2. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS.....	47
5.2.1. DRENAGEM.....	47
5.2.1.1. Drenagem Superficial.....	47
5.2.1.2. Drenagem Profunda.....	48
5.2.2. VEGETAÇÃO.....	48
5.2.3. OUTRAS FORMAS DE ESTABILIZAÇÃO DAS ENCOSTAS NA RDD.....	49

6. CASO DE ESTUDO: DADOS DO PROJETO E APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSIDERADOS NA MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	51
6.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO: DADOS DO PROJETO.....	51
6.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	53
6.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	54
6.2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	57
6.2.1. TIPO DE MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE UTILIZADO.....	58
6.2.1.1. Métodos Rigorosos.....	58

6.2.2. CRITÉRIOS DE ROTURA	60
6.2.2.1. Critério de Rotura Mohr-Coulomb	60
6.2.2.2. Critério de Rotura Hoek-Brown Generalizado	61
6.2.3. OUTROS PARÂMETROS ASSUMIDOS	61
6.3. INFILTRAÇÕES IMPOSTAS AO MODELO	62

7. CASO DE ESTUDO: MODELAÇÃO NUMÉRICA E

RESULTADOS	65
7.1. SELEÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO	65
7.1.1. SUCÇÃO E FATOR DE SEGURANÇA AO LONGO DO TEMPO	66
7.1.1.1. Modelo A	67
7.1.1.2. Modelo B	69
7.1.1.3. Modelo C	70
7.1.2. CONSIDERAÇÕES E MODELO SELECIONADO	71
7.2. ANÁLISES NÃO DRENADAS	72
7.3. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO INICIAL DO NÍVEL FREÁTICO NA SUCÇÃO DO SOLO	74
7.3.1. NÍVEL FREÁTICO A 8 METROS DE PROFUNDIDADE	75
7.3.2. NÍVEL FREÁTICO A 12 METROS DE PROFUNDIDADE	75
7.3.3. COMENTÁRIOS	77
7.4. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE DAS DIFERENTES ARMAÇÕES DE TERRENO	77
7.4.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ARMAÇÕES DE TERRENO ESTUDADAS	77
7.4.1.1. Vinha ao Alto	77
7.4.1.2. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos	78
7.4.1.3. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo	78
7.4.1.4. Sobre a Geometria	78
7.4.2. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE EM ENCOSTAS COM β IGUAL A 30%	80
7.4.2.1. Vinha ao Alto	80
7.4.2.2. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos	81
7.4.2.3. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo	82
7.4.3. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE EM ENCOSTAS COM β IGUAL A 40%	82
7.4.3.1. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos	83
7.4.3.2. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo	84
7.4.4. ESTUDO COMPARATIVO DOS TIPOS DE ARMAÇÃO ESTUDADOS	85

7.4.5. ESTUDO INCIDINDO SOBRE A ALTERAÇÃO DE θ85

8. APLICAÇÃO PARA O CÁLCULO DA LARGURA E ALTURA DE TALUDES E DENSIDADE DE PLANTAÇÃO89

8.1. INTRODUÇÃO89

8.2. CÁLCULO DA LARGURA E ALTURA DE TALUDES89

8.2.1. FORMULAÇÃO89

8.2.2. MANUAL DE UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA91

8.3. CÁLCULO DA DENSIDADE DE PLANTAS91

8.3.1. VINHA AO ALTO.....91

8.3.2. PATAMARES LARGOS DE DOIS BARDOS92

8.3.3. PATAMARES ESTREITOS DE UM BARDO93

8.3.4. MANUAL DE UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA94

8.3.4.1. Vinha ao Alto95

8.3.4.2. Patamares Estreitos de Um Bardo.....95

8.3.4.3. Patamares Largos de Dois Bardos96

8.4. COMENTÁRIO96

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS97

BIBLIOGRAFIA.....99

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. – Os socalcos do vale do Douro	1
Fig. 2.1. – A RDD: enquadramento natural	5
Fig. 2.2. – Litologia da Região Demarcada do Douro	7
Fig. 2.3. – Perfil de um Antrossolo assente em <i>bedrock</i> de xisto	7
Fig. 2.4. – Vinha pré-filoxera (à esquerda) e vinha pós-filoxera (à direita)	9
Fig. 2.5. – Vinha em patamares de dois bardos	10
Fig. 2.6. – Vinha em patamares de um bardo	11
Fig. 2.7. – Vinha ao alto	12
Fig. 2.8. – Vinha em micropatamares	12
Fig. 2.9. – Enrelvamento da entrelinha entre patamares na Quinta da Romaneira	16
Fig. 3.1. – Tensão superficial na interface ar-água. Pressões e tensão superficial atuantes numa superfície curva bidimensional	20
Fig. 3.2. – Esquema que exemplifica o efeito capilaridade nos maciços terrosos	21
Fig. 3.3. – Curvas de sucção de solos tipo, em função da granulometria	23
Fig. 3.4. – Curva característica do solo, com o detalhe da curva de secagem e humedecimento	24
Fig. 3.5. – Critério de rotura de Mohr-Coulomb para solos não saturados	26
Fig. 3.6. – Limites de Atterberg	27
Fig. 4.1. – Ciclo hidrológico	29
Fig. 4.2. – Exemplo de uma curva IDF	31
Fig. 4.3. – Corte de um talude com representação das zonas de aeração e saturação	34
Fig. 4.4. – Fotografia representativa da frente de humedecimento	36
Fig. 4.5. – Curvas típicas da taxa de infiltração de vários tipos de solo	37
Fig. 4.6. – Forças numa massa de solo prestes a escorregar	40
Fig. 5.1. – Exemplos de obras de estabilização realizadas na RDD	45
Fig. 5.2. – Esquema representativo dos modelos de recuperação dos muros do Douro	46
Fig. 5.3. – Fotografia de uma obra de estabilização realizada com recurso a gabiões, na EN 222	46
Fig. 5.4. – Sistemas de drenagem de manilhas de cana completa e meia cana	48
Fig. 6.1. – Localização aproximada do muro e encosta	52
Fig. 6.2. – Deslizamentos verificados nos socalcos da Quinta de Melres	52
Fig. 6.3. – Derrocada parcial do muro	52
Fig. 6.4. – Fragmento da Carta Geológica de Portugal	53

Fig. 6.5. – Planta da encosta com representação dos locais onde ocorreram os escorregamentos mais graves	54
Fig. 6.6. – Perfil transversal da encosta no alinhamento CD	55
Fig. 6.7. – Forças atuantes numa fatia de uma massa de solo prestes a deslizar, com superfície de deslizamento composta	59
Fig. 6.8. – Precipitação média mensal registada na Quinta do Noval e em Vila Real	63
Fig. 6.9. – Infiltrações horárias impostas ao modelo	64
Fig. 7.1. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo A	65
Fig. 7.2. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo B	66
Fig. 7.3. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo C	66
Fig. 7.4. – Sucção na camada superficial nos três modelos e fator de segurança mínimo nos três modelos antes da infiltração	67
Fig. 7.5. – Sucção ao longo do tempo no Modelo A	67
Fig. 7.6. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo A	68
Fig. 7.7. – Superfície de deslizamento imediatamente após o instante 39600s e pressões na água dos poros positivas	68
Fig. 7.8. – Sucção ao longo do tempo no Modelo B	69
Fig. 7.9. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo B	69
Fig. 7.10. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 2 semanas	70
Fig. 7.11. – Sucção ao longo do tempo no Modelo C	70
Fig. 7.12. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo C	71
Fig. 7.13. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 2 meses e 2 semanas	71
Fig. 7.14. – Sucção ao longo do tempo no Modelo B, numa análise não drenada	73
Fig. 7.15. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo B, numa análise não drenada	73
Fig. 7.16. – Relação entre o teor em água e a coesão ou resistência não drenada	74
Fig. 7.17. – Relação entre a resistência não drenada e coesão efetiva com o teor em água	74
Fig. 7.18. – Superfície de deslizamento com fator de segurança mínimo antes de se iniciar a infiltração	75
Fig. 7.19. – Sucção ao longo do tempo, com um nível freático inicial a 12 metros de profundidade	76
Fig. 7.20. – Fator de segurança ao longo do tempo, com um nível freático inicial a 12 metros de profundidade	76
Fig. 7.21. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 1 mês e 2 semanas	76
Fig. 7.22. – Figura representativa da nomenclatura usada na inclinação da encosta e na inclinação dos taludes	79

Fig. 7.23. – Modelo representativo da vinha ao alto na análise de infiltrações	80
Fig. 7.24. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, na vinha ao alto.....	80
Fig. 7.25. – Modelo representativo da vinha em patamares largos de dois bardos na análise de infiltrações	81
Fig. 7.26. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares largos de dois bardos	81
Fig. 7.27. – Modelo representativo da vinha em patamares estreitos de um bardo na análise de infiltrações	82
Fig. 7.28. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo	82
Fig. 7.29. – Modelo representativo da vinha em patamares largos de dois bardos na análise de infiltrações	83
Fig. 7.30. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares largos de dois bardos	83
Fig. 7.31. – Modelo representativo da vinha em patamares estreitos de um bardo na análise de infiltrações	84
Fig. 7.32. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo	84
Fig. 7.33. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo e θ igual a 150%.....	86
Fig. 7.34. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo e θ igual a 200%.....	86
Fig. 8.1. – Geometria tipo da sistematização de vinha em patamares	89
Fig. 8.2. – Interface da aplicação para calcular larguras e alturas de taludes.....	91
Fig. 8.3. – Esquema representativo da sistematização da vinha ao alto no cálculo de densidade de plantas	92
Fig. 8.4. – Esquema representativo da sistematização da vinha em patamares largos de dois bardos no cálculo de densidade de plantas	93
Fig. 8.5. – Esquema representativo da sistematização da vinha em patamares estreitos de um bardo no cálculo de densidade de plantas	94
Fig. 8.6. – Janela de seleção da armação de terreno para calcular a densidade de plantas	94
Fig. 8.7. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em vinha ao alto	95
Fig. 8.8. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em patamares estreitos de um bardo	95
Fig. 8.9. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em patamares largos de dois bardos.....	96

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. – Cálculo do número de videiras por hectare em função dos parâmetros apresentados para patamares de 2 bardos, (ADVID, 2004).....	15
Quadro 2.2. – Cálculo do número de videiras por hectare em função dos parâmetros apresentados para patamares de 1 bardo, (ADVID, 2004)	16
Quadro 6.1. – Quadro resumo com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório.....	56
Quadro 6.2. – Zonamento das camadas geotécnicas	56
Quadro 6.3. – Quadro resumo das propriedades geotécnicas das camadas ZG0 a ZG3	57
Quadro 6.4. – Propriedades geotécnicas da camada ZG4.....	57
Quadro 6.5. – Parcelas dos diferentes compostos do solo recolhido no Poço 2	62
Quadro 6.6. – Precipitações no mês da ocorrência e nos meses anteriores	63
Quadro 7.1. – Quadro resumo das geometrias adotadas nos casos em estudo	79
Quadro 7.2. – Resumo da densidade de plantas e fatores de segurança mínimos dos diferentes tipos de armação e declives da encosta.....	85
Quadro 7.3. – Quadro resumo das geometrias adotadas com a alteração de θ	86
Quadro 7.4. – Quadro resumo comparativo entre os diferentes declives de talude.....	87

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

u_a – Pressão no ar dos poros do solo [kPa]

u_w – Pressão na água dos poros do solo [kPa]

h_{cmin} – Altura mínima da ascensão capilar [m]

$h_{cmáx}$ – Altura máxima da ascensão capilar [m]

θ_w – Teor em água volumétrico

w – Teor em água gravimétrico

S – Grau de saturação

ψ_a – Air-entry Value [kPa]

θ_r – Teor em água residual

ψ_r – Sucção residual [kPa]

ψ_w – Sucção mátrica [kPa]

θ_s – Teor em água volumétrico saturado

c' – Coesão efetiva [kPa]

ϕ' – Ângulo de atrito efetivo [°]

ϕ^b – Ângulo que indica a taxa de aumento da resistência tangencial relativa à sucção mátrica [°]

τ – Tensão tangencial [kPa]

C – coeficiente de escoamento superficial

γ_w – Peso volúmico da água [kN/m³]

z – Profundidade [m]

k_s – Condutividade hidráulica saturada [m/s]

E_t – Taxa de evapotranspiração da cobertura vegetal

E_0 – Taxa de evaporação num corpo de água ao ar livre

E_p – Taxa de evapotranspiração potencial

E_a – Taxa de transpiração da cobertura vegetal

s_u – Resistência não drenada [kPa]

E – Módulo de deformabilidade [GPa]

β – Declive da encosta [°], [%]

θ – Declive dos taludes [°], [%]

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

RDD – Região Demarcada do Douro

DRAPN – Direção Regional de Agricultura e Pescas do Norte

GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia

REN – Reserva Ecológica Nacional

PIOTADV – Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território do Alto Douro Vinhateiro

CCDRN – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte

OILB – Organização Internacional de Luta Biológica

NE – Nordeste

SW – Sudoeste

ADVID – Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense

PRODI – Produção Integrada

AEV – Air-entry Value

IDF – Intensidade, Duração, Frequência

FHWA – Federal Highway Administration

SCS – Soil Conservation Service

USGS – United States Geological Survey

EN 222 – Estrada Nacional Nº 222

SPT – Standard Penetration Test

ASTM – American Society for Testing and Materials

ZG – Zona Geotécnica

RQD – Rock Quality Designation

GSI – Geological Strength Index

GLE – General Limit Equilibrium

CHASM – Combined Hydrology and Slope Stability Model

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

FS – Fator de Segurança

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

Fig. – Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A região vinhateira do Baixo e Cima do Corgo e Douro Superior, vulgarmente conhecida como Alto Douro Vinhateiro, é de grande importância económica, turística e patrimonial. Em 2001 a UNESCO elevou-a a Património da Humanidade, pelo seu carácter único, e pela integração dos muros de xisto na autenticidade da paisagem cultural. Graças às suas condições singulares, as vinhas da Região Demarcada do Douro, doravante designada RDD, produzem um vinho único reconhecido internacionalmente, que se tem aliado à gastronomia e turismo de alto nível. A aposta crescente na qualidade impulsiona um bom contributo para a economia local e consequentemente, do país. A qualidade é uma marca inteligível do desenvolvimento, e é propulsionada pela inovação, criatividade, conhecimento e investimento. Foram ao longo dos anos criadas entidades nacionais que regulam o mercado vitivinícola, com especial atenção para o Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, que promove o controlo da qualidade e quantidade dos vinhos do Porto, estatuidando o processo produtivo, entre outras coisas. Adicionalmente, as empresas gestoras das quintas durienses têm todo o interesse em elevar a qualidade do vinho produzido, para enobrecer o nome da sua marca e produtos, e simultaneamente conseguir retorno financeiro.



Fig. 1.1. – Os socalcos do vale do Douro, [1]

Esse retorno financeiro não depende apenas da qualidade de produção do vinho, mas também da manutenção da vinha. A economia da RDD está interligada com a manutenção das suas estruturas, o que representa uma grande parcela da despesa anual e estes gastos são considerados investimentos não produtivos. Entre eles está a recuperação de muros de suporte de pedra posta, a requalificação de casebres ou cardenhos e pombais. Destes, o que apresenta um maior problema é a recuperação de muros de suporte de pedra posta, principalmente em anos de grande pluviosidade, em que ocorrem mais derrubes de muros, e a sua reconstrução pode ter custos avultados. Assim, registam-se fenómenos de escorregamento de taludes, e derrubamento de muros de xisto de “pedra posta” quando as condições meteorológicas são mais adversas. Estes últimos por si só representam um custo muito grande. Segundo José Pereira, assessor da Direção Regional de Agricultura e Pescas do Norte (DRAPN) espera-se atingir os 200 quilómetros de muros reconstruídos em mais de uma década, projetando um investimento de 125 milhões de euros, [2] e [3].

No âmbito do presente trabalho foram realizadas algumas visitas à RDD e uma das quintas que se mostrou disponível para cooperar com este estudo foi a Quinta do Noval, localizada na freguesia de Vale de Mendiz, concelho de Alijó. A Quinta do Noval aparece nos primeiros registos em 1751, e ao longo dos séculos tem sido pioneira na forma como cultiva a vinha e arma os terrenos. Após o surto da filoxera, a propriedade foi reestruturada e os socalcos estreitos transformaram-se em socalcos largos, típicos da época, que ainda hoje fazem parte da paisagem distinta da quinta. Em 1993 a Quinta do Noval foi adquirida pela AXA Millésimes, que no ano seguinte iniciou a replantação de 100 hectares de vinha, com o cuidado de conjugar as castas nobres do Douro (Touriga Nacional, Touriga Franca, Tinta Roriz, Tinto Cão e Sousão) com a altitude, exposição solar e tipo de plantação das diferentes parcelas de terreno. Além disso foi também a quinta pioneira na mecanização dos socalcos tradicionais, preservando os muros de pedra centenários.

Aquando da visita realizada à Quinta do Noval, e em conversa com o Engenheiro Agrónomo e de Viticultura José Eduardo Costa, constatou-se que o derrubamento dos muros de xisto é a principal fonte de despesa na manutenção desta vinha, não só pela sua reconstrução, mas também porque implicam a restauração de maior área de plantio, isto é, a destruição de plantas e perda de colheita aliada à plantação de novas videiras. No entanto, foram também por si relatados fenómenos de escorregamento de taludes, muito associados a fenómenos de precipitação mais longos e intensos, ainda que pequenos e localizados. Deve ser aqui mencionado que a quinta visitada tem uma gestão eficiente da vinha, e a implementação realizada de sistemas de drenagem superficial justifica a última afirmação. No entanto, nem todas as quintas dedicam tanta atenção a este facto, com especial atenção para as de menor dimensão, em que o investimento realizado é indicador do tipo de retorno esperado. Nestes últimos casos, os escorregamentos poderão ser em grande escala, e devastadores.

Este trabalho debruça-se sobre a estabilidade das encostas da RDD, com uma geometria muito especial esculpida pelo Homem, e que possuem características geológicas e geotécnicas únicas, além de estarem localizadas numa região com um microclima também ele singular. Assim, o problema de derrubamento dos muros será colocado de parte. Contudo, deve ficar presente a sua importância, e ter em conta que são aplicáveis os conceitos teóricos apresentados nos capítulos seguintes, e que futuramente seria um fenómeno passível de ser estudado.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal criar um elo de ligação entre a engenharia agrónoma, bioengenharia, e engenharia geotécnica, no que diz respeito à estabilização de encostas e taludes, concentrando-se especialmente na RDD. Para isso foi necessário perceber vários fatores, entre os

quais, as necessidades e preocupações das entidades gestoras na manutenção da vinha, o tipo de solo que se está a estudar, as inclinações dos taludes, e a armação do terreno.

Adicionalmente pretende-se que este trabalho forneça algumas indicações sobre como otimizar a vinha, cumprindo as leis vigentes, para que haja um equilíbrio entre o risco de fenómenos de instabilidade (incidindo este estudo sobre o deslizamento de taludes), e a rentabilidade potencial da vinha, isto é, aproveitamento do espaço disponível, na forma de plantas por hectare.

Por último, este estudo tem também como objetivo indicar medidas preventivas na estabilização de encostas e de taludes.

1.3. CASO DE ESTUDO E AS SUAS PARTICULARIDADES

Como base de trabalho, e embora todas as quintas sejam únicas, foram utilizados os elementos existentes (topografia e ensaios geológico-geotécnicos) de uma encosta pertencente à Quinta de Melres, inserida na RDD. Para isso, recorreu-se ao projeto de execução de um muro de estabilização dessa mesma encosta, executado pelo GEG, [4], e uma dissertação de mestrado integrado realizada em 2011, que se debruçou sobre a influência do teor em água na estabilidade de taludes argilosos, [5].

O estudo realizado anteriormente no âmbito da tese de mestrado integrado é útil, pois está provado que os eventos de precipitação têm influência sobre a estabilidade de taludes, isto porque, sendo a camada superficial do solo típico da região estudada, um solo arenoargiloso, em que a componente de finos (siltes e argilas) poderá ultrapassar os 50%, a sucção representa uma parcela na resistência, através de uma coesão “aparente”, que não poderá ser ignorada. Durante eventos de precipitação e à medida que essa camada de solo fica saturada, a sucção diminui, o que leva a uma perda de resistência e ao consequente deslizamento de terras. No entanto, esse estudo não foi claro nos resultados finais apresentados. Serão mencionados de seguida algumas razões justificativas dessas conclusões. O coeficiente de permeabilidade do maciço obtido no ensaio de permeabilidade foi de uma ordem de grandeza desadequada quando contraposto com a informação obtida em ensaios de granulometria. A curva de sucção obtida em ensaios de papel de filtro foi ajustada a apenas dois pontos, pelo que é suscetível de não ser representativa. Além disso, as precipitações usadas não foram as locais, recorrendo-se à informação do posto udométrico de Vila Real. Assim, numa primeira fase foram ajustados certos parâmetros do solo, apelando a alguma sensibilidade e bom senso, usando diferentes coeficientes de permeabilidade, modelos e curvas características do solo distintos, para tornar o modelo representativo de uma situação mais realista. Contudo, isto será explorado com maior detalhe nos capítulos 6 e 7 do presente trabalho.

A paisagem da RDD é resultante da ação do Homem que se prolongou ao longo de gerações. Os agricultores tiveram que trabalhar o solo das encostas para conseguir cultivá-las, e isto apresentou-se como um desafio, uma vez que no seu estado natural estas eram pedregosas e inóspitas. Assim, tiveram que desfazer fragas e construir muros para reter as terras, aproveitando a pedra excedente na sua construção.

A qualidade paisagística da RDD é fruto do equilíbrio entre a configuração acidentada e o sistema construtivo e produtivo da paisagem. Contudo, nem sempre essa paisagem é vista como algo a manter. O território é visto como fonte de rendimento e por vezes são descurados aspetos de conservação em prole da receita. Ainda assim, tem-se vindo a notar que existem alguns setores da viticultura mais sensibilizados para o património e para as questões de preservação do mesmo, sem descuidar também o aspeto financeiro, pelo que é importante conseguir uma harmonia entre estes dois fatores.

Em termos gerais a RDD é temperada no inverno e quente durante o verão. Quanto à pluviosidade, esta varia consoante a altitude da região. À medida que se sobe o Vale do Douro, as temperaturas médias vão sendo progressivamente superiores, enquanto a precipitação diminui, [9].

A inclinação das encostas também é variável em toda a região. Deve ser mencionado que quanto maior o declive das encostas maior o ângulo de incidência da radiação solar, pelo que as plantas receberão mais luz e mais calor, favorecendo a maturação das uvas. No entanto, os declives são desfavoráveis em situações de precipitação intensa, ocorrendo deslizamentos dos taludes nas encostas, já de si pouco protegidas, com vegetação esparsa.

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, [9]

Geologicamente, a RDD assenta no complexo xisto-grauváquico composto pré-ordovício, formado essencialmente por xistos e grauvaques, com clivagem vertical ou oblíqua, permitindo a penetração das raízes da videira até profundidades significativas para a absorção de água durante o verão. Contudo, também é possível encontrar formações geológicas graníticas (perto de Alijó, junto ao Pocinho, do Planalto de Carrazeda de Ansiães até à foz do Sabor), Fig. 2.2. Estas últimas originam solos com uma capacidade inferior de retenção de água e sais minerais, solos mais ácidos e pobres, o que resulta em solos menos apetecíveis para a produção de vinho. A zona tipo em estudo situa-se no complexo xisto-grauváquico, composto por solos de materiais grosseiros, com elevada pedregosidade na superfície, o que permite uma boa penetração radicular, aumenta a permeabilidade do solo (diretamente pela dimensão dos materiais grosseiros e indiretamente pela penetração das raízes), contraria a erosão e condiciona o microclima junto aos pés das videiras, tanto pela reflexão da radiação solar, como pela acumulação de calor durante o dia e sua libertação progressiva durante a noite. Assim, considera-se este tipo de solo uma condição fundamental para a produção dos excelentes vinhos que se produzem no Douro.

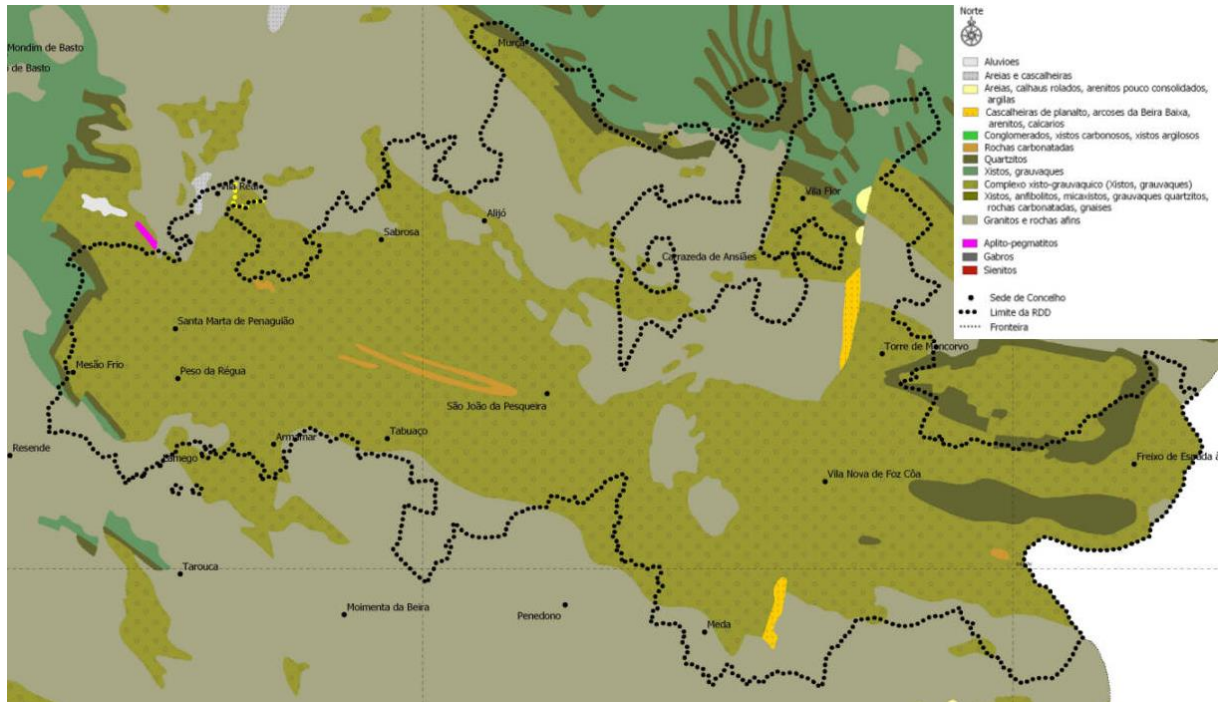


Fig. 2.2. – Litologia da Região Demarcada do Douro, [8]

Os solos desta região são tipicamente pouco profundos, com a rocha muito próxima da superfície, o que potencia deslizamentos e é limitativo no que diz respeito à implementação da vinha. Por esta razão, o Homem teve a necessidade de aprofundar a camada de solo através do saibramento, designando-se essa camada de solo por Antrossolo, isto é, solo feito pelo Homem, Fig. 2.3. Além dos Antrossolos, existem na região outros como os Leptossolos (maior parcela), com menos de 30 centímetros de espessura e assentes no *bedrock* de xisto; Cambissolos, com espessuras maiores do que 30 centímetros e derivados do xisto ou granito; Luvisolos, caracterizados pela presença de um horizonte B argiloso e formados a partir de depósitos aluvionares recentes.



Fig. 2.3. – Perfil de um Antrossolo assente em *bedrock* de xisto, [10]

As texturas deste tipo de solos poderão variar entre solos franco-arenoso fino e o franco-siltoso a siltosos, contendo uma grande percentagem de rocha partida, para garantir alguma permeabilidade e proteger contra a erosão. Solos que contenham muito silte e areia fina poderão causar problemas no crescimento das plantas devido à falta de arejamento do solo, típico deste tipo de texturas.

2.3. A VINHA

Os métodos de construção dos patamares e os utensílios a ela associados sofreram alterações ao longo dos séculos XIX e XX, devido às doenças da vinha, falta de mão-de-obra e à evolução tecnológica que veio facilitar a construção e manutenção da vinha. Estes e outros aspetos serão a seguir mencionados.

2.3.1. TIPOS DE VINHA E A SUA EVOLUÇÃO HISTÓRICA, [6], [7]

O primeiro conceito de região demarcada surgiu a 10 de setembro de 1756, aquando da formação da Companhia Geral da Agricultura das Vinhas do Alto Douro. A Companhia foi criada sob a guarda do governo de Marquês de Pombal, depois de um período em que as exportações de vinho diminuíram significativamente, enquanto a quantidade de vinho produzida continuou a crescer. Isto levou a uma queda acentuada nos preços do vinho, e a uma crise muito séria no setor vinícola do Douro. Consequentemente, os produtores de vinho durienses pressionaram o governo português vigente da época para que este dispusesse uma solução para a crise no setor, e foi assim criada a Companhia, que intentava engrandecer a reputação dos vinhos e da cultura da vinha, estabelecer preços justos para os vinhos e agricultores, e regular o mercado de forma a impedir preços muito altos que impossibilitassem as vendas ou preços demasiado baixos que levariam à extinção do cultivo da vinha.

Assim, a Companhia redigiu na escritura que para defender a reputação dos vinhos para exportação produzidos nas encostas do Alto Douro, deveria ser desenhado um mapa das encostas e taludes a norte e a sul do rio Douro, demarcando claramente toda a região. Adicionalmente foi criado um registo de classificação das vinhas e dos respetivos vinhos, tendo em conta a complexidade do solo na região, e foram introduzidos meios de certificação e controlo de produto.

A armação do terreno das vinhas marca a divisão distinta entre o período pré-filoxera e pós-filoxera. A filoxera é o nome do inseto que causa a doença da vinha com o mesmo nome. Este inseto provoca um intumescimento dos tecidos radiculares (o tipo de infeção mais grave), que ficam depois suscetíveis de serem atacados por fungos, conduzindo à morte de zonas da raiz. As plantas deixam de conseguir absorver água e nutrientes, o que poderá provocar a morte.

2.3.1.1. Vinha Pré-filoxera

Antes da pandemia, as videiras eram plantadas em valeiras que seguiam a configuração do terreno nas encostas e tinham uma largura compreendida entre 1,50 a 1,80 metros na base. Cada valeira era suportada por um muro de xisto de pedra sobreposta, inclinado para dentro, formando um terraço com uma largura compreendida entre 1,10 e 1,30 metros no topo. A densidade de plantas era baixa (3000 a 3500 plantas/hectare), uma vez que cada valeira seria plantada com apenas uma ou duas fiadas de bardos. Os muros eram baixos e pouco elaborados, o que conferia uma grande solidez ao socalco, e não existindo problemas de escoamento de águas a montante, este tipo de muros dificilmente cairia. As pedras usadas conferiam uma grande resistência mecânica e devido à sua dimensão diminuta, o impulso de terras sobre o muro era pequeno e não colocaria o muro em risco de colapsar. Por terem

larguras pequenas, as linhas de escoamentos não implicavam grande acumulação de água, e consequentemente, situações de erosão.

2.3.1.2. Vinha Pós-filoxera

Na segunda metade do século XIX muitas vinhas foram destruídas pela pandemia filoxérica, que transformou a grande maioria das vinhas na RDD em mortórios, isto é, terraços desolados e abandonados. Esta pandemia ia sendo combatida com a aplicação de sulfureto de carbono e plantando uma estirpe americana de porta-enxertos, mais resistente às pragas, mas estas técnicas nem sempre eram bem-sucedidas. Isto conduziu a uma nova forma de armar o terreno. O solo foi escavado até maiores profundidades (o que beneficiava as plantas, pois as raízes conseguem penetrar em profundidade em busca da água e nutrientes que escasseiam nestes solos secos), e os socalcos foram alargados e suportados com muros verticais mais altos. Estes socalcos acompanhavam a inclinação da encosta e neles eram plantadas várias fiadas de bardos (4, 5 ou mais), aumentando desta forma a densidade de plantação (cerca de 6000 plantas/hectare), [11]. Além disso, esta nova forma de armar o terreno também facilitava a utilização de meios agrícolas mais expeditos, com recurso à tração animal. No entanto, a movimentação de terras e a elevada altura dos muros, associada à sua construção, tornava este método muito dispendioso. Ao longo do tempo estes muros têm apresentado problemas estruturais, pois com a degradação da pedra, o muro deixa de permitir uma drenagem fácil da água, o que leva a uma degradação contínua da estrutura e erosão do solo, terminando em colapsos. Assim, a longo prazo, esta forma de armar o terreno demonstrou ser menos sustentável.



Fig. 2.4. – Vinha pré-filoxera (à esquerda) e vinha pós-filoxera (à direita), [12]

2.3.1.3. Vinha em Patamares de Dois Bardos

Na década de 70 do século XX começou a procura de soluções mais eficientes de manter a vinha, introduzindo meios mecânicos e diminuindo a mão-de-obra, cada vez mais cara. Por esta razão, houve necessidade de mudar a forma como se armava o terreno, para produzir patamares com 3,6 a 4,0 metros de largura que seguem a configuração do terreno na encosta, e em que os bardos estão distanciados entre si cerca de 2,2 metros. A distância de cada bardo ao bordo externo ou interno do patamar pode variar entre 0,8 a 1 metro e 0,6 a 0,8 metros, respetivamente, [10]. Foi possível realizar um saibramento até profundidades nunca então atingidas, com recurso a maquinaria pesada. Os muros de xisto deixaram de ser necessários, pois o ângulo dos taludes assim o permite. São plantadas duas fiadas de bardos em cada terraço, com uma distância suficiente para permitir que um trator realize as várias tarefas durante o ciclo de crescimento das plantas. A densidade de plantação é reduzida (3000 a 3500 plantas/hectare), e a drenagem de águas é deficiente, pois os patamares são longos e quase horizontais, formando-se com facilidade fenómenos de acumulação de água e consequente instabilidade. Além disso, só é viável fazer um controlo dos infestantes e da vegetação no talude através de meios químicos, o que incita uma desertificação do solo a nível de ervas, e a erosão num talude sem vegetação é bem maior do que num talude com proteção vegetal. Ter dois bardos num patamar tão largo conduz a que estes apresentem comportamentos distintos. O bardo interior impede o acesso ao talude, dificultando as operações; enquanto o bardo exterior está exposto às variações térmicas e às condições hídricas, pelo que a vinha demonstra um maior crescimento vegetativo. Adicionalmente, estando os taludes expostos à radiação solar, isto poderá provocar um aquecimento acentuado do solo, aumentando a taxa de evaporação da água existente no solo, ainda que isto possa ser mitigado através da instalação de um sistema de irrigação. Tudo isto conduz a que o tempo de vida da vinha em patamar seja inferior relativamente à vinha em muros.



Fig. 2.5. – Vinha em patamares de dois bardos, [13]

2.3.1.4. Vinha em Patamares de Um Bardo

Todas estas desvantagens fizeram concluir ao longo do tempo que a armação de terreno em patamares de dois bardos não é sustentável e por isso mesmo tem vindo a ser alterada ao longo das últimas décadas. Uma das alterações é que cada terraço é plantado com apenas uma fileira de bardos a 50 centímetros da borda do talude, perfazendo um patamar mais estreito com uma largura com cerca de 2,3 metros. Além disso os terraços passaram a ser inclinados para dentro com um declive de 3%, permitindo que a água se infiltre ou quando em excesso, percorra o caminho mais curto até uma valeta. Por ser mais estreito, o talude é também mais baixo, o que o torna mais acessível para fazer um controlo de infestantes, e simplifica a instalação de um enrelvamento no talude para controlar a erosão.



Fig. 2.6. – Vinha em patamares de um bardo, [14]

2.3.1.5. Vinha ao Alto

A partir da década de 80 foi implementada uma nova forma de armar o terreno. Na vinha ao alto, as fileiras de vinha são plantadas perpendicularmente às linhas de nível, isto é, no sentido de maior declive da encosta. Isto tem várias vantagens, como a erosão do talude ser menor ao longo da linha de maior declive do talude. Apesar de mostrar ser um método mais vantajoso do que a vinha em patamares, está limitado pela inclinação da encosta, pois em inclinações acima de 25% o trabalho a realizar na vinha por parte de pessoas e máquinas, passa a ser desconfortável e árduo. Assim, a vinha ao alto é normalmente sistematizada em encostas com uma inclinação inferior a 19-22°.

A configuração da vinha ao alto apresenta várias vantagens em relação aos patamares. Ao plantar as vinhas em fiadas retilíneas está-se a facilitar significativamente o trabalho a realizar durante o ciclo de crescimento. Existe menos erosão do solo e a água escoar lentamente pela vinha, através do seu sistema de drenagem próprio. Diminui-se a necessidade de usar herbicidas para controlar ervas daninhas e deixam de existir patamares de terra passíveis de escorregar. Adicionalmente, este sistema permite uma densidade de plantação elevada (entre 4500 a 5000 plantas/ hectare).



Fig. 2.7. – Vinha ao alto, [15]

2.3.1.6. Vinha em Micropatamares

Mais recentemente e com o intuito de preservar a paisagem e os muros pré e pós-filoxéricos foram implementadas novas soluções de armação do terreno. Isto consistiu na realização de pequenos patamares horizontais de um bardo entre os muros existentes e até 1 metro de largura, o que permite a mecanização da vinha com equipamentos especiais e mais pequenos, Fig. 2.8. A densidade de plantação desta forma de armação é da ordem das 6000 a 7000 plantas/hectare.



Fig. 2.8. – Vinha em micropatamares, [16]

2.3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As boas práticas agrícolas para a instalação da vinha em encosta dizem que deve ser tida em conta a estabilidade da encosta aquando das movimentações de terra na construção dos patamares, para reduzir o risco de deslizamento de taludes, e simultaneamente criar condições de segurança para a manutenção da vinha durante o seu ciclo de crescimento. Além disso, é indispensável um controlo rigoroso da erosão, através de medidas específicas para cada forma de armação do terreno, [10].

Assim, a sustentabilidade económica da vinha duriense depende da manutenção das vinhas e melhoramento da qualidade dos seus vinhos, para que seja possível vendê-los a preços acrescidos de forma a conseguir comportar os custos. Isto implica que as vinhas sejam equilibradas e estejam preparadas para condições climáticas muito variáveis, [7]. Para isso, é necessário ter em atenção vários aspetos fundamentais para conseguir suportar as condições climáticas mais adversas, como o calor tórrido ou precipitações intensas. A geotecnia e a bioengenharia poderão ajudar na mitigação dos fenómenos de erosão em taludes e encostas, protegendo-os para preservar a humidade e simultaneamente fomentar a estabilidade, diminuir a erosão e as temperaturas elevadas no solo. Estes parâmetros são tidos em conta na legislação e nas boas práticas agrícolas vigentes na atualidade, ainda que estas sejam aplicadas recorrendo ao senso comum e à experiência, sem ter por trás estudos geotécnicos. Este trabalho espera conseguir responder a algumas destas questões nos capítulos subsequentes, tendo em conta as imposições legislativas sobre a armação do terreno e as inclinações de encosta máximas permitidas e tentando chegar a uma razão otimizada de fator de segurança e produção potencial da vinha.

2.4. EVOLUÇÃO LEGISLATIVA

2.4.1. LEGISLAÇÃO POMBALINA 1755-1776: O INÍCIO DA MODERNIZAÇÃO DA VINHA, [8]

Já foi mencionado que durante a governação do Marquês de Pombal existiu a necessidade de criar a Companhia Geral da Agricultura das Vinhas do Alto Douro e os seus estatutos. A Companhia instituiu os preços dos vinhos e a demarcação da região, além de realizar empréstimos aos agricultores com juros de 3% ao ano, para a produção do vinho e manutenção das vinhas.

Em 1757 a Companhia ordenou a proibição da utilização de estrumes na vinha, da baga do sabugueiro e a mistura de uvas brancas com uvas tintas na preparação do vinho. Estas medidas implicaram um claro decréscimo na produção, contudo foram implementadas para melhorar a qualidade dos vinhos produzidos. A produção das aguardentes também não foi deixada ao acaso, e foi regulada a sua produção e qualidade.

Adicionalmente, a Companhia impôs sanções aos agricultores que violassem as imposições feitas por ela, além de realizar uma devassa anual, afixando os nomes dos transgressores, reforçando a doutrina de um aumento de qualidade sustentável.

A título de curiosidade, no alvará de 24 de novembro de 1764 o Rei concede privilégios de nobreza àqueles que tinham em sua posse um número igual ou superior a dez ações da Companhia. Isto demonstra a importância que as vinhas do Douro tinham, já na época, para o país.

Entretanto em 1769 foram implementadas outras medidas importantes para controlar a qualidade e travar atividades clandestinas que estariam a resultar em malefícios para a economia regional, como a imposição do dia 20 de novembro como o dia a partir do qual seria permitido vender o vinho, e apenas só depois de serem provados, para demonstrar a sua qualidade. Em 1773 são executadas leis que impõem um licenciamento de cultivo da vinha.

É notável que num período de 20 anos tanto tenha sido feito para engrandecer a qualidade do vinho duriense, ainda que tais medidas tenham sido muito contestadas, e mais tarde terem sido revogadas competências à Companhia durante o reinado de D. Maria I. Ainda assim, foi durante esta época que se começou a dar importância às vinhas do Douro, como fonte de rendimento e bandeira ostentadora do país enquanto produtor de vinho, e mais recentemente ponto de visita reconhecido internacionalmente.

2.4.2. PERÍODO CONTEMPORÂNEO, [10]

Nas últimas três décadas a legislação tem vindo a incidir sobre a vertente ambiental e paisagística do Douro, especialmente após a região ter sido considerada Património Mundial da Humanidade pela UNESCO, em dezembro de 2001. Desde a criação da REN (Reserva Ecológica Nacional) em 1983, passando pela regulamentação da proteção das águas subterrâneas contra poluição, definição de densidades mínimas a respeitar na instalação de novas vinhas e por fim em 2003, a ratificação do PIOTADV (Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território do Alto Douro Vinhateiro), que as entidades legislativas têm vindo a proteger o Douro, da erosão, alertando para os impactos paisagísticos negativos, da destruição de património histórico e cultural, recomendando o uso sustentável dos recursos e orientando para a manutenção e restauração das vinhas.

A instalação da vinha exige uma licença para a sua plantação e requer também que seja respeitada a legislação e regras condicionantes vigentes. Adicionalmente é necessário executar um plano técnico e financeiro onde esteja estipulado o programa detalhado das operações, os custos e o retorno esperado do investimento. Este plano deverá ser validado pelos Serviços Oficiais competentes com o parecer da DRAPN (Direção Regional de Agricultura e Pescas) e da CCDRN (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte) e deverá ter em conta, entre outros, a estabilidade e segurança da encosta, a projeção de sistemas de drenagem e de defesa contra a erosão, a definição da forma de armação do terreno de encosta, e caso a instalação da nova vinha implique a execução de um sistema de rega, deverá ser realizado o projeto respetivo e proceder ao seu licenciamento.

2.4.2.1. Sobre o Local de Instalação da Vinha

Segundo o Decreto-lei nº254/98 de 11 de agosto e Portaria nº 413/2001 de 18 de abril, e seguindo as orientações OILB (Organização Internacional de Luta Biológica, 1999), as vinhas destinadas à produção de vinhos e produtos víquicos da RDD deverão estar ou ser instaladas em solos predominantemente de origem xistosa, preferencialmente em locais abrigados e de boa exposição e que, sempre que possível as linhas sejam orientadas segundo a direção NE/SW para facultar um melhor aproveitamento da luz e reduzir os riscos de escaldão dos cachos nas horas de maior calor.

2.4.2.2. Sobre as Formas de Armar o Terreno

A Resolução do Conselho de Ministros nº 150/2003 de 22 de setembro e o Despacho Conjunto 473/2004 de 30 de junho definem no PIOTADV as formas atuais de armar o terreno de encosta na instalação de vinha mecanizável. Das mencionadas anteriormente são consideradas a vinha em patamares largos horizontais com talude em terra e largura superior a 2,5 metros, onde são plantados dois ou mais bardos (Fig. 2.5.); vinha em patamares estreitos horizontais com talude natural em terra e largura inferior a 2,5 metros, onde é plantado apenas um bardo na zona exterior da plataforma (Fig.

2.6.); vinha em micropatamares constituídos por pequenas plataformas horizontais (Fig. 2.8.); e a vinha ao alto em que os bardos são plantados segundo as linhas de maior declive da encosta (Fig. 2.7.).

Aquando da escolha da armação do terreno a usar, devem ser considerados vários aspetos, como por exemplo, a maior rentabilidade e eficácia da mecanização e racionalização da manutenção da vinha durante o ciclo de crescimento; a conservação da disponibilidade hídrica e da fertilidade do solo, integração da vinha na paisagem obedecendo as normas do PIOTADV; a não destruição ou obstrução das linhas de drenagem natural; a redução do risco de erosão, pela manutenção da vegetação natural nas zonas de cume das colinas e encostas, e/ou instalação de redes de drenagem superficial (com sistemas de meias manilhas que conduzem a água até uma linha de água) ou subterrânea em função dos vários tipos de armação do terreno.

Uma má execução da armação do terreno poderá levar a uma redução da espessura do solo, o que potencia o deslizamento de terras; também poderá originar situações de escorregamentos de taludes devido ao controlo deficiente do escoamento de água superficial, ou deslizamentos graves por aterro de linhas de água e de nascentes ativas ou ocultas, e ravinamentos por má infiltração da água no solo aquando da desmatagem da zona de cumeeira das colinas, fragilizando as encostas a jusante.

2.4.2.3. Sobre a Densidade de Plantação

O Decreto-lei nº 254/98, Artigo 6º impõe um valor mínimo de 4000 plantas/ hectare (medido segundo a projeção horizontal) na RDD. No entanto há exceções para vinhas em patamares, em que o valor mínimo passa a ser 3000 plantas/hectare. Além disso, em vinhas em patamares (largos ou estreitos) cujos declives são muito acentuados, é permitida uma tolerância de 20% sobre o valor mínimo, isto é, 2400 plantas/ hectare.

No Quadro 2.1. e Quadro 2.2. são apresentados para diferentes declives de encostas, as larguras e comprimentos dos taludes dos patamares largos com 2 bardos e estreitos de 1 bardo, respetivamente, que são tipicamente seguidos aquando da armação do terreno. Neles é possível constatar que para as inclinações de encosta apresentadas não é possível ter a densidade mínima exigida na lei (3000 plantas/hectare em patamares), pelo que terá que se diminuir o compasso para valores entre os 0,8 e 0,85 metros.

Quadro 2.1. – Cálculo do número de videiras por hectare em função dos parâmetros apresentados para patamares de 2 bardos, (ADVID, 2004)

Plataforma de 3,5 m com 2 bardos; compasso 2,0 x 1,1 m; declive do talude 150%			
Declive da encosta (%)	Largura do talude (m)	Altura do talude (m)	Plantas/ hectare
20	0,54	0,81	3962
25	0,75	1,05	3810
30	0,88	1,31	3657
35	1,07	1,60	3505
40	1,27	1,91	3352
45	1,50	2,25	3200
50	1,75	2,63	3048
55	2,03	3,04	2895
60	2,33	3,50	2743

Quadro 2.2. – Cálculo do número de videiras por hectare em função dos parâmetros apresentados para patamares de 1 bardo, (ADVID, 2004)

Plataforma de 2,3 m com 1 bardo; distância entre cepas 1,1 m; declive do talude 175%			
Declive da encosta (%)	Largura do talude (m)	Altura do talude (m)	Plantas/ hectare
20	0,3	0,52	3081
25	0,38	0,67	2981
30	0,48	0,83	2882
35	0,58	1,01	2783
40	0,68	1,19	2683
45	0,80	1,39	2584
50	0,92	1,61	2484
55	1,05	1,84	2385
60	1,20	2,10	2286

Os valores do Quadro 2.1. e Quadro 2.2. serão comentados mais adiante para relacionar a inclinação do talude, a estabilidade e a densidade de plantação.

2.4.2.4. Sobre a Manutenção do Solo

As normas da PRODI (Produção Integrada) proíbem o uso de herbicidas, exceto no controlo de infestantes na linha, em situações pontuais para combater espécies resistentes, e em vinhas velhas não-alinhadas. É aconselhável que durante o período de inverno não sejam feitas mobilizações até fins de abril ou maio, com o intuito de proteger o solo e facilitar a circulação de máquinas durante a primavera. Alternativamente pode recorrer-se à manutenção de um coberto vegetal, semeado ou espontâneo, temporário ou permanente, ou manter o solo coberto com palhas. Na RDD os enrelvamentos permanentes apresentam várias vantagens além da proteção do solo contra a erosão, pois melhoram a estrutura e fertilidade do solo e reduzem a evapotranspiração durante o verão, Fig. 2.9.



Fig. 2.9. – Enrelvamento da entrelinha entre patamares na Quinta da Romaneira, [10]

2.4.2.5. Sobre os Declives do Terreno

O Despacho Conjunto 473/2004 de 30 de junho e a Resolução do Conselho de Ministros nº150/2003 de 22 de setembro definiram os seguintes requisitos relativamente à plantação ou replantação de vinha:

- São proibidas plantações de vinha em encostas com declive superior a 50%, exceto se nas respetivas parcelas já estiverem instaladas vinha, olival ou amendoal a reconverter, ou as parcelas corresponderem a mortórios, em que a vinha deve ser construída em micropatamares;
- A vinha ao alto só pode ser realizada em encostas com declives inferiores a 40% e no Baixo Corgo o valor máximo é 30% (valores a partir dos quais a mecanização deixa de ser possível);
- Em encostas com declives entre os 40 e 50%, as novas vinhas poderão ser realizadas em patamares estreitos de um bardo (2,5 a 2,8 metros de largura) ou em micropatamares (1,5 a 1,6 metros de largura);
- Se as parcelas para a instalação de vinha tiverem uma área superior a 5 hectares e declive de encosta superior a 20%, é obrigatório apresentar um estudo de drenagem adaptado ao tipo de armação do terreno.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A informação reunida neste capítulo é a base do objetivo deste trabalho. Para fazer o estudo de estabilidade deste tipo de encostas, e conseguir simultaneamente relacioná-la com a inclinação das encostas e o número de plantas passíveis de serem plantadas nas condições de declive consideradas, é imperativo conhecer a legislação vigente no país e em particular na RDD, saber os métodos de armação do terreno atualmente usados, e as condicionantes, impostas por lei ou aconselháveis segundo as boas práticas de cultivo.

Nota-se também que ao longo do tempo tem sido usada a vegetação como tentativa de estabilizar os taludes, e minorar escorregamentos. Mais adiante serão mencionadas outras medidas de estabilização de taludes e de reconstrução de muros.

Este estudo irá incidir sobre a análise de estabilidade de encostas com diferentes inclinações, diferenciando quando possível as várias armações de terreno que ainda são usadas na atualidade. Simultaneamente serão comparadas as densidades de plantação (plantas/ hectare) para as diferentes soluções. Serão estudadas no capítulo 7 as armações de vinha ao alto, em patamares largos de dois bardos e patamares estreitos de um bardo.

3

SOLOS NÃO SATURADOS

3.1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a mecânica dos solos e o seu desenvolvimento concentrou-se em particular em solos saturados ou secos. No entanto, cada vez mais se tem estudado em pormenor outros tipos de solos e problemas, que não são consistentes com os princípios e conceitos da mecânica de solos clássica. Na natureza, a maioria dos solos são não saturados. Até há pouco tempo, os solos não saturados eram completamente desconsiderados do estudo de engenharia, em projetos ou investigação, pela sua complexidade, morosidade e custos avultados. Contudo, e à medida que se vai percebendo melhor os fenómenos que este tipo de solos envolve, têm vindo a ser estudados aspetos experimentais para uma melhor interpretação deste tipo de materiais.

Adicionalmente, a determinação de parâmetros geotécnicos relativos a solos não saturados, exige por si só ensaios mais complexos e mais demorados do que em solos saturados. Por esta razão, ainda se colocam entraves em projeto na consideração de solos não saturados.

Deve ser mencionado que processos de escavação, compactação e remodelação de solos são condicionados por solos não saturados. Do mesmo modo, argilas altamente plásticas poderão, mediante alterações de carga, expandir ou consolidar, em valores inoportáveis. Solos soltos tipicamente arenosos ou siltosos também poderão colapsar se submetidos a humidificação e/ou carregamentos. Em ambos os casos, as pressões de água nos poros são inicialmente negativas, e as alterações de volume são produto de aumentos nessa mesma pressão.

3.2. O CLIMA

O clima representa um papel preponderante no estado de saturação de um solo. Por um lado, existem processos que induzem um fluxo de água ascendente para fora do solo, como a evaporação, onde a água é retirada do solo a partir da superfície, ou a evapotranspiração, onde esta é removida a partir da cobertura vegetal. Por outro lado, a infiltração proveniente de um evento de precipitação induz fluxos de água descendentes. A diferença entre ambos dita, numa escala localizada, as condições de pressão de água no solo.

As alterações climáticas influenciam muito o teor em água de um solo na proximidade da superfície. As alterações nas pressões negativas na água dos poros devido a eventos de precipitação intensos têm sido a causa de vários escorregamentos de taludes. Além disso, a redução da resistência e do módulo de deformabilidade dos solos também estão relacionados com o aumento das pressões da água nos

poros. Tudo isto leva a concluir que as pressões negativas da água nos poros representam um papel importante no controlo mecânico dos solos não saturados, [17].

Durante o ano, os solos da RDD apresentam mudanças no seu teor em água, consoante o clima. As pressões negativas na água dos poros dos seus solos são maiores em períodos de seca, e em períodos de grande pluviosidade podem ser nulas. Isto infere que a resistência dos solos na RDD depende incomensuravelmente do clima nesta região, pelo que é importante estudar o comportamento hidrológico do solo, na tentativa de mitigar fenómenos de escorregamento.

3.3. FASES DE UM SOLO NÃO SATURADO

Segundo Fredlund e Rahardjo, [17], um solo não saturado é composto por quatro fases. Elas são fase sólida (esqueleto sólido do solo), líquida (normalmente água), gasosa (ar), e uma quarta denominada “membrana contráctil”, referente à interface do ar com a água.

A principal propriedade da membrana contráctil é a tensão superficial, que exerce uma tensão de tração originada pelas forças intermoleculares. Estas forças são diferentes das que atuam no interior da água, onde as moléculas experimentam forças iguais em todas as direções.

A tensão superficial faz com que a membrana contráctil se comporte como uma membrana elástica. Se uma membrana bidimensional flexível é submetida a pressões distintas em cada um dos seus lados, a membrana assume uma forma côncava em direção à face com maior pressão (menisco), exercendo uma tensão na membrana para atingir o equilíbrio, Fig. 3.1.

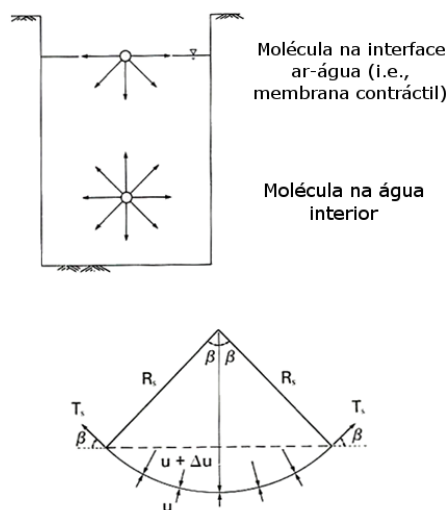


Fig. 3.1. – Tensão superficial na interface ar-água. Pressões e tensão superficial atuantes numa superfície curva bidimensional, [17]

Como se pode concluir do modelo capilar de Kelvin (expressão 3.1.), à medida que a sucção mátrica de um solo aumenta, o raio de curvatura da membrana contráctil diminui. Assim, quando a diferença de pressão entre o ar e a água nos poros desce para zero, o raio de curvatura é infinito. Conclui-se que existe uma interface lisa entre o ar e água, quando a sucção mátrica é nula.

$$(u_a - u_w) = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad (3.1.)$$

Onde:

- $(u_a - u_w)$, é a sucção mátrica, isto é, a diferença entre a pressão no ar dos poros e a pressão na água dos poros;
- T_s , é a tensão superficial;
- R_s , é a raio de curvatura.

3.4. SUCCÃO

A sucção é a coesão entre partículas de água e adesão entre partículas do solo e da água e produz pressão negativa no solo. A sucção tem duas componentes: mátrica e osmótica. A sucção mátrica é a capacidade de retenção de água devido ao arranjo estrutural do solo e das suas partículas constituintes. A sucção osmótica é a capacidade de retenção devido aos sais dissolvidos na água do solo. Deste modo, sucção, ou sucção total, é a soma destas duas componentes, como mostra a expressão 3.2.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (3.2.)$$

Onde:

- ψ , é a sucção total;
- $(u_a - u_w)$, é a sucção mátrica;
- π , é a sucção osmótica.

A sucção mátrica é geralmente associada ao fenómeno de capilaridade.

3.4.1. CAPILARIDADE

A Fig. 3.2. é um esquema do perfil de um solo, e nela está representado o efeito da capilaridade num solo.

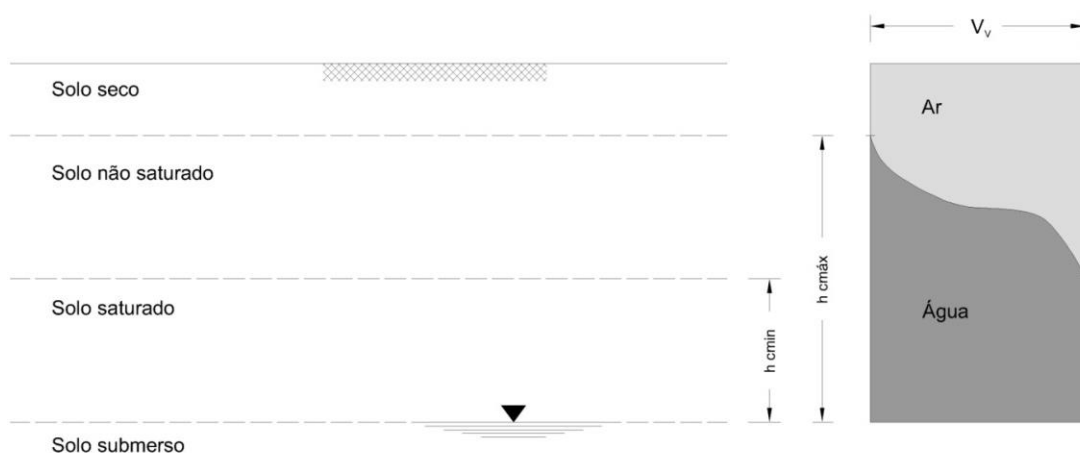


Fig. 3.2. – Esquema que exemplifica o efeito capilaridade nos maciços terrosos, [18]

Abaixo do nível freático o solo encontra-se submerso, isto é, todos os seus poros estão preenchidos por água e diz-se que o solo está saturado. Acima do nível freático o solo poderá estar seco, saturado ou não saturado.

Capilaridade é a propriedade física que os líquidos têm de ascender em espaços com diâmetros muito reduzidos. Isto acontece devido a uma combinação de fenómenos: a tensão superficial provocada pela coesão entre as moléculas de um líquido, e a adesão que o líquido tem com a superfície do tubo.

As partículas de um solo são de tamanhos muito distintos, e entre elas existem poros que poderão ser maiores ou menores, consoante o arranjo das partículas. Quanto maior o tamanho dos poros, menor a ascensão capilar, e vice-versa. Na Fig. 3.2., h_{cmin} representa a altura mínima da ascensão capilar que acontece devido aos canículos originados pelos poros de maiores dimensões. Em contraste, $h_{\text{cmáx}}$ é a altura máxima da ascensão capilar que advém dos canículos formados pelos poros de menores dimensões.

As pressões da água nestes canículos são inferiores à pressão atmosférica. Este fenómeno designa-se comumente como sucção. A sucção confere uma resistência adicional ao solo, por aumento da sua tensão efetiva, ainda que localizada.

Através de fenómenos de evaporação, o solo perde água, e esta aloja-se em tubos cada vez mais estreitos, e por sua vez, a sucção aumenta. A sucção varia entre zero, em solos completamente saturados até centenas de MPa em argilas muito ativas, secas em estufa, [18].

Isto explica o aumento de resistência no solo, especialmente naqueles com partículas mais finas, quando o seu teor em água é reduzido.

3.4.2. SUCÇÃO MÁTRICA E OSMÓTICA

As alterações nas cargas aplicadas num solo produzem alterações no seu teor em água, que tem uma relação direta com a sucção mátrica. No entanto, a sucção osmótica não é sensível a mudanças do teor em água. Por esta razão, a sucção mátrica é mais importante, pois é aquela passível de produzir alterações relevantes na sucção total.

A sucção total pode ser determinada medindo a pressão do vapor na água do solo, ou a humidade relativa no solo. A sucção mátrica pode ser medida direta ou indiretamente. A pressão negativa na água dos poros é medida através de métodos diretos, e subtraindo essa parcela à pressão de ar nos poros, que normalmente é a pressão atmosférica, tem-se a sucção mátrica.

Existem várias técnicas para medir a sucção, total, mátrica e osmótica, como o tensiómetro, bloco poroso, sensor de condutividade térmica, amostra de condutividade elétrica, psicómetro, placa de sucção, placa de pressão ou papel de filtro. Estas técnicas não serão usadas no âmbito deste trabalho, e algumas delas foram implementadas em trabalhos anteriores, [5], ainda que com algumas limitações e resultados inconclusivos. Deve ser mencionado que, em trabalhos futuros seria interessante aplicá-las de forma exaustiva no estudo da sucção nos solos das encostas do Douro, pela sua singularidade.

3.4.3. CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO

Segundo Campos [19], a relação entre o teor em água de um solo e a sucção é uma função contínua, gradual, em que a sucção varia inversamente com o grau de saturação ou o teor em água, Fig. 3.3.

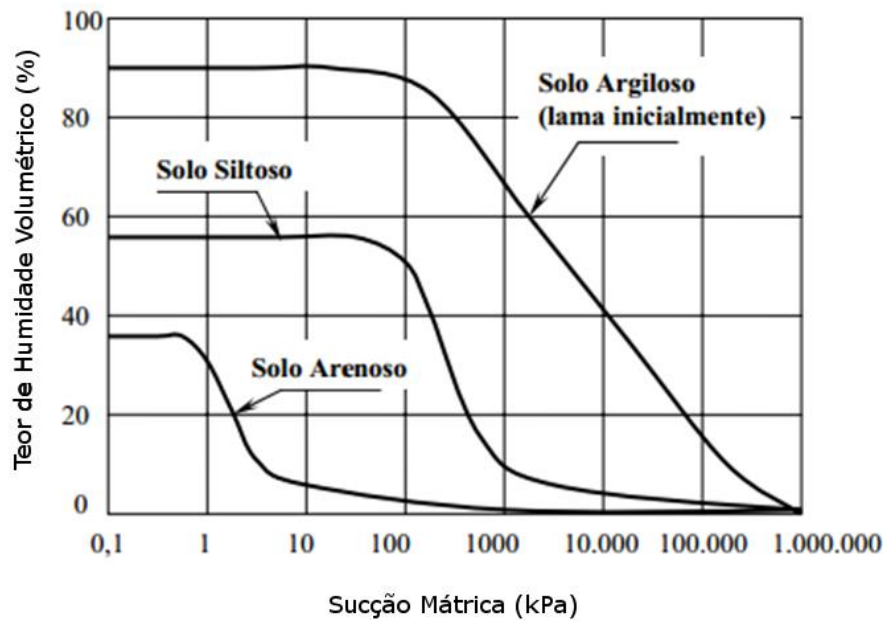


Fig. 3.3. – Curvas de sucção de solos tipo, em função da granulometria (adaptado de Fredlund e Xing, 1994), [20]

Como se pode visualizar na Fig. 3.3., a sucção tende para zero à medida que o solo tende para a saturação. Esta relação gráfica denomina-se como curva de sucção, ou curva característica do solo.

Nestas representações, a água presente no solo pode ser quantificada de três formas diferentes: teor em água volumétrico, θ_w (relação entre o volume de água e o volume total), teor em água gravimétrico, w (relação entre o peso de água e o peso de partículas sólidas) e o grau de saturação, S .

As curvas características dos solos são afetadas pelo tipo de solo, pela granulometria, composição mineralógica do solo, temperatura e pelas trajetórias de secagem e humedecimento.

Em estudos realizados ficou demonstrado que o mesmo solo apresenta sucções mais elevadas num processo de perda de teor em água do que no processo contrário, Fig. 3.4. Campos, [19], atribui este fenómeno à não uniformidade dos poros intercomunicados por pequenas passagens, ao efeito do ângulo de contacto que varia consoante a posição do menisco, ao ar aprisionado nos poros que diminui o teor em água durante o processo de humedecimento, à história de secagem e humedecimento do solo, e à libertação lenta de ar dissolvido na água.

Estas últimas afirmações devem estar presentes aquando da análise do caso de estudo na RDD, onde os fenómenos de secagem e humedecimento são uma constante ao longo do ano, e quando ocorrem fenómenos de precipitação as sucções diminuem até valores muito baixos ou mesmo nulos, e a coesão “aparente” que inculciam no solo, também desvanece, podendo levar à rotura do solo, provocando escorregamentos pela perda de resistência.

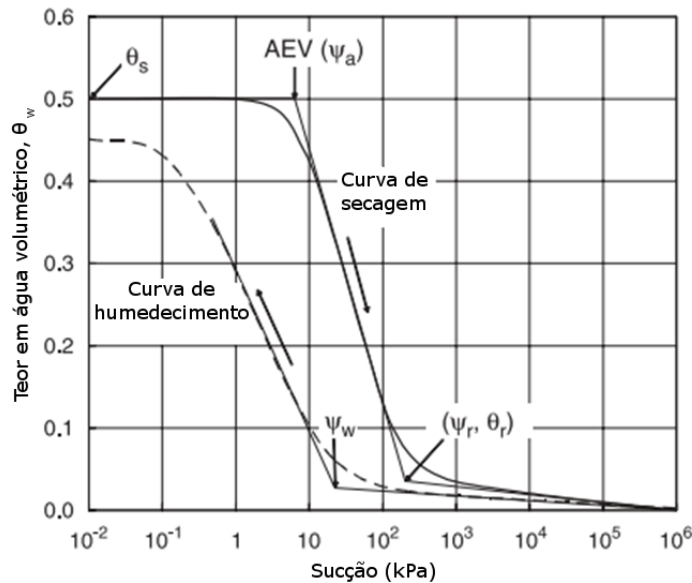


Fig. 3.4. – Curva característica do solo, com o detalhe da curva de secagem e humedecimento (adaptado de Fredlund e Xing, 1994), [21]

O valor de entrada-de-ar, AEV, *air-entry value* ou ψ_a , é definido como a sucção mátrica à qual o ar entra nos poros de maiores dimensões, durante o processo de secagem (Brooks e Corey, 1964,1966). À medida que a sucção mátrica aumenta de zero para o AEV do solo, o teor em água volumétrico do solo, θ_w , é quase constante. Depois desse ponto, o teor em água diminui de forma constante para o teor em água residual (θ_r), enquanto a sucção mátrica aumenta para além de AEV. Chama-se sucção residual (ψ_r) à sucção correspondente ao teor em água residual. ψ_w é a sucção mátrica na qual o teor em água do solo começa a aumentar significativamente, durante o processo de humedecimento, [21].

Um aumento de temperatura provoca uma diminuição na curvatura do menisco, além de também diminuir a interface solo-água, reduzindo a tensão superficial, e conseqüentemente a sucção no solo. Adicionalmente, o ar contido no solo sofre expansão, o que provoca um aumento do tamanho dos poros.

3.4.4. AJUSTE DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM SOLO, [21]

Ao longo do tempo foram desenvolvidos modelos empíricos ou equações com vista a descrever a curva característica do solo, que é, como se pode constatar, altamente não-linear. Alguns dos mais usados são o de van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994), Brooks e Corey (1964) e Gardner (1958). Na opinião de Leong e Rahardjo (1997) as equações que são os melhores modelos de ajuste a curvas características de solos são as de van Genuchten, e de Fredlund e Xing.

A equação de van Genuchten pode ser escrita na forma da expressão 3.3.

$$\theta_w = \theta_r - (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[1 + \left(\frac{\psi}{a_v} \right)^{n_v} \right]^{m_v} \quad (3.3.)$$

Onde:

- θ_w , é o teor em água volumétrico;
- θ_s , é o teor em água volumétrico saturado;
- θ_r , é o teor em água residual;
- ψ , é a sucção mátrica;
- a_v , é um parâmetro do solo relacionado com o AEV;
- n_v , é um parâmetro do solo relacionado com a taxa de extração de água do solo, assim que o AEV tenha sido excedido;
- m_v , é um parâmetro do solo relacionado com θ_r .

A equação de Fredlund e Xing pode ser escrita como na expressão 3.4.

$$\theta_w = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\left\{ \ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right) \right\}^m} \right] \quad (3.4.)$$

Onde:

- a , é um parâmetro do solo relacionado com o AEV;
- n , é um parâmetro do solo relacionado com o declive no ponto de inflexão (próximo do AEV);
- m , é um parâmetro do solo relacionado com θ_r .

3.5. PERMEABILIDADE EM SOLOS NÃO SATURADOS

Conhecer o coeficiente de permeabilidade em solos não saturados tem vindo a ser alvo de atenção crescente na análise deste tipo de materiais na área da geotecnia. Dito isto, é importante que seja realizada uma avaliação mais ou menos precisa deste parâmetro, o que não é de todo fácil. Este coeficiente pode ser determinado através de várias equações empíricas disponíveis na literatura, ou com recurso a ensaios experimentais. As primeiras têm a desvantagem de nalguns casos não fornecerem resultados satisfatórios, os segundos, apesar de serem muito demorados e caros, conseguem fornecer dados preciosos para a verificação do coeficiente de permeabilidade.

É possível relacionar o coeficiente de permeabilidade com a sucção mátrica e existem várias propostas empíricas para relacionar estes dois parâmetros, como a de Gardner (1958), Richards (1931) ou Brooks e Corey (1964). No entanto, deve ser mencionado que estes procedimentos têm em conta o coeficiente de permeabilidade saturado. Além de equações empíricas, o coeficiente de condutividade hidráulica pode ser determinado com recurso a modelos estatísticos, que têm como base o facto de, tanto a curva característica do solo como a função de permeabilidade terem sido determinadas com base na distribuição do tamanho dos poros do solo a ser considerado, [22].

3.6. TENSÕES DE CORTE EM SOLOS NÃO SATURADOS, [17]

A equação proposta por Fredlund *et al.* (1978) para a tensão tangencial de rotura em solos não saturados é apresentada na expressão 3.5.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \cdot \tan(\phi') + (u_a - u_w)_f \cdot \tan(\phi^b) \quad (3.5.)$$

Onde:

- c' , é o intercepto do plano de rotura “alargado” de Mohr-Coulomb no eixo das ordenadas, onde a tensão normal líquida e a sucção mátrica são iguais a zero, também conhecido como coesão efetiva;
- $(\sigma_f - u_a)_f$, é o estado de tensão normal líquida no plano de rotura;
- u_{af} , é a pressão de ar nos poros no plano de rotura;
- ϕ' , é o ângulo de atrito interno associado à variável $(\sigma_f - u_a)_f$;
- $(u_a - u_w)_f$, é a sucção mátrica no plano de rotura;
- ϕ^b , é o ângulo que indica a taxa de aumento da resistência tangencial relativo à sucção mátrica.

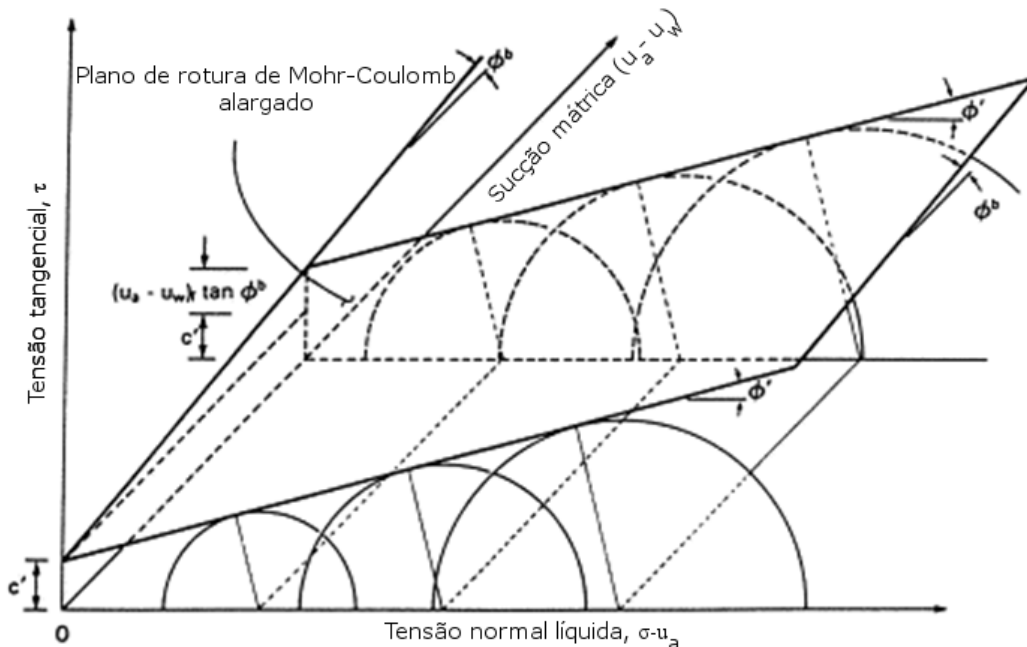


Fig. 3.5. – Critério de rotura de Mohr-Coulomb para solos não saturados, [22]

No caso de solos não saturados os círculos de Mohr correspondentes a situações de rotura podem ser representados de uma forma tridimensional, como mostra a Fig. 3.5. Nas ordenadas são representadas as tensões tangenciais, τ , e nas abscissas são representadas as tensões normais líquidas.

Os círculos de Mohr de um solo não saturado são representados da mesma forma que os círculos de Mohr de um solo saturado, no que diz respeito ao eixo das tensões efetivas. Contudo, a localização do círculo de Mohr na terceira dimensão é função da sucção mátrica. A superfície tangente aos círculos de Mohr é designada por plano de rotura de Mohr Coulomb alargado para solos não saturados.

Um aumento na tensão tangencial devido a um aumento na tensão normal líquida é caracterizado pelo ângulo de atrito ϕ' ; enquanto que um aumento na tensão tangencial causado por um aumento na sucção mátrica é caracterizado por ϕ^b . O valor ϕ^b é consistentemente menor ou igual a ϕ' e pode ser determinado experimentalmente.

3.7. SOLOS SUSCETÍVEIS DE ATRAIR E RETER ÁGUA: SOLOS ARGILOSOS

Existem solos cuja composição os tornam mais suscetíveis de atrair e reter água, como os solos argilosos. As argilas são partículas muito pequenas (ordem do milésimo de milímetro) e quimicamente muito ativas, são compostas por silicatos hidratados de alumínio, magnésio e ferro.

A forma laminar das partículas de argila faz com que estas apresentem uma superfície específica grande. Adicionalmente, estas partículas têm cargas elétricas negativas consideráveis nas suas faces, e cargas positivas nos bordos. É isto que as torna suscetíveis de atrair e reter água, uma vez que as cargas elétricas negativas atraem os cátions dos sais minerais dissolvidos na água e os cátions de hidrogénio contidos nas próprias moléculas de água, enquanto as cargas positivas nos bordos atraem os aniões oxidrilo.

3.7.1. CONSISTÊNCIA DO SOLO E LIMITES DE ATTERBERG

A consistência de um solo varia com o teor em água e depende dos seus minerais constituintes. A consistência é a resistência que um material apresenta quando sofre deformação ou rotura, ou o grau de coesão e adesão entre as partículas do solo; e manifesta-se sobre várias formas como na resistência à compressão, friabilidade, viscosidade e plasticidade.

O teor em água afeta significativamente as propriedades de solos finos e a plasticidade de um solo descreve a resposta do mesmo às mudanças do teor em água. Assim, quando o teor em água de um solo aumenta a sua resistência diminui, o solo poderá sofrer expansões significativas, e até poderá apresentar propriedades semelhantes à de um líquido. Se o teor em água de um solo diminui, o solo torna-se plástico, podendo até tornar-se semi-sólido.

Albert Atterberg estudou a consistência dos solos e definiu limites de consistência, também conhecidos como limites de Atterberg, Fig. 3.6.

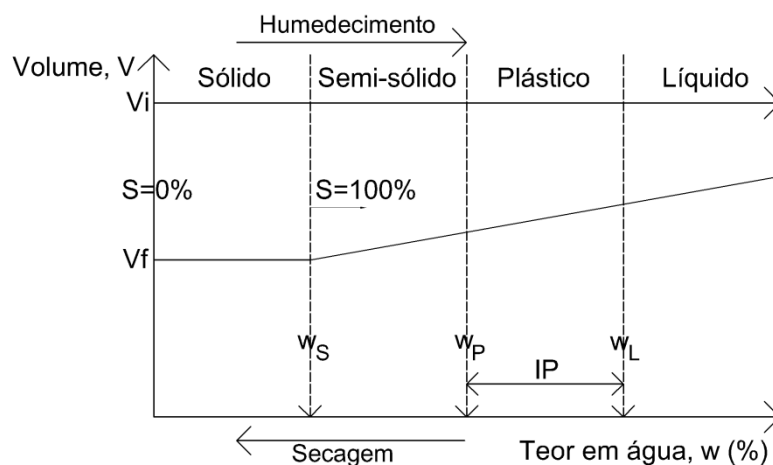


Fig. 3.6. – Limites de Atterberg, [18]

A Fig. 3.6. é uma representação gráfica dos limites de Atterberg. Nela são definidos quatro estados para descrever a consistência de um solo: sólido, semi-sólido, plástico e líquido. O limite de liquidez (w_L) é o teor em água a partir do qual o solo começa a comportar-se como um líquido. O limite de plasticidade (w_P) é definido como o teor em água a partir do qual o solo começa a comportar-se como um material plástico. O limite de retração (w_S) é o teor em água a partir do qual reduzindo o teor em água não ocorre alteração de volume, também designado como secagem a volume constante. Além

disso, o índice de plasticidade é a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade. Deve ser mencionado que existe alguma incerteza na determinação destes limites, tanto devido à forma como as amostras são tratadas (amostras remexidas onde é misturada água, modificando o arranjo inicial das partículas e o teor em água natural), como na forma como são realizados os ensaios. Assim, os limites mencionados anteriormente devem ser atendidos como aproximações e não como teores em água exatos, [18]. Conclui-se que o conhecimento da consistência de um solo é importante para definir ou classificar o tipo de um solo ou prever o seu desempenho quando usado como material de construção ou fundação.

3.7.2. APLICABILIDADE NO CASO DE ESTUDO

Os solos da RDD têm uma parcela significativa de materiais finos. Nos ensaios realizados no âmbito do projeto realizado pelo GEG, [4], a parcela de finos do solo analisado excedeu os 50%, contudo não foi concretizada uma separação da parcela argilosa e siltosa. Além disso, esses mesmos ensaios determinaram que o solo é composto por um material não plástico, e o teor em água ótimo obtido no ensaio de compactação foi 12%, típico de um material siltoso com uma pequena fração de argila, pelo que se conclui que a parcela principal de finos será constituída por siltes e não argilas. Ainda assim, as argilas são partículas essenciais para reter a água no solo, o que é importante para o crescimento das plantas, mas as características do solo analisado levam a inferir que estas poderão não condicionar o comportamento do solo. Deve ser referido que os solos na RDD variam muito na sua composição, pelo que as argilas poderão ter um papel mais preponderante noutros locais que não aquele onde foram recolhidas as amostras. Assim, tendo em conta que cada quinta apresenta solos com composições distintas, a argila poderá ser uma parcela significativa na composição dos mesmos, e nesse caso, o aumento do teor em água poderá implicar um decréscimo da resistência do solo, através da diminuição da sua componente coesiva. Se as argilas constituíssem uma parcela significativa da composição do solo este deveria ser estudado segundo uma análise não drenada, pois a baixa permeabilidade e alta deformabilidade do solo seriam condicionantes, e conduziriam à não dissipação das pressões neutras geradas aquando do carregamento (neste caso, infiltração). Este tema será comentado no subcapítulo 7.2.

4

INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA ESTABILIDADE DE TALUDES

4.1. CICLO DA ÁGUA, [23]

O ciclo da água, ou ciclo hidrológico, descreve o movimento contínuo da água, acima e abaixo da superfície terrestre. A água move-se de um reservatório para outro, como de um rio para o oceano, ou do oceano para a atmosfera, através de processos físicos de evaporação, condensação, precipitação, infiltração, evaporação, transpiração, evapotranspiração e escoamento, tanto superficial como subterrâneo. Ao fazer isto, a água percorre várias fases: líquida, sólida (na forma de neve ou gelo) e gasosa (vapor).

Adicionalmente, ao transferir água de um reservatório para outro, o ciclo da água purifica a mesma, repõe os níveis de água doce e transporta minerais para as várias partes do globo. A água também é uma das responsáveis pela reformulação das características geológicas da Terra, através de processos como a erosão e sedimentação. Então, deve ser destacado que o ciclo hidrológico é um dos maiores responsáveis na manutenção da vida e dos ecossistemas.

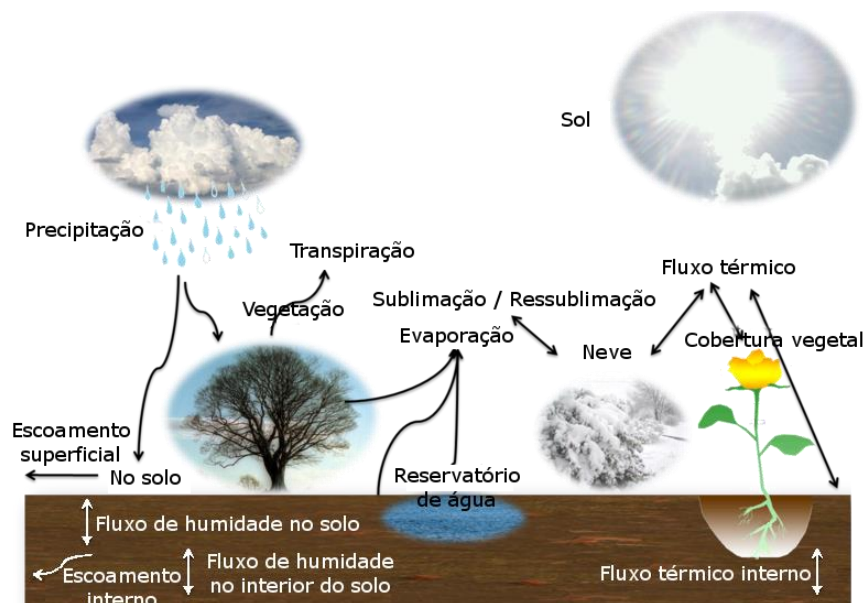


Fig. 4.1. – Ciclo hidrológico (Chen *et al.*, 1996, 1997; Chen e Dudhia, 2001; Ek *et al.*, 2003; Korean *et al.*, 1999)

O ciclo hidrológico é induzido pela radiação solar. O Sol aquece a água nos oceanos e restantes reservatórios de água, e esta evapora-se para a atmosfera. O gelo e a neve poderão sublimar-se diretamente em vapor de água. A evapotranspiração é água transpirada das plantas e evaporada do solo. As correntes ascendentes de ar quente transportam o vapor para a atmosfera onde temperaturas mais baixas conduzem à sua condensação em nuvens. As correntes de ar movem o vapor de água por todo o globo, e as partículas colidem, aumentam de tamanho, e precipitam a partir das camadas atmosféricas mais superiores. Depois de precipitada a água escorre pelo terreno como escoamento superficial e uma porção desse escoamento vai parar aos lagos e rios, e estes últimos por sua vez, conduzem a água novamente até aos oceanos. Outra parcela do escoamento é infiltrada no solo e parte da água infiltrada abastece aquíferos, que armazenam água doce durante longos períodos de tempo. Outra parcela da água infiltrada permanece perto da superfície do solo e poderá ressurgir novamente à superfície em reservatórios de água, como lagos, rios ou oceanos.

4.1.1. PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO

- Precipitação – vapor de água condensado que cai na superfície da Terra. A maioria da precipitação ocorre como chuva, mas também poderá dar-se sobre a forma de neve, granizo, entre outros;
- Interceção – refere-se à precipitação que não alcança o solo, mas em vez disso é interceptada pela vegetação, seja pelos ramos e folhas das plantas, ou pela camada mais superficial do solo. Esta água retorna ao ciclo hidrológico através da evaporação;
- Degelo – é o escoamento superficial provocado pelo degelo da neve. Poderá representar uma parcela importante do ciclo hidrológico em algumas zonas do globo;
- Escoamento superficial – inclui todas as formas como a água se desloca na superfície terrestre. À medida que flui, a água poderá infiltrar-se no solo, evaporar, ficar armazenada em lagos ou outros reservatórios, ou ser extraída para outros fins (agrícolas ou humanos);
- Infiltração – é o processo pelo qual a água entra no solo. Devido à sua importância na estabilidade de encostas, será tratada mais exaustivamente adiante;
- Escoamento subterrâneo – o processo pelo qual a água se movimenta no solo, na zona de aeração e aquíferos. A água subterrânea poderá ressurgir à superfície (numa nascente ou sendo bombada), ou eventualmente poderá descarregar nos oceanos;
- Evaporação – é a transformação de água no estado líquido em água no estado gasoso, à medida que esta se move da superfície ou de reservatórios de água para a atmosfera. A fonte de energia para a evaporação é primariamente a radiação solar. Frequentemente, a parcela de evaporação inclui a parcela de transpiração das plantas, embora em conjunto, estas sejam denominadas de evapotranspiração;
- Sublimação – é a transformação de água no estado sólido diretamente para água no estado gasoso;
- Ressublimação – é a transformação de água no estado gasoso diretamente em água no estado sólido;
- Adveção – descreve o processo de movimento da água, em qualquer estado, pela atmosfera;
- Condensação – é a transformação de água no estado gasoso em água no estado líquido, criando nuvens e nevoeiro.

Tendo em conta o ciclo hidrológico no estudo de estabilidade de taludes, é importante quantificar várias parcelas. Assim, de uma forma geral, o total precipitado terá que ser numericamente igual à soma do total infiltrado com o total evapotranspirado (que já incluirá a parcela de evaporação,

transpiração e interceção), com a parcela do total escoado superficialmente. No capítulo 5 serão mencionados métodos de mitigação dos caudais infiltrados e escoados, como por exemplo a drenagem superficial, que vão de encontro às medidas de prevenção e estabilidade de taludes.

Na RDD o ciclo da água é extremamente importante na medida em que a água infiltrada é fundamental para o crescimento das plantas, e quando em demasia provoca instabilidades nas encostas, através de escorregamentos de taludes e derrubamento de muros. Assim, é importante conhecer o ciclo hidrológico na tentativa de conseguir obter um equilíbrio ótimo entre os caudais infiltrados e escoados, para fomentar o crescimento das plantas e simultaneamente prevenir fenómenos de instabilidade.

4.2. PRECIPITAÇÃO

4.2.1. INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO CONSTANTE: CURVAS IDF

Embora a intensidade da precipitação varie durante os eventos de precipitação, muitos dos procedimentos usados para obter o pico de precipitação são baseados numa intensidade assumida como constante. A intensidade da precipitação é a espessura média de precipitação que ocorre por intervalo de tempo, e tipicamente é medida em milímetros por hora.

Ao longo do tempo foram desenvolvidas curvas IDF que fornecem um resumo das características da precipitação de uma região, relacionando duração do evento e probabilidade excedente, isto é, frequência da intensidade da precipitação (assumida constante em toda a duração).

Assim, uma curva IDF é uma ferramenta que caracteriza um padrão de precipitação numa dada região. Ao analisar eventos de precipitação passados, podem ser determinadas estatísticas de ocorrência de precipitações para vários períodos de retorno. Os parâmetros medidos por estas curvas são a intensidade, duração e frequência da precipitação. As linhas num gráfico de curvas IDF representam uma probabilidade, por exemplo, a linha dos 50 anos representaria eventos que têm uma probabilidade de ocorrer uma vez a cada 50 anos, [24].

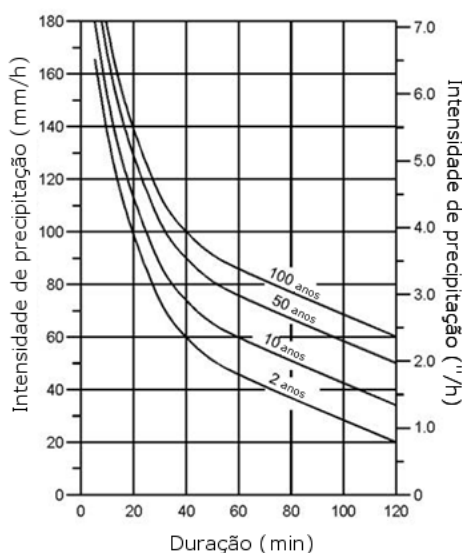


Fig. 4.2. – Exemplo de uma curva IDF, [25]

Para interpretar uma curva IDF, procura-se a duração da precipitação no eixo das abcissas, subindo verticalmente até encontrar o período de retorno adequado e depois horizontalmente para a esquerda lendo a intensidade no eixo das ordenadas.

Em Portugal existem postos udométricos cujos períodos de observação ultrapassam os 100 anos. Recentemente foram publicadas expressões de cálculo, mais concentradas nas durações diárias. Entre elas destacam-se como referência as expressões de Matos e Silva (1986), Godinho (1984,1987;1989), Brandão (1995) e Rodrigues (1998). Apesar disto, apenas recentemente é que Portugal tem curvas IDF que abrangem o país, para durações adequadas, para os tempos de concentração de bacias hidrográficas pequenas.

Os autores mencionados no parágrafo anterior fizeram um zonamento pluviométrico, mais ou menos adequado, que foi sendo alvo de retificações e sugestões em certas zonas onde o comportamento pluviográfico não fosse uniforme, devido a vários fenómenos atmosféricos mais localizados; ou aumentando o número de postos udométricos analisados, para mencionar apenas uma pequena fração dos estudos realizados, [26].

4.2.2. PRECIPITAÇÕES REAIS MEDIDAS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E/OU POSTOS UDOMÉTRICOS

O que se pode concluir do que foi mencionado anteriormente, é que as precipitações são muito variáveis dependendo da zona do país em questão. Num estudo anterior, [5], as precipitações utilizadas para modelar o caso de estudo proposto, localizado na RDD, foram as precipitações registadas no posto udométrico de Vila Real. Ora, o Douro tem condições de humidade e temperatura muito *sui generis* e os registos de Vila Real não serão os mais adequados para estudar com alguma confiança os fenómenos ali ocorridos. Hoje em dia, com a modernização da agricultura, e sendo a RDD uma região de renome internacional, e estando o Vinho do Porto cada vez mais sobre o escrutínio de instituições nacionais e internacionais, regista-se um investimento relevante por parte das empresas privadas que gerem as quintas. Esse investimento passa não só por uma melhor gestão da vinha e das castas e tudo o que isso acarreta, mas também pela manutenção dos taludes e muros centenários, e implementação de sistemas que consigam auxiliar o cultivo, prever fenómenos meteorológicos e também de instabilidade. As estações meteorológicas são um exemplo disso, e quintas que tenham interesses económicos e financeiros significativos, hoje em dia recorrem à implementação destes equipamentos *in locu*, como o caso da Quinta do Noval, que gentilmente forneceu os registos pluviométricos da sua estação para este estudo.

Estas estações conseguem não só medir precipitações horárias, como também outros parâmetros do interesse da agricultura da vinha, como a radiação solar, direção e velocidade do vento (importante para controlar a propagação de doenças na vinha), a humidade relativa do ar, ou temperatura.

4.3. ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Uma parte da água precipitada dá origem ao escoamento superficial. Este depende da intensidade de precipitação, da área e forma da bacia hidrográfica, da inclinação e comprimento dos taludes a serem drenados, da natureza e extensão da vegetação ou cultivo, e das condições da superfície e natureza das camadas de solo subjacentes.

É possível estimar o escoamento superficial através de hidrogramas unitários, ou usando métodos de cálculo empíricos. Usualmente é adotado o método racional, pela sua simplicidade de uso, e em bacias

hidrográficas relativamente pequenas fornece geralmente bons resultados. Este método é representado pela expressão 4.1., [27].

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (4.1.)$$

Onde:

- Q_p , é o caudal de ponta, em m^3/s ;
- i , é a intensidade média de cálculo de precipitação em mm/h, e que depende do tempo de concentração;
- A , é a área da bacia hidrográfica, ou área de drenagem em km^2 ;
- C , é o coeficiente de escoamento superficial;

Este método deu origem ao Método Racional Modificado, pois o primeiro mostrou ser pouco eficaz em eventos de precipitação de maior intensidade. Assim, neste último foi adicionado um fator de frequência, que na fórmula racional simples é tomado igual à unidade. O fator de frequência varia com o período de retorno, variando entre 1 para períodos de retorno inferiores ou iguais a 10 anos e 1,25 para períodos de retorno superiores a 100 anos.

O método racional parte de vários pressupostos, como o pico do escoamento num certo local, assim como a intensidade da precipitação, serem ambos função do respetivo tempo de concentração. Além disso, também parte do princípio que as condições de permeabilidade da bacia hidrográfica se mantêm inalteradas durante o evento de precipitação. Adicionalmente toma-se que o pico de escoamento tem lugar quando a área de drenagem a montante do local estudado contribuir para o escoamento.

Os coeficientes de escoamento, C , não podem ser determinados com precisão. Estes dependem do tipo de pavimento, edificações, área de ocupação, uso do território, permeabilidade, inclinação da superfície, etc. Contudo, vários autores sugeriram valores de C , tendo em conta as variáveis acima mencionadas, como Lencastre e Franco (2006) ou a FHWA (1999) que tabela coeficientes de escoamento para diferentes declives e tipos de solo, [28].

Existem também outros métodos para a determinação de caudais de ponta, mas que não são do foro deste trabalho, como o Método SCS (Soil Conservation Service), mais adequado para bacias hidrográficas médias.

Seria possível através de um estudo exaustivo da bacia hidrográfica onde uma quinta da RDD esteja inserida, estimar que parcela da precipitação seria passível de escoar ao longo da superfície e determinar a influência que esse escoamento teria na estabilidade de taludes, através da erosão provocada. No entanto, não foi possível fazê-lo neste trabalho, por falta de dados disponíveis. Além disso, estimar o caudal escoado ajudaria também a perceber, por exclusão de partes, que parcela da precipitação sofre infiltração no solo, que por si só é de difícil determinação.

4.4. INFILTRAÇÃO

4.4.1. GENERALIDADES, [29]

A água é o fator mais importante na maioria dos problemas de estabilidade de taludes. O conhecimento das condições da água subterrânea é fundamental para a análise e projeto de taludes.

O modelo básico de água-solo que existe na natureza tem uma distribuição triangular com uma magnitude $\gamma_w z$, chamada pressão hidrostática. De igual forma esta distribuição de pressões também existe na água dos poros que circunda as partículas do esqueleto sólido de um solo ou numa profundidade abaixo do nível freático.

Abaixo da superfície, existem duas zonas principais chamadas de zona de saturação e zona de aeração. A zona de saturação é constituída pelo solo totalmente saturado imediatamente abaixo do nível freático, isto é, os interstícios estão repletos de água. A zona de aeração é composta por uma zona não saturada e outra saturada e situa-se imediatamente abaixo da superfície até ao nível freático. Como já foi detalhado no capítulo 3, na franja capilar a pressão na água é inferior à pressão atmosférica (designada como sucção), e é retida por uma combinação de dois fatores: adesão e ação capilar. Adesão é a tendência que duas partilhas têm de se manter unidas, através de forças intermoleculares. A ação capilar existe devido à diferença entre o tamanho dos poros, e quanto menor for o espaço entre partículas, isto é, quanto maior for a parcela de finos num solo em relação à parcela de partículas maiores (como cascalhos), maior será a franja capilar, Fig. 4.3.

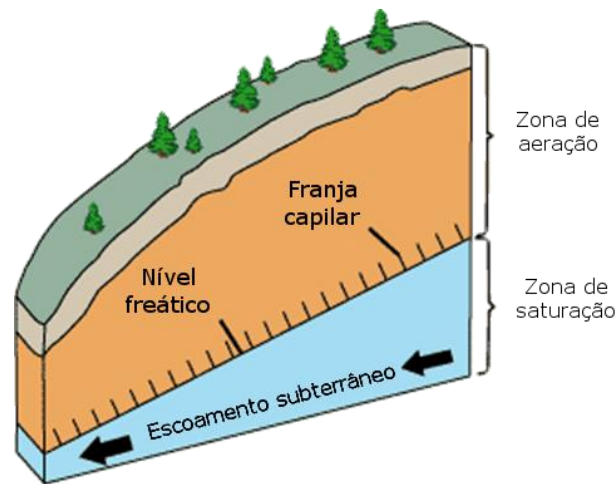


Fig. 4.3. – Corte de um talude com representação das zonas de aeração e saturação (USGS), [30]

A água afeta a estabilidade dos taludes pois gera pressões na água tanto positivas como negativas, alterando as condições de tensão; muda o peso volúmico efetivo do material que compõe o talude; desenvolve erosão, tanto interna como externa; e altera os constituintes minerais dos materiais que formam os taludes.

A infiltração através da zona não saturada é vertical e regida pela lei da gravidade e por isso não causa pressões positivas nos poros. Se a água infiltrada encontrar durante a sua descida um material de permeabilidade mais baixa, o fluxo encontrará uma barreira se a permeabilidade dessa zona mais abaixo for inferior à taxa de infiltração. Perante esta situação, irá formar-se um nível freático suspenso na superfície da zona impermeável, e irá ocorrer um escoamento lateral sobre a superfície do limite impermeável. Abaixo da zona impermeável, a taxa de infiltração será reduzida para o valor da permeabilidade da zona. Quando a precipitação infiltrada encontra o nível freático, quase toda a componente vertical do fluxo deixa de existir, e o fluxo lateral passa a ser o sentido principal de escoamento, e conseqüentemente, o nível freático sobe.

Então, estes dois modos de escoamento subterrâneo têm influência sobre a estabilidade de taludes, através de mecanismos diferentes. Acima do nível freático, a precipitação infiltrada aumenta o grau de saturação do solo, o que reduz as pressões negativas nos poros, e desta forma a resistência ao corte. À

medida que se desenvolve um fluxo lateral, aumentam as pressões nos poros, e como resultado a tensão efetiva e a resistência ao corte reduzem. O aumento de pressões positivas nos poros ocorre quando a precipitação infiltrada forma um nível freático suspenso ou causa uma subida no nível freático.

A infiltração deixa de ocorrer quando todos os vazios no solo estão repletos de água. Se a razão à qual a água chega à superfície exceder a razão à qual consegue percolar, a capacidade de infiltração diminuirá.

O fluxo da água subterrânea em solos é normalmente muito lento e geralmente é laminar. E neste contexto é válida a lei de Darcy.

4.4.2. LEI DE DARCY

A gravidade conduz a água num percurso descendente, em direção ao nível freático. A partir da superfície, esta infiltra-se e flui para um ponto de descarga num corpo de água ou nascente. Tal como à superfície, a água necessita de uma inclinação para fluir, por isso, deve existir uma inclinação (ou gradiente) para existir escoamento subterrâneo. Chama-se a isto o gradiente hidráulico, que é medido como a razão da distância vertical entre o ponto de entrada até ao ponto de descarga e o comprimento da linha de fluxo entre os dois pontos. Esta relação foi desenvolvida por Henry Darcy em 1856, e pode ser apresentada como na expressão 4.2.

$$v = k \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \quad (4.2.)$$

Onde:

- v , é a velocidade do fluxo;
- h , é a carga hidráulica;
- l , é o comprimento da linha de fluxo;
- k , é um coeficiente que depende da permeabilidade do material que constitui o solo, da aceleração de gravidade e da viscosidade da água.

Assim, a água nos solos move-se de locais com maior carga hidráulica para outros com menor carga hidráulica.

Foram elaborados métodos para estimar a taxa de infiltração que se basearam na lei de Darcy. Alguns deles serão mencionados posteriormente neste estudo.

4.4.3. INFLUÊNCIA DA INFILTRAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES, [29]

A influência da infiltração na estabilidade de taludes depende de vários fatores, como a posição original do nível freático, a intensidade e duração da precipitação, o evento de precipitação que ocorreu anteriormente na bacia hidrográfica, a geologia, o grau de saturação e a topografia.

O nível freático pode ser determinado de duas formas. A primeira envolve a análise de dados piezométricos recolhidos anteriormente, durante e depois de eventos de precipitação. A segunda envolve a solução de uma equação que descreve a formação de uma frente de humedecimento, completamente saturada. A formação desta frente depende da porosidade, permeabilidade, estados

inicial e final de saturação do solo que constitui o talude, e a percentagem da precipitação no período de retorno esperado que irá infiltrar-se no solo.

Lumb abordou o tema da frente de humedecimento em 1962 e 1975, e concluiu que a frente de humedecimento desce verticalmente sobre a influência da gravidade, mesmo depois dos eventos de precipitação terem terminado, até que seja alcançado o nível freático ou uma zona de permeabilidade mais baixa, como foi mencionado anteriormente. A espessura da frente de humedecimento é inversamente relacionada com a diferença entre o estado final e inicial de saturação da massa de solo. Assim, são esperadas frentes mais espessas depois de ocorrer um evento de precipitação intensa.



Fig. 4.4. – Fotografia representativa da frente de humedecimento, [31]

Em 1975 Lumb chegou à expressão que relaciona precipitação em taludes desprotegidos, infiltração e a espessura da frente de humedecimento. Esta expressão é um modelo de infiltração muito simplificado e apenas tem aplicabilidade em situações onde a subida do nível freático se deve apenas à infiltração da precipitação. Este modelo não tem em conta a inclinação do talude (o que no caso em estudo é importante), o fluxo superficial e as diferenças nas respostas dos lençóis freáticos.

$$h = \frac{k \cdot t}{n \cdot (S_f - S_0)} \quad (4.3.)$$

Onde:

- h , é a espessura da frente de humedecimento, após um tempo t ;
- k , é o coeficiente de permeabilidade do solo;
- t , é a duração da precipitação;
- n , é a porosidade;
- S_f , é o grau de saturação final;
- S_0 , é o grau de saturação inicial.

Mais recentemente, e segundo Fourie *et al.* (1999), registam-se muitas situações onde existem escorregamentos superficiais, onde não é muito evidente que uma subida do nível freático tenha sido suficiente para despoletar os escorregamentos observados. Em vez disso, esses deslizamentos têm

acontecido devido ao avanço de uma frente de humedecimento nos taludes, até que esta atinja uma profundidade onde é despoletado um evento de instabilidade. De acordo com Rahardjo *et al.* (1994) isto acontece porque a resistência de corte devida à sucção mátrica diminui o suficiente para originar as instabilidades. Ainda hoje é difícil quantificar a infiltração e o seu efeito na estabilidade, e ao longo dos anos têm vindo a ser desenvolvidos métodos mais complexos para estimar a infiltração no solo. Os mais simples, unidimensionais, como de Matos (1974) e Lumb (1975) já mencionado em cima, calculam o avanço da frente de humedecimento e Vargas *et al* (1986) estudaram a importância da taxa de precipitação em estabilidade de taludes, [32].

4.4.4. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO OU VOLUME DE INFILTRAÇÃO, [33]

Os métodos de determinação da taxa de infiltração podem ser separados em três categorias: baseados na física, aproximados ou empíricos. Métodos como o de Richards (1931), baseado na física e derivado a partir da lei de Darcy, são de difícil resolução e necessitam da introdução de dados detalhados e utilização de métodos numéricos. Ainda que os computadores tenham evoluído muito ao longo do tempo, usar métodos numéricos para este tipo de determinação implica que sejam realizadas uma série de medidas complexas para obter os dados do solo necessários para realizar esses modelos numéricos. Assim, dá-se preferência a abordagens empíricas como a de Horton, Kostiaikov e Holtan, e modelos aproximados com base na física, como o de Green e Ampt, e Philip.

Os métodos empíricos são baseados em dados de infiltração medidos em campo, e nos parâmetros determinados por essa via, por isso, tendencialmente são menos limitados em suposições no que diz respeito à superfície do solo ou condições do perfil do solo, mas são mais limitados pelas condições nas quais foram calibrados.

Os métodos que são aproximações baseadas na física usam parâmetros que podem ser obtidos a partir das propriedades hidráulicas do solo e não necessitam de dados de infiltração medidos.

As curvas típicas da taxa de infiltração de solos são apresentadas na Fig. 4.5.

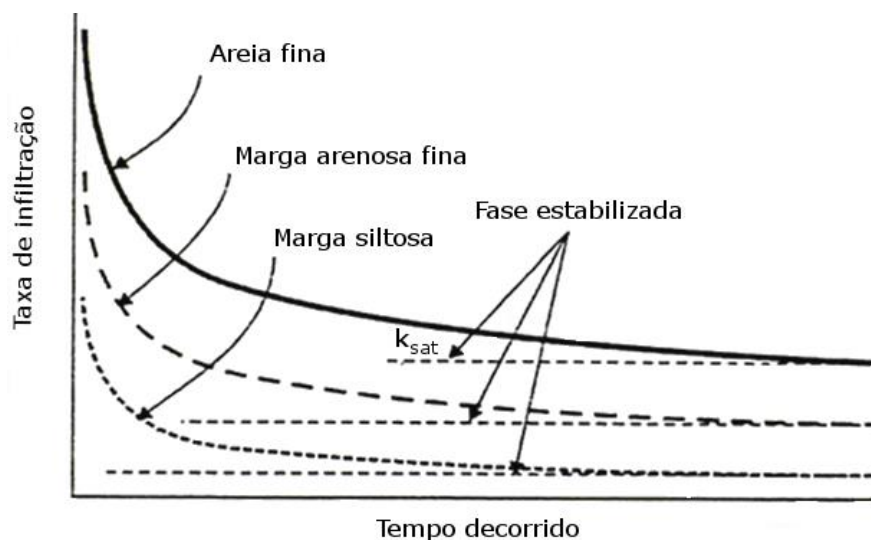


Fig. 4.5. – Curvas típicas da taxa de infiltração de vários tipos de solo, [34]

A água aplicada na superfície de um solo relativamente seco rapidamente se infiltra devido à afinidade que as partículas do solo têm pela água. À medida que o tempo passa e o solo se torna cada vez mais

húmido, a força de gravidade torna-se na força dominante que provoca o movimento da água. A taxa de infiltração diminui com o tempo e aproxima-se do valor de condutividade hidráulica saturada do solo, como se pode ver na Fig. 4.5.

4.4.4.1. Equação de Kostiakov (1932)

Kostiakov propôs uma equação de infiltração simples, empírica, baseada em curvas ajustadas a dados recolhidos em campo. Esta equação relaciona infiltração com o tempo numa função potencial, representada na 4.4.

$$f_p = K_k \cdot t^{-\alpha} \quad (4.4.)$$

Onde:

- f_p , é a capacidade de infiltração;
- t , é o tempo depois do início da infiltração;
- K_k e α , devem ser avaliados a partir de dados de infiltração, sendo variáveis sem sentido físico.

A equação de Kostiakov é muito usada devido à sua simplicidade e facilidade na determinação de duas constantes a partir de dados de infiltração medidos. Contudo, a equação não é perfeita, e uma das suas maiores lacunas é prever que a capacidade de infiltração é infinita quando o tempo é igual a zero, e se aproximar de zero para longos períodos de tempo.

Em 1948, Mezencev propôs uma alteração à equação de Kostiakov, adicionando uma constante que representa a taxa de infiltração final alcançada quando o solo fica saturado, depois de infiltração prolongada.

4.4.4.2. Equação de Horton (1939,1940)

O modelo de Horton é um dos modelos mais conhecidos na hidrologia e é dado pela expressão 4.5.

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (4.5.)$$

Onde:

- f_p , é a capacidade de infiltração ou taxa de infiltração potencial;
- f_c , é a taxa de infiltração final constante;
- f_0 , é a capacidade de infiltração para t igual a zero;
- β , é um parâmetro do solo que controla a taxa de decrescimento da infiltração e depende do teor em água inicial, θ_i , e taxa de aplicação R ;
- t , é o tempo depois do início da infiltração.

Os parâmetros f_c , β e f_0 devem ser avaliados a partir de dados de infiltração medidos. A equação de Horton tem vantagens em relação à de Kostiakov, como por exemplo, para t igual a zero, a capacidade de infiltração não é infinita, e a capacidade de infiltração aproxima-se de um valor constante mínimo

diferente de zero, igual a f_c . Esta equação é muito utilizada e geralmente fornece boas aproximações aos dados. Apesar disto, a equação de Horton tem vindo a ser criticada por negligenciar o papel de potenciais gradientes de capilaridade na diminuição da capacidade de infiltração ao longo do tempo (Bevin, 2004). Além disso, Novotny e Olem (1994) criticam o modelo de Horton por assumir que a condutividade hidráulica é independente do teor em água do solo.

4.4.4.3. Equação de Green-Ampt (1911)

Este modelo tem em conta várias variáveis que outros métodos não consideram. É um método aproximado que aplica diretamente a lei de Darcy e tem uma melhor aplicabilidade em solos uniformes, inicialmente secos, de grãos mais grossos e texturados, que exibem uma frente de humedecimento bem definida (Hillel e Gardner, 1970).

A frente de humedecimento é caracterizada por uma sucção mátrica, independentemente do tempo ou posição, e é um plano de separação entre a zona infiltrada uniformemente húmida e a zona ainda não infiltrada.

A equação de Green-Ampt é apresentada na expressão 4.6.

$$f = \frac{K_{fs} \cdot (H_0 + S_f + L_f)}{L_f} \quad (4.6.)$$

Onde:

- f , é a taxa de infiltração;
- K_{fs} , é a condutividade hidráulica da zona de transmissão;
- H_0 , é a espessura de água na superfície;
- S_f , é a sucção efetiva na frente de humedecimento;
- L_f , é a distância da superfície à frente de humedecimento.

A equação de Green-Ampt foi ajustada e melhorada ao longo do tempo por vários estudiosos, mas continua ainda hoje a ser um método muito popular e utilizado para aplicações no campo, por ser aplicável numa ampla gama de condições de perfil do solo, condições fronteira e condições iniciais. Além disso, a representatividade física dos seus parâmetros e a capacidade de obter os seus valores através das propriedades do solo, tornam este modelo ainda mais atrativo.

Em relação ao caso em estudo, não foi possível obter dados sobre a taxa de infiltração ou o coeficiente de condutividade hidráulica saturada, visto que são necessários meios exaustivos que não estão ao alcance deste trabalho. Os meios acima foram descritos, por se achar relevante a sua aplicação em casos futuros, pois a taxa de infiltração é um dado fundamental para estudar com precisão a estabilidade de encostas em geral, e principalmente na RDD, pelas suas características únicas.

4.5. INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A vegetação é usada em projetos de engenharia, geralmente como uma forma de reduzir o impacto visual provocado pelas obras e para beneficiar a qualidade paisagística das zonas onde é realizada a obra.

Contudo, a vegetação também se tem demonstrado altamente eficaz e vantajosa na estabilização de taludes. Esta tem uma função estabilizadora da superfície do solo, através das suas raízes, que funcionam como elementos resistentes ao corte e de redução da erosão. Adicionalmente, a vegetação minimiza a infiltração (interceptando a precipitação com a folhagem, e permitindo a evaporação diretamente a partir daí), e diminui a velocidade de escoamento. A justaposição e arqueamento do solo provocado por troncos e ramos também poderão ser vantajosos, produzindo um confinamento lateral. Além disso, também poderá influenciar indiretamente a estabilidade mais profunda, por esgotamento da humidade no solo, atenuação da profundidade de penetração de gelo, e oferecendo um meio para o estabelecimento de vegetação de raízes mais profundas, como arbustos e árvores.

As vantagens de usar a vegetação como meio estabilizador são várias. Trata-se de um método multifuncional, relativamente barato, autorreparador, visualmente atractivo, e não necessita de equipamentos pesados ou complexos para a sua instalação. Contudo, também tem algumas limitações, pois é suscetível de morrer e secar, além de ser complicado estabelecer-se em encostas muito inclinadas e também crescer lentamente, [29].

4.5.1. EFEITOS MECÂNICOS

4.5.1.1. Reforço Radicular

O reforço radicular nos solos incute uma coesão aparente. As raízes e rizomas interagem com o solo e produzem um material compósito no qual as raízes comportam-se como fibras de resistência à tração e adesão relativamente elevadas, incorporadas numa matriz com resistência à tração significativamente menor – o solo. Existem vários estudos de reforço com raízes e fibras, com destaque para os de Barker (1986), Gray (1978) e Waldron (1977), que indicam um reforço de resistência entre os 3 e os 17 kPa, para um rácio típico de área de raízes entre os 0,05 e 0,15% (Gray, 1978), [29].

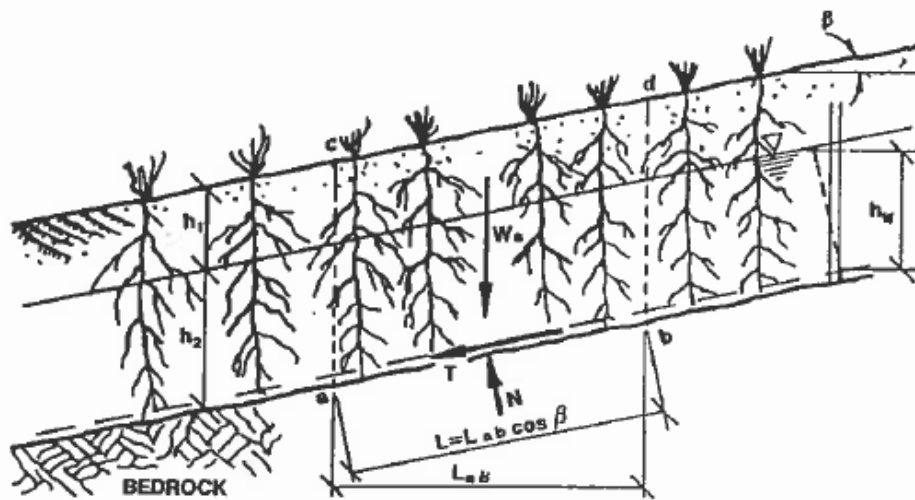


Fig. 4.6. – Forças numa massa de solo prestes a escorregar (Bache e MacAskill, 1984), [29]

A Fig. 4.6. mostra como as raízes podem ser incorporadas na análise de estabilidade. E a expressão 4.7. possibilita o cálculo do fator de segurança, incluindo o reforço radicular.

$$FS = \frac{(c' + \Delta s) \cdot L + W_s' \cdot \cos(\beta) \cdot \tan(\phi')}{W_s \cdot \sin(\beta)} \quad (4.7.)$$

Onde:

- W'_{s} , é o peso efetivo do solo, i.e., $\gamma_1 \cdot h_1 + (\gamma_2 - \gamma_w) \cdot h_2$;
- W_s , é o peso do solo;
- c' , é a coesão efetiva de solo sem raízes;
- Δs , é o incremento de força de corte por unidade de área de solo;
- γ_1 , é o peso volúmico do solo seco;
- γ_2 , é o peso volúmico do solo saturado.

Estudos realizados por O'Loughlin (1984) indicam que são as raízes menos espessas (1 a 20 milímetros de diâmetro) que mais contribuem para o reforço dos solos. As gramíneas, leguminosas e pequenos arbustos conseguem ter um efeito significativo de reforço em profundidades entre 0,75 e 1,5 metros. Já as árvores têm efeitos mais profundos, e podem melhorar a capacidade resistente do solo até 3 metros de profundidade ou mais, dependendo da morfologia da raiz. Tengbeh (1989) descobriu que as raízes das gramíneas aumentam o ângulo de atrito interno de um solo arenoso, mas que estas não têm qualquer efeito em solos arenoso-argilosos.

Conclui-se que a vegetação poderá ter um maior efeito perto da superfície do solo, onde a densidade de raízes é geralmente maior, e o solo é normalmente mais fraco. O efeito máximo de resistência ocorre quando a resistência de tração das raízes é completamente mobilizada e, quando sobre tensão, o comportamento do complexo raízes-solo é compatível. Isto necessita de raízes com uma grande rigidez ou módulo de elasticidade, para que seja possível mobilizar resistência suficiente e 8 a 10% das forças de rotura da maioria dos solos. Segundo Waldron e Dakessian (1981), o efeito de tração é reduzido em vegetação com raízes superficiais, onde as raízes rompem por arranque, isto é, escorregamento devido à perda de ligação entre a raiz e o solo, antes que seja atingido o pico de resistência à tração. Assim, o efeito de tração é mais representativo em árvores cujas raízes penetram vários metros no solo, e os seus caminhos pelo solo e em torno de rochas e outras raízes, provocam uma boa ancoragem. Neste último caso, as raízes também poderão romper, mas porque a sua resistência à tração foi excedida. Adicionalmente, o efeito de tração também será minimizado em situações onde o solo está comprimido, como por exemplo, no pé de taludes. Nestes casos, a rotura das raízes ocorre por encurvadura, [35].

No caso em estudo, as raízes das videiras conseguem penetrar até profundidades elevadas, ancorando-se por vezes nos substratos rochosos. Além disso, pode ser usado outro tipo de vegetação, como gramíneas e leguminosas, que farão um reforço radicular mais superficial, além de prevenir a erosão. Este reforço mecânico é considerável, mas de difícil quantificação. Adiante serão referidas formas de estabilização de encostas, recorrendo à vegetação.

4.5.1.2. Sobrecarga

Como já foi mencionado, a sobrecarga é provocada pelo peso da cobertura vegetal no solo. Este efeito é normalmente considerado apenas em árvores, pois o peso das gramíneas e da maioria das ervas e arbustos é comparativamente, muito pequeno. A sobrecarga aumenta as forças descendentes num talude, diminuindo a resistência do solo em relação a escorregamentos de terras, mas também aumenta a resistência atrítica do solo. Bishop e Stevens demonstraram em 1964 que árvores altas podem aumentar a tensão normal num talude até 5 kPa, mas que nem metade contribui para um aumento em tensão cortante. Geralmente, o segundo efeito supera o primeiro, por isso normalmente a sobrecarga devido às árvores é considerada benéfica. Independentemente disto, a sobrecarga no topo de um talude

pode reduzir a estabilidade, enquanto que no pé do talude, contribui para um aumento da estabilidade, como é esperado, [35].

4.5.1.3. Proteção da Superfície

A vegetação protege mecanicamente o solo, absorvendo diretamente o impacto infligido pelos peões, animais e veículos. A maioria dos estudos sobre este efeito concentram-se na resistência da vegetação ao dano provocado por peões. Quando um indivíduo caminha na superfície do solo, o solo e vegetação são compactados na primeira fase de cada passo, sobre a pressão do calcanhar. No final do passo, estes são cortados pelo movimento dos dedos. Segundo Quinn, Morgan e Smith (1980), esta ação cortante é a mais danosa.

Na generalidade as gramíneas são razoavelmente resistentes e conseguem aguentar entre 1.000 e 2.000 passos de pessoas antes que a densidade da cobertura vegetal caia abaixo dos 50%, [35].

4.5.2. EFEITOS HIDROLÓGICOS

A vegetação pode afetar a estabilidade de taludes ao modificar o regime hidrológico do solo. A interceção e transpiração realizada pela folhagem das árvores tende a manter os solos menos húmidos e mitigar ou atrasar condições de saturação do solo que poderão provocar instabilidade nas encostas.

4.5.2.1. Evapotranspiração

A evapotranspiração a partir da superfície das plantas não é igual à evaporação que ocorre a partir de um reservatório de água ao ar livre. Os dois rácios não são iguais porque os balanços de energia das superfícies são muito diferentes. O efeito da vegetação é expresso pelo rácio E_t/E_0 , onde E_t é a taxa de evapotranspiração da cobertura vegetal e E_0 é a taxa de evaporação num corpo de água ao ar livre. O rácio E_t/E_0 assume que a evapotranspiração não é limitada pela disponibilidade de água, isto é, está a ocorrer à taxa potencial E_p . Contudo, quando existem grandes taxas de evapotranspiração, a camada superficial do solo seca rapidamente e as plantas têm mais dificuldade em extrair água do solo através das raízes. Assim, para não ficarem desidratadas, as plantas reduzem a sua transpiração de tal modo que a sua taxa de transpiração (E_a) se torna inferior à potencial.

Embora a capacidade que a vegetação tem para reduzir a humidade no solo seja comumente conhecida, esta é extremamente difícil de quantificar. Humidade reduzida no solo provoca um aumento na sucção deste, o que afeta tanto a condutividade hidráulica como a pressão da água nos poros. Existe pouca informação sobre a influência da vegetação na permeabilidade de um solo, e sobre o efeito que a vegetação poderá ter na estabilidade de taludes através da diminuição da humidade no solo. Apesar disso, é sabido que a vegetação afeta o ritmo a que um solo fica saturado, e dessa forma, controla o escoamento superficial e potenciais instabilidades, [35].

4.5.2.2. Interceção

Ao entrar em contacto com a folhagem da cobertura vegetal, a precipitação é dividida em duas partes: precipitação direta, que atinge o solo depois de atravessar os espaços entre a folhagem; e interceção, a precipitação que atinge a cobertura vegetal. Alguma da precipitação intercetada é armazenada em folhas e ramos e depois devolvida à atmosfera por evaporação. A restante precipitação intercetada

alcança o solo através de escoamento pelos ramos e troncos, ou drenada através da folhagem. Existem métodos para estimar a parcela armazenada e o escoamento/drenagem ao longo dos ramos, troncos e folhas; contudo, não serão aqui discutidos, por não serem do foro do presente estudo, [35], [36].

4.5.2.3. Infiltração

Quando a chuva alcança o solo debaixo da vegetação, esta poderá ter maiores probabilidades de se infiltrar do que em solos sem vegetação. A matéria orgânica, o crescimento das raízes, as raízes secas, fauna como minhocas e outros vermes do solo, térmitas e um nível alto de atividade biológica no solo, ajudam a manter um sistema poroso contínuo, e desta forma uma maior permeabilidade. Assim, através de um aumento da taxa de infiltração e também talvez da capacidade e armazenamento de humidade por parte do solo, a vegetação poderá diminuir o escoamento superficial que ocorre durante e após um evento de precipitação. Desta forma, uma maior taxa de infiltração poderá diminuir o número de eventos erosivos por ano, pois será necessária uma chuva mais intensa ou de maior duração para gerar o mesmo volume de escoamento.

Contudo, isto poderá ter vantagens e desvantagens. Será vantajoso no caso do escoamento superficial ser a principal causa de instabilidade em taludes, mas poderá ser prejudicial aumentar a taxa de infiltração, na medida em que com um aumento do teor em água do solo, ocorre uma diminuição da resistência e da coesão do mesmo.

A condutividade hidráulica saturada de um solo depende da sua textura e estrutura, da presença de fendas e da porosidade do solo. Deve ter-se em conta estes fatores aquando da implementação de vegetação numa encosta, tendo em vista a finalidade do talude, e mantendo em mente as vantagens e desvantagens que poderão advir dessa mesma vegetação, [35], [36].

4.5.3. RESUMO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES, [35]

4.5.3.1. Vantagens

- a folhagem intercepta a precipitação, causando perdas absorptivas e evaporativas, reduzindo a precipitação disponível para infiltração. Além disso, a intercepção diminui a energia cinética das gotas de chuva, e conseqüentemente, a erosão;
- os ramos e folhas à superfície aumentam a rugosidade do escoamento superficial, diminuindo a sua velocidade;
- as raízes aumentam a permeabilidade do solo ao seu nível, o que provoca um aumento da extração de humidade por transpiração, diminuindo a pressão de água nos poros e aumentando a sucção do solo, e conseqüentemente a sua resistência;
- as raízes provocam um confinamento do solo, reduzindo a sua erosão; aumentam a resistência à tração do complexo raízes-solo; criam uma rede e um efeito de tapete tracionável, contendo os estratos inferiores;
- as raízes penetram em estratos mais profundos, provocando ancoragem em estratos mais firmes;
- os ramos e folhas que cobrem a superfície do solo conseguem absorver o impacto do tráfego, protegendo a superfície do solo de possíveis danos.

4.5.3.2. Desvantagens

- a folhagem interceta a precipitação, o que aumenta o tamanho das gotas quando a água escorre das folhas para o solo, aumentando a intensidade de precipitação localizada;
- as raízes aumentam a permeabilidade do solo ao seu nível e além disso, abrem ainda mais as fendas de dessecação, o que conduz a um aumento da infiltração.

4.5.3.3. Efeitos que Poderão ser Vantajosos e/ou Adversos

- os ramos e folhas à superfície que interagem com o escoamento superficial podem funcionar como um reservatório e conseqüentemente num maior volume de água para infiltração;
- a sobrecarga provocada pelo peso das árvores aumenta as componentes normal e tangencial das forças aplicadas à superfície.

5

MODELOS DE RECONSTRUÇÃO DE MUROS DE XISTO DE PEDRA POSTA E MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS NA RDD

5.1. MODELOS DE RECONSTRUÇÃO DE MUROS DE XISTO DE PEDRA POSTA, [7]

Ainda que não seja do âmbito deste estudo, e porque é uma realidade muito presente na RDD, considera-se interessante fazer uma alusão de como reconstruir os muros de xisto do Douro, respeitando as diretivas e encarando a RDD como Património Mundial da Humanidade, sem cair na disformidade de algumas obras que pouco favorecem a paisagem característica da RDD, seja na reconstrução de muros ou na execução de obras de estabilização de encostas, como as da Fig. 5.1.



Fig. 5.1. – Exemplos de obras de estabilização realizadas na RDD

A reconstrução dos muros de xisto que sofrem derrubamento durante períodos de maior precipitação tem custos elevados, e a mão-de-obra nem sempre é especializada. Frequentemente a construção é realizada por pessoal permanente das entidades gestoras da região, que da melhor forma que sabem, reconstróem os muros, pedra a pedra, de uma forma muito semelhante ao que era feito antigamente. No entanto existem modelos de reconstrução cujas soluções podem ser executadas para que os muros reconstruídos sejam tão ou mais duradouros do que aqueles que foram substituir, Fig. 5.2.

Se ocorrer o derrube parcial de um muro, as boas práticas dizem que a base deste deverá ser mais larga do que o topo, estreitando progressivamente, e com uma inclinação para o interior na ordem dos 2% (Cordeiro *et al.*, 2003). Adicionalmente deve ser garantida drenagem junto ao muro, recorrendo a cortinas drenantes, compostas por material grosso e permeável, que poderá ser envolvido em geotêxtil, para evitar que a penetração de finos provindos do solo possa inviabilizar a função da cortina drenante colocada. Aliado à cortina drenante, também deverão ser instalados tubos coletores de água na base do muro (que pela mesma razão anterior também deverão ser envolvidos em geotêxtil) ou barbacãs, que conduzirão a água até uma rede de drenagem ou linha de água. A sobreposição de pedras deverá ser feita por pessoal especializado que conheça a melhor forma de emparelhar as pedras, para aumentar a compacidade e estabilidade do muro, e simultaneamente manter o aspeto estético do muro.

Se ocorrer o derrube total do muro, ou em casos em que o acesso ao mesmo seja difícil, poderão ser executados muros de gabiões, (Fig. 5.2 – à esquerda e Fig. 5.3.) que têm algumas vantagens, como não precisarem de fundações. A face visível do muro é preenchida com pedras de xisto justapostas de espessura reduzida, que poderão ser as pedras originais do muro derrubado; enquanto o resto das gaiolas são preenchidas com o solo que acompanhou o derrubamento, separando-o em materiais finos e grossos. O gabião é forrado com geotêxtil, e nele é colocado e compactado o material grosso (partículas com dimensão superior a 2 milímetros). Na parte traseira do gabião é colocado o material fino (partículas com dimensão inferior a 2 milímetros), para facilitar a penetração das raízes. Esta solução tem a vantagem de ser mais económica e não exigir mão-de-obra especializada.

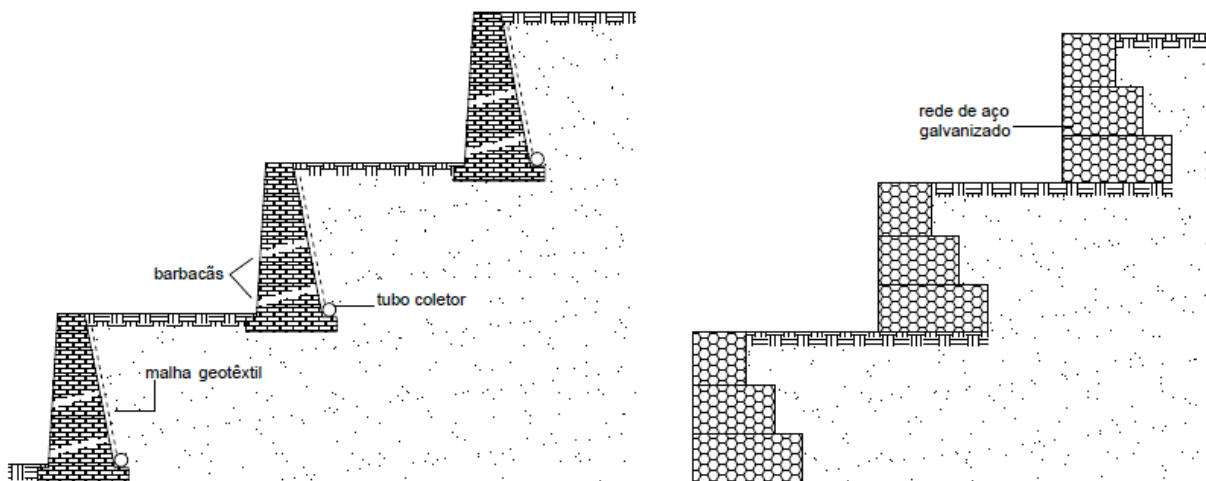


Fig. 5.2. – Esquema representativo dos modelos de recuperação dos muros do Douro, [7]



Fig. 5.3. – Fotografia de uma obra de estabilização realizada com recurso a gabiões, na EN 222

5.2. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS

Como já foi referido, todas as obras a serem concretizadas na RDD devem tentar respeitar a vertente estética, com o propósito de causar o menor impacto visual e enquadrando-se na paisagem duriense, por se tratar de uma região considerada Património Mundial da Humanidade. No que diz respeito a isto, todos os projetos deverão ser aprovados pela CCDRN (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte).

5.2.1. DRENAGEM

A drenagem da água é um dos métodos primordiais para estabilizar encostas e taludes. Um sistema de drenagem bem dimensionado e executado permite controlar o movimento da água superficial, controlar a influência da água infiltrada no comportamento hidráulico do solo que constitui o talude, e reduzir a pressão de água nos poros do solo, isto é, controla os processos erosivos e as forças desestabilizadoras hidrostáticas provenientes de fenómenos de precipitação.

Já foi mencionado no capítulo 2 que algumas das formas de armação do terreno obrigam a que seja instalado um sistema de drenagem superficial, e embora sendo este mais barato do que um sistema de drenagem profunda, por vezes, as inclinações do talude, aliadas a uma espessura de solo pequena conduzem a que um sistema de drenagem superficial não seja suficiente, pelo que deverá ser realizada drenagem profunda, ou mesmo ambas. É claro que isto implica um investimento grande por parte das entidades gestoras das quintas, mas que poderá ter retorno a médio prazo, pois minimiza em grande parte os deslizamentos ocorridos.

Além disso, é difícil quantificar exatamente quais os efeitos de um sistema de drenagem *a priori*, ainda que se possa fazer um estudo recorrendo a piezómetros, cujas leituras condicionarão o método construtivo a seguir.

Caso aconteça um escorregamento, podem ser usados alguns métodos para impedir que a situação se deteriore ainda mais, como usar sacos de areia para afastar o escoamento de água superficial da zona de rotura, selar fraturas no solo com revestimentos como argamassas finas, para reduzir a infiltração de água, ou cobrir a superfície do solo temporariamente com plásticos ou semelhantes para reduzir o risco de movimento durante a construção. [35]

5.2.1.1. Drenagem Superficial

A drenagem superficial de encostas e taludes deve ser cuidadosamente planeada para mitigar potenciais escorregamentos quando ocorre precipitação intensa ou de longa duração. Ainda que haja necessidade de permitir que alguma água se infiltre no terreno, pois os solos da RDD são geralmente secos, quando as chuvas são longas e intensas o solo atinge rapidamente o estado de saturação, e a água deixa de conseguir infiltrar, passando a escoar livremente pelos taludes, provocando erosão e fenómenos de instabilidade. Assim, é importante ter implantado um sistema que consiga conduzir essas águas para os locais previstos para isso.

As redes de escoamento superficial são normalmente compostas por canais com forma em V ou U, e são de betão ou de aço, que percorrem a cabeça dos taludes, conduzindo a água para fora da zona de potencial instabilidade ou uma linha de água. Na região em estudo usa-se na maioria dos casos manilhas de meia cana ou cana completa em betão, Fig. 5.4., por ser mais barato e fácil de instalar. No seu dimensionamento devem ser considerados parâmetros como a área e forma da zona de captura de água, a intensidade da precipitação, o declive e comprimento do talude a ser drenado, as condições do

solo e natureza dos solos superficiais, e a natureza e quantidade de vegetação. Todos estes fatores são típicos do local onde será colocado o sistema de drenagem, pelo que não poderão ser generalizados, [29].



Fig. 5.4. – Sistemas de drenagem de manilhas de cana completa e meia cana, [37]

5.2.1.2. Drenagem Profunda

Quando necessário, também poderá ser realizada drenagem profunda. A drenagem profunda tem vantagens que na zona em estudo poderão, no entanto, apresentarem-se como desvantagens. Já foi mencionado que os solos da RDD são tipicamente secos, ora a drenagem profunda faz um controlo mais apertado dos efeitos de infiltração de água no terreno, e consegue evacuar volumes de água infiltrada grandes, diminuindo as pressões de água nos poros. No entanto, não é vantajoso para as videiras que a água infiltrada seja imediatamente escoada, pois as plantas precisam de água durante o seu ciclo de crescimento, e necessitam de retê-la no subsolo para que seja absorvida em períodos de seca. Assim, é aconselhável realizar sistemas de drenagem profunda quando estritamente necessários, isto é, quando a estabilidade do talude, pela sua geometria está claramente em risco. Adicionalmente, a drenagem profunda implica custos bem mais elevados do que sistemas de drenagem superficial.

Os sistemas de drenagem profunda implicam que seja realizado um estudo aprofundado dos terrenos que compõe os taludes, além da instalação de monitorização permanente de piezómetros para observar os efeitos do sistema implementado. Depois de instalado o sistema, o nível freático descerá, reduzindo dessa forma a pressão de água nos poros e o gradiente hidráulico.

Os métodos de drenagem profunda passam por realizar mantos drenantes, valas de drenagem, drenos horizontais, poços verticais ou galerias de drenagem, [29].

5.2.2. VEGETAÇÃO

Foi debatido no capítulo 4 a função que a vegetação tem como elemento estabilizador de encostas e taludes. Na RDD, as encostas que estão plantadas com vinha têm um acréscimo de estabilidade devido ao efeito mecânico das raízes das vinhas, ainda que este seja difícil de quantificar.

As raízes das videiras conseguem penetrar até profundidades elevadas, em busca de água que por vezes é escassa (principalmente nas estações quentes), e conseguem perfurar as diáclases presentes no *bedrock*, aumentando o efeito de ancoragem, ainda que residual.

Recentemente tem-se recorrido ao semeio de enrelvamentos na face e cabeça dos taludes, uma vez que, como se viu anteriormente, a vegetação tem uma função protetora e consegue diminuir os efeitos erosivos provocados pela água, e prepara o solo para épocas em que maquinarias pesadas e pessoas percorrem os taludes para realizar as atividades decorrentes do ciclo de crescimento da vinha.

Além disso já existe maquinaria adaptada à manutenção destes enrelvamentos, o que facilita muito esta tarefa. No entanto, a preocupação com a escassez de água nas estações quentes leva a que a plantação do enrelvamento nos patamares tenha um carácter temporário (entre novembro e o fim da primavera) abrangendo as épocas chuvosas. Além de reduzir fortemente a erosão dos taludes, este enrelvamento, que é uma mistura entre leguminosas e gramíneas, reduz o uso de herbicidas na vinha, facilita o arejamento e a frescura, aumenta a comunidade biótica, reduz a clorose férrica e asfixia radicular quando existe excesso de precipitação, e permite a deposição natural de matéria orgânica quando o enrelvamento é cortado.

5.2.3. OUTRAS FORMAS DE ESTABILIZAÇÃO DAS ENCOSTAS NA RDD

Outras medidas de estabilização passarão por reestruturar a vinha, escolhendo formas de armação mais adequadas ao declive da encosta em questão, ou alterar a inclinação dos taludes de aterro. Contudo, deve ser mencionado que isto comporta custos muito elevados, e a alteração da inclinação dos taludes nem sempre é compatível com a densidade de plantação mínima exigida pela lei.

Outras formas de estabilização das encostas vinhateiras na RDD serão menos adequadas, como a construção de muros de betão armado ou colocação de pregagens ou ancoragens, por se tratar de medidas que implicam um impacto visual extremamente negativo na região, que é Património Mundial da Humanidade, a menos que este tipo de obras sejam muito bem projetadas, com um disfarce exímio das peças estruturais. A colocação de geogrelhas como forma de reforçar o solo também não é aconselhável, pois podem sofrer dano durante os processos decorrentes do cultivo, como aragem; contudo poderão ser usadas, tendo o cuidado de não as colocar nas camadas mais superficiais.

Adicionalmente poderão ser aplicados geossintéticos no corpo do talude, como as geocélulas, que são de aplicação rápida e transporte fácil, e fornecem uma proteção adequada contra a erosão hídrica, ainda que superficial. As geocélulas conferem um confinamento da superfície do solo, e evitam o arrastamento de partículas ao longo do corpo do talude, o que ameniza a erosão superficial em grande escala. Além disso, a sua colocação poderá estar aliada ao semeio de cobertura vegetal, o que faz desta solução um reforço integrado da superfície do talude.

6

CASO DE ESTUDO: DADOS DO PROJETO E APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSIDERADOS NA MODELAÇÃO NUMÉRICA

6.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO: DADOS DO PROJETO, [4]

Como já foi mencionado anteriormente, este estudo pretende responder a algumas questões agrícolas e agrónomas pertinentes, recorrendo à bioengenharia e principalmente, à geotecnia. A estabilidade das encostas da RDD é uma questão importante, pois os fenómenos de instabilidade têm efeitos muito nefastos nas finanças das entidades gestoras das vinhas. A agronomia consegue responder à maioria das questões relacionadas com a vinha, mas a questão da estabilidade das encostas na RDD nunca foi exaustivamente estudada recorrendo a estudos geotécnicos. O solo desta região é altamente complexo e heterogéneo, pelo que é difícil determinar com exatidão os parâmetros geológicos e geotécnicos das camadas superficiais que condicionam os fenómenos de instabilidade.

Os dados e a geometria considerados neste estudo foram adaptados a partir da informação constante num projeto executado pelo GEG – Gabinete de Estruturas e Geotecnia em setembro de 2010, referente à execução de uma estrutura de contenção em escavação, realizada aproximadamente no quilómetro 132+200 da EN 222, e à estabilização da encosta adjacente à referida estrada.

Esse projeto surgiu na sequência do colapso parcial de um muro de suporte de escavação em alvenaria de xisto nesse local, Fig. 6.3., e deslizamento da encosta a montante, Fig. 6.2., que ocorreram no dia 27 de fevereiro de 2010. O terreno e muro são propriedade da Quinta de Melres, situada no concelho de Lamego, distrito de Viseu, que usa a encosta para a plantação da vinha, em patamares largos com dois bardos e com acessibilidades transversais, e que apresentam pontualmente sistemas de drenagem em manilhas de meia cana. Esta encosta tem uma inclinação média de 31 graus (60%), no entanto, em alguns locais esta inclinação poderá ser superior a 55 graus.

Como já foi mencionado no capítulo 2, segundo a legislação atual (2003/2004), é proibido plantar vinha em encostas com declive superior a 50%, com algumas exceções também referidas nesse capítulo. A Quinta de Melres sistematizou em 2003 a vinha em patamares largos de 2 bardos, pelo que se supõe que a lei referida anteriormente ainda não estava em vigor. Ainda assim, deve ser ressaltado que hoje em dia numa encosta com um declive da mesma ordem do da Quinta de Melres, não poderia ser plantada vinha, a menos que esta fosse sistematizada em micropatamares, entre muros de xisto já existentes (mortórios ou com vinha, olival ou amendoal).



Fig. 6.1. – Localização aproximada do muro e encosta, [4]



Fig. 6.2. – Deslizamentos verificados nos socalcos da Quinta de Melres (fevereiro 2010), [4]



Fig. 6.3. – Derrocada parcial do muro (fevereiro 2010), [4]

Com o intuito de melhor conhecer as condições morfológicas e hidrogeológicas dos maciços do local onde ocorreu o fenómeno de instabilidade, foram realizados à data de elaboração do projeto de execução atrás referido, estudos geológicos e geotécnicos, incluindo campanhas de prospeção. Alguns destes estudos, relevantes para o presente trabalho, serão a seguir descritos.

6.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Na Fig. 6.4. está representada uma porção da Carta Geológica de Portugal (folha 10C) onde está inserida a EN 222, no quilómetro onde ocorreu o acidente.



Fig. 6.4. – Fragmento da Carta Geológica de Portugal, [4]

Na carta é possível averiguar que os maciços mais antigos que constituem a zona em estudo são rochas do complexo xisto-grauváquico, também denominado de Supergrupo Dúrico-Beirão.

Este complexo é composto por rochas metassedimentares depositadas em fossos marinhos. Estas rochas são fundamentalmente xistos e metagrauvaques, que são intercalados por quartzitos, metaconglomerados e carbonatos,[38].

6.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Foi realizada uma campanha de prospeção entre os meses de maio e julho de 2010, que incluiu a execução de 14 sondagens mecânicas, a instalação de 2 piezômetros e de 2 inclinômetros, a instalação de marcas e de prismas, e a concretização de dois poços de reconhecimento com vista à recolha de amostras para ensaios laboratoriais. Adicionalmente foram realizados 3 ensaios Lefranc, contudo, não foi obtida a partir deles, informação relevante. Deve ser mencionado que estes ensaios poderiam ter fornecido dados importantes para a caracterização do solo, como o coeficiente de permeabilidade saturada.

As 14 sondagens foram realizadas até profundidades entre os 5,6 e os 12,0 metros. Além disso, foram realizados ensaios SPT.

A Fig. 6.5. é a planta da encosta na qual ocorreram os escorregamentos. Na zona E ocorreu deslizamento e assentamento de uma massa de terreno cujos efeitos são apresentados na Fig. 6.2.

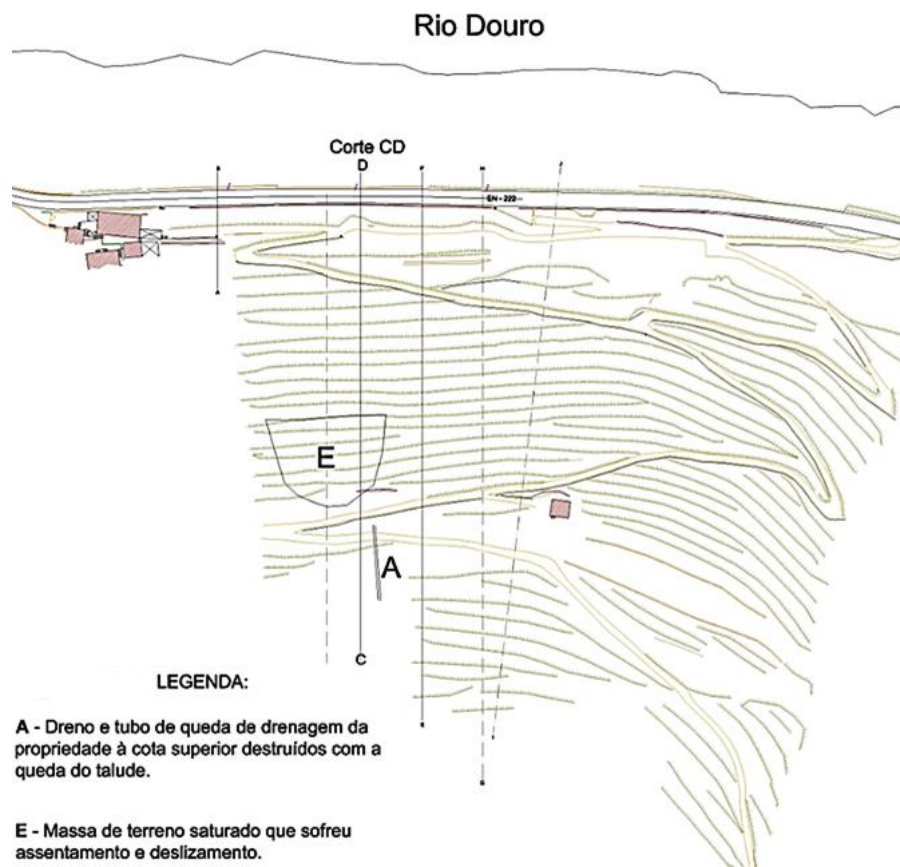


Fig. 6.5. – Planta da encosta com a representação dos locais onde ocorreram os escorregamentos mais graves, [4]

O perfil modelado no *software* Slide, corresponde ao corte CD (Fig. 6.6.), por se entender ser o mais condicionante, devido à sua topografia, e por ter sido neste alinhamento onde ocorreram os deslizamentos mais graves. As sondagens mecânicas permitiram identificar duas unidades principais: aterros de origem antrópica, e o já mencionado complexo xisto-grauváquico, um maciço na sua maioria medianamente alterado a muito alterado, e pontualmente pouco alterado ou decomposto. Adicionalmente o maciço também se encontra fraturado, maioritariamente com falhas próximas e medianamente afastadas.

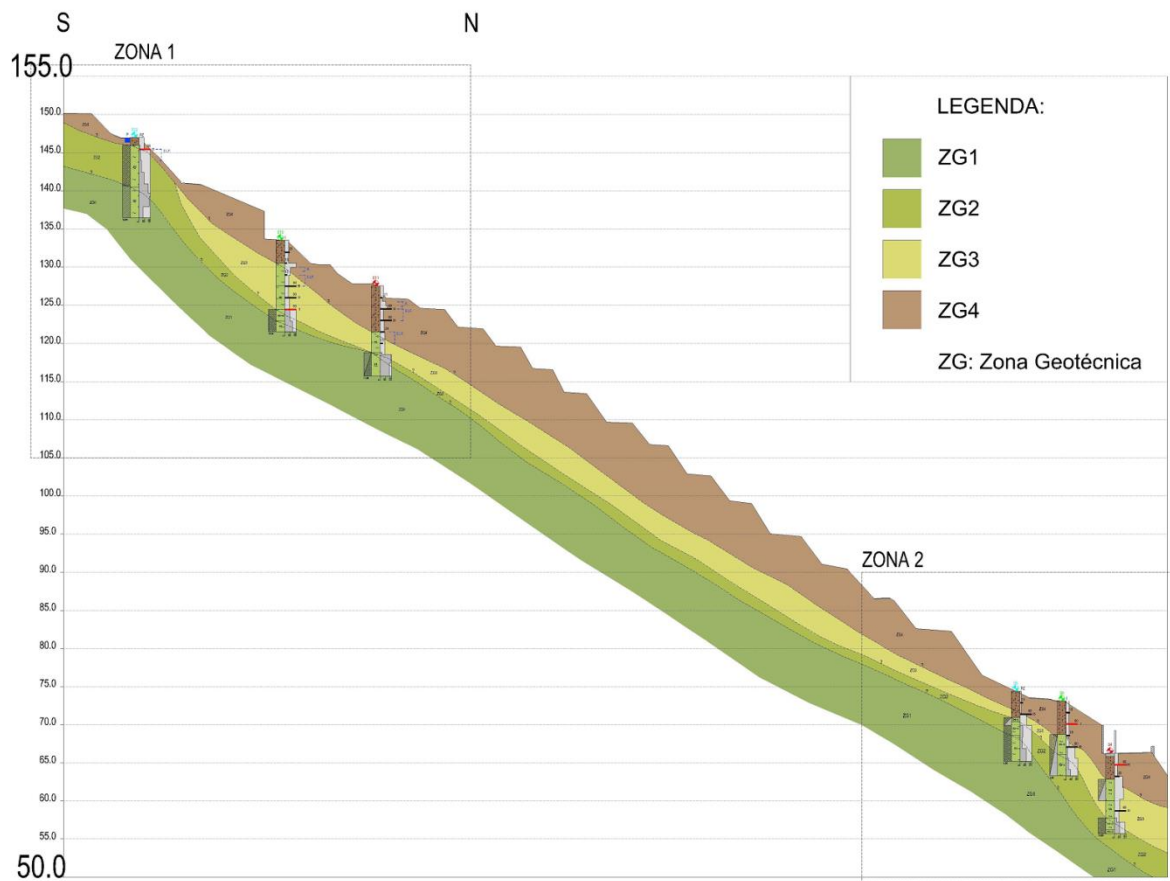


Fig. 6.6. – Perfil transversal da encosta no alinhamento CD, [4]

Os poços de reconhecimento realizados na camada de aterro permitiram fazer uma colheita de amostras remexidas para realizar análises granulométricas, calcular o teor em água, determinar limites de consistência e realizar ensaios de compactação. O Quadro 6.1. mostra um resumo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

A zona geotécnica ZG4 corresponde à camada mais superficial, o aterro, que condiciona os fenómenos de deslizamento na região em estudo. Este é o solo mais difícil de caracterizar, devido à sua granulometria muito extensa, e é composto por um silte areno-argiloso, com terra vegetal e restos de raízes e blocos de xisto dispersos, de dimensão variada.

Quadro 6.1. – Quadro resumo com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, [4]

Designação	Profundidade atingida (m)	Descrição	Colheita de amostras remexidas para:	Ensaios de Laboratório
P1	2,3	Silte areno-argiloso, de cor castanha amarelada, com terra vegetal e restos de raízes, com blocos de xisto dispersos de dimensão variada ($D_{máx}=60$ cm) (Aterro com terra vegetal)	Análises granulométricas, classificação	ASTM GM - Cascalho siltoso com areia
			Teor em água	7,40%
			Limites de consistência	LL - Não Plástico LP - Não Plástico IP - Não Plástico
			Ensaios de compactação	$\gamma_{d,máx} = 2,04$ g/cm ³ $w_{opt.} = 9,9\%$
P2	2,4	Silte areno-argiloso, de cor castanha amarelada, com terra vegetal e restos de raízes, com blocos de xisto dispersos de dimensão variada ($D_{máx}=80$ cm) (Aterro com terra vegetal)	Análises granulométricas, classificação	ASTM ML - Silte cascalhento com areia
			Teor em água	13,70%
			Limites de consistência	LL - Não Plástico LP - Não Plástico IP - Não Plástico
			Ensaios de compactação	$\gamma_{d,máx} = 1,87$ g/cm ³ $w_{opt.} = 12,0\%$

Estes ensaios e sondagens permitiram fazer um zonamento geotécnico do maciço. O zonamento final é apresentado no Quadro 6.2.

Quadro 6.2. – Zonamento das camadas geotécnicas, [4]

Zona	Litologia	RQD	Grau de fracturação	Grau de alteração	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (GPa)	GSI
ZG1	Xistos e Grauvaque, de grão fino, de cor amarelada a cinza	>50%	F4-5, pontualmente F3	W3-2	200 a 250	35	6	35 a 40
ZG2	Xistos e Grauvaque, de grão fino	20 a 90%	F4-5, pontualmente F3	W3-4	150 a 200	30 a 35	3,5	30
ZG3	Xistos e Grauvaque, de grão fino	<40%	F4-5	W4-5	100 a 150	25 a 30	1,4	20
ZG4	Aterro: silte areno-argiloso, de cor castanha, com terra vegetal e fragmentos de xisto dispersos	-	-	-	3 a 24	28 a 35	-	-

As zonas geotécnicas ZG1 a ZG3 são litologicamente caracterizadas pelo complexo xisto-grauváquico, com graus de alterações compreendidos entre o W3-2 a W4-5, com um melhoramento das propriedades em profundidade. Por esta razão estas camadas são consideradas rocha, e o critério de rotura considerado na modelação foi o de Hoek-Brown Generalizado, como se poderá ver mais adiante. As propriedades dos materiais destas camadas foram estimadas com recurso aos ensaios SPT realizados, e podem ser consultadas no Quadro 6.3.

Quadro 6.3. – Quadro resumo das propriedades geotécnicas das camadas ZG0 a ZG3

Zona	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	γ (kN/m ³)
ZG0	225	35	19
ZG1	225	35	19
ZG2	175	33	19
ZG3	125	28	19

No âmbito do projeto foram também realizados ensaios de corte direto, para diferentes teores em água, nos solos da camada ZG4 com vista a avaliar a dependência da resistência ao corte do solo em função do seu teor em água. As propriedades desta camada foram consideradas baseando-se nestes mesmos ensaios, ainda que seja discutível a fidedignidade desses resultados, uma vez que a granulometria do material é muito extensa, e as amostras recolhidas poderiam não ser representativas disso.

O Quadro 6.4. apresenta os parâmetros resultantes dos ensaios de corte direto, que serão aplicados e comentados no próximo capítulo deste trabalho.

Quadro 6.4. – Propriedades geotécnicas da camada ZG4

w (%)	Análise não drenada		Análise drenada	
	s_u (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	c' (kPa)	
12	67	35,0	24	
22	58	31,5	21	
25	46	28,5	13	
27	35	27,8	3	

6.2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes tornou-se numa ferramenta analítica comum para estimar o fator de segurança de taludes naturais e feitos pelo Homem. Os métodos bidimensionais de equilíbrio limite de fatias verticais têm como base princípios da estática, isto é, equilíbrio estático de forças e/ou momentos, sem entrar em consideração com os deslocamentos na massa de solo.

Ao realizar análises tomando os solos como saturados, geralmente são usados parâmetros de resistência de corte efetivos, como c' e ϕ' , e a contribuição das pressões negativas na água dos poros acima do nível freático é normalmente ignorada, sendo estas definidas como nulas. Isto acontece porque é difícil medir as sucções e incorporá-las na análise de estabilidade de taludes. É claro que poderá ser razoável ignorar as sucções em várias situações onde grande parte da superfície de deslizamento esteja abaixo do nível freático. Contudo, em situações em que o referido anteriormente não acontece, ou em situações em que a preocupação está sobre a ocorrência de deslizamentos em camadas mais superficiais, as sucções não podem ser ignoradas.

Recentemente têm sido desenvolvidas ferramentas que permitem entrar com a contribuição das sucções na resistência ao corte. Este tipo de análises é uma extensão das análises de equilíbrio limite convencionais, [17]. O *software* utilizado, Slide 6.0 da Rocscience, é um dos programas mais detalhados disponível para a análise de estabilidade de taludes, e combina a estabilidade com uma análise em condições transientes. Também possui ferramentas para realizar análises de sensibilidade e probabilísticas, para determinar que parâmetros têm maior influência na estabilidade.

6.2.1. TIPO DE MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE UTILIZADO

Os métodos de equilíbrio limite mais conhecidos são o de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer, Janbu simplificado e generalizado, métodos de equilíbrio de forças como o Corps of Engineers, e o Morgenstern-Price.

As diferenças entre estes métodos são várias, muito devido à falta de uniformidade na formulação das equações dos fatores de segurança, à ambiguidade relativamente às forças entre fatias e as limitações desconhecidas impostas por superfícies de rotura não circulares.

A escolha do tipo de superfície de rotura a ser considerada depende do tipo de maciço a analisar. Maciços homogêneos apresentam tendencialmente superfícies de rotura quase circulares, enquanto maciços heterogêneos e com descontinuidades geológicas que não permitem que a superfície de rotura ocorra em maior profundidade (como a presença do *bedrock* ou camadas muito mais resistentes próximas da superfície), apresentam superfícies de rotura compostas, isto é, com partes circulares e partes lineares (Fredlund, 1975), [39]. O caso estudado enquadra-se no segundo caso, pelo que o tipo de superfície de rotura considerada foi não circular. Além disso, o método de pesquisa do fator de segurança mínimo global das superfícies de escorregamento foi o *Auto Refine Search*. Este método usa uma abordagem iterativa para que os resultados de uma iteração sejam usados para limitar a área de análise do talude na próxima iteração. É um algoritmo simples mas eficaz e em diversos casos este método consegue localizar superfícies com fatores de segurança inferiores relativamente aos restantes métodos existentes no *software*, [40].

Uma vez que este tipo de análises faz-se hoje em dia com recurso ao cálculo automático, métodos como o de Fellenius deixam de fazer sentido de serem aplicados em projeto, ainda que apresentem resultados do lado da segurança. Existem métodos mais rigorosos que se enquadram na filosofia geral do método das fatias, como o de Spencer, Morgenstern-Price e GLE (General Limit Equilibrium), em que é satisfeito o equilíbrio de forças e momentos, e que ainda possuem a vantagem de considerar superfícies de deslizamento não circulares.

6.2.1.1. Métodos Rigorosos

Métodos como o de Morgenstern-Price e GLE são de tal forma complexos nos seus processos iterativos que exigem aplicação computacional. Ambos assumem que a relação entre as componentes tangencial e normal das forças de interação são do tipo da expressão 6.1.

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (6.1.)$$

Onde:

- X , é a componente tangencial das forças de interação entre fatias;
- E , é a componente normal das forças de interação entre fatias;

- $f(x)$, é uma função de forma arbitrada no âmbito da aplicação do método;
- λ , é um fator adimensional, a calcular ,[41].

Na Fig. 6.7. é possível ver as forças atuantes numa fatia numa massa de solo prestes a deslizar, com uma superfície de deslizamento composta, usando o método GLE.

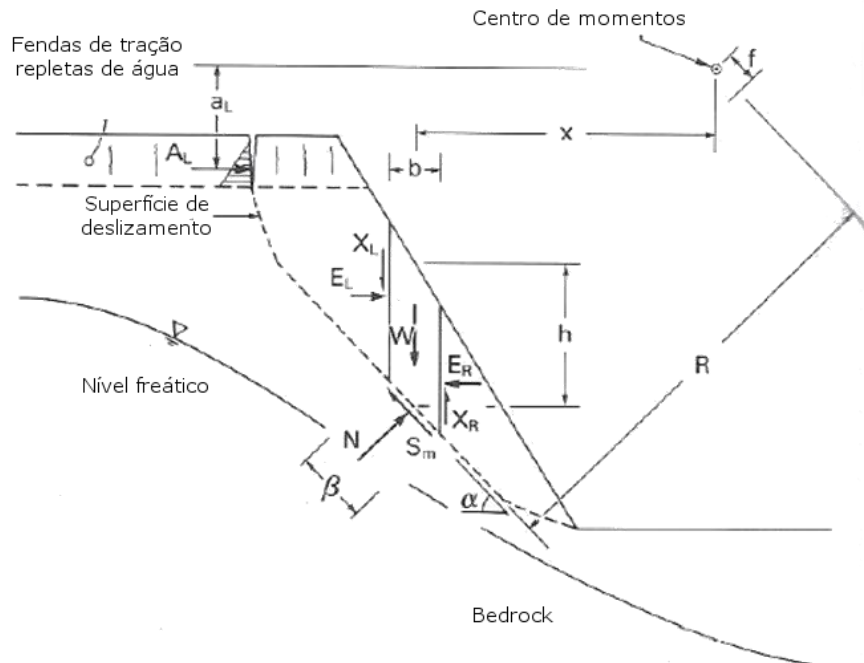


Fig. 6.7. – Forças atuantes numa fatia de uma massa de solo prestes a deslizar, com superfície de deslizamento composta, [17]

Onde:

- W , é o peso total da fatia de largura b e altura h ;
- N , é a força normal total na base da fatia;
- S_m , é a força de corte mobilizada na base de cada fatia;
- E , são as forças normais de interação entre fatias (E_R do lado direito e E_L do lado esquerdo);
- X , são as forças tangenciais de interação entre fatias (X_R do lado direito e X_L do lado esquerdo);
- R , é o raio de uma superfície circular ou do braço do momento associado à força de corte mobilizada, S_m , para qualquer forma de superfície de deslizamento;
- f , é o desfaseamento perpendicular da força normal do centro de rotação ou do centro de momentos;
- x , é a distância horizontal do centro geométrico de cada fatia ao centro de rotação ou centro de momentos;
- h , é a distância vertical do centro da base de cada fatia até à zona mais elevada na geometria (normalmente a superfície do talude);
- a , é a distância perpendicular entre a resultante das forças externas da água ao centro de rotação ou ao centro de momentos (a_R do lado direito e a_L do lado esquerdo);
- A , é a resultante das forças externas da água (A_R do lado direito e A_L do lado esquerdo);
- α , é o ângulo entre a tangente ao centro da base da fatia e a horizontal;

- β , é o comprimento da base inclinada de uma fatia.

O método de Spencer é um caso particular dos métodos de Morgenstern-Price e GLE, pois assume que a função $f(x)$ é constante, isto é, as forças de interação entre fatias têm inclinação constante igual ao valor λ .

A diferença entre o método de Morgenstern-Price e o GLE é que no último, a linha de aplicação das forças de interação entre fatias (linha de impulso) é determinada e fechada na última fatia, [42]. No entanto, no *software* usado na modelação numérica neste trabalho, Slide 6.0, a aplicação de ambos os métodos é essencialmente equivalente, [8]. Foram estes últimos os métodos escolhidos na análise do equilíbrio limite, e foi eleita uma função $f(x)$ meio-seno.

O método GLE calcula dois fatores de segurança: um fator de segurança relacionado com o equilíbrio de forças, F_f , e outro relacionado com o equilíbrio de momentos, F_m . Esses fatores são dados pelas expressões gerais 6.2. e 6.3., respetivamente.

$$F_f = \frac{\Sigma \left[c' \cdot \beta \cdot \cos(\alpha) + \left\{ N - u_w \cdot \beta \frac{\tan(\phi^b)}{\tan(\phi')} - u_a \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{\tan(\phi^b)}{\tan(\phi')} \right) \right\} \cdot \tan(\phi') \cdot \cos(\alpha) \right]}{A_L + \Sigma N \cdot \sin(\alpha)} \quad (6.2.)$$

$$F_m = \frac{\Sigma \left[c' \beta R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan(\phi^b)}{\tan(\phi')} - u_a \beta \left(1 - \frac{\tan(\phi^b)}{\tan(\phi')} \right) \right\} R \tan(\phi') \right]}{A_L \cdot a_L + \Sigma W_x - \Sigma N_f} \quad (6.3.)$$

6.2.2. CRITÉRIOS DE ROTURA

Na zona geotécnica ZG4, com características de um solo, foi considerado o critério de rotura Mohr-Coulomb nas análises drenadas; e um modelo de solo não drenado, em que o ângulo de atrito ϕ' é automaticamente definido como zero, nas análises não drenadas.

As restantes zonas geotécnicas são caracterizadas como rocha, e usou-se o critério de rotura de Hoek-Brown Generalizado. Deve ser mencionado que esta última escolha não tem muita influência sobre o resultado final da análise, pois é a camada ZG4 a condicionante da estabilidade. Inicialmente foram modelados casos em que apenas se alterou o critério de rotura das zonas ZG0 a ZG3, considerando como critério de rotura o de Mohr-Coulomb, e como esperado, os resultados foram semelhantes.

6.2.2.1. Critério de Rotura Mohr-Coulomb

O critério de rotura Mohr-Coulomb aplicado à mecânica de solos diz que um solo entra em rotura num ponto quando num par de facetas ou planos que passam nesse ponto é atingida uma dada relação entre a componente normal e a componente tangencial, [18]. A tensão tangencial de rotura é dada pela expressão 6.4.

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \cdot \tan(\phi') \quad (6.4.)$$

Onde:

- τ_f , é a tensão tangencial de rotura;

- c' , é a coesão efetiva;
- σ'_{fs} , é a tensão normal efetiva de rotura;
- ϕ' , é o ângulo de atrito efetivo do solo.

6.2.2.2. Critério de Rotura Hoek-Brown Generalizado, [43]

O critério de rotura Hoek-Brown Generalizado é descrito pela expressão 6.5.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_s}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (6.5.)$$

Onde:

- m_b , é um valor reduzido da constante do material m_i e é obtido através da expressão 6.6.;
- s e α , são constantes do maciço rochoso obtidas através das expressões 6.7. e 6.8.;
- σ_{ci} , é a resistência à compressão uniaxial do material intacto;
- σ'_1 e σ'_3 , são as tensões efetivas principais no momento da rotura.

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}\right)} \quad (6.6.)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}\right)} \quad (6.7.)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (6.8.)$$

Onde:

- GSI , é o Geological Strength Index, ou Índice Geológico de Resistência;
- m_i , é uma constante da rocha intacta;
- D , é um fator de perturbação, que depende da perturbação a que a rocha esteve submetida, seja por explosão ou alívio de tensão.

Foram usados os GSI das várias camadas rochosas determinados em projeto, e admitiu-se um σ_{ci} intermédio entre a resistência à compressão uniaxial de um grauvaque e de um xisto intactos.

6.2.3. OUTROS PARÂMETROS ASSUMIDOS

Depois de consultar a bibliografia, considerou-se na análise de estabilidade que um valor de ϕ^b (ângulo que indica a taxa de aumento da resistência tangencial relativo à sucção mátrica) igual a um terço do ângulo de atrito efetivo é um valor aproximado aceitável.

Na modelação consideraram-se três coeficientes de condutividade hidráulica na condição saturada distintos para a camada ZG4, detalhados no capítulo seguinte. Em estudos anteriores [5], o coeficiente de permeabilidade na condição saturada obtido a partir do ensaio de permeabilidade com permeâmetro de parede flexível (ordem de grandeza 10^{-8} m/s) é discutível. As razões para um coeficiente desta

ordem de grandeza podem ser muitas, como a falta de representatividade da amostra, mas não serão aqui avaliadas. A análise granulométrica realizada nas amostras remexidas obtidas no poço 2 (contíguo ao corte CD) mostra os resultados apresentados no Quadro 6.5.

Quadro 6.5. – Parcelas dos diferentes compostos do solo recolhido no Poço 2

	Poço 2
Calhau	7,50%
Cascalho	20,50%
Areia	21,50%
Silte e argila	50,50%

Tendo em conta a informação do Quadro 6.5. e a classificação das amostras de solo e respetiva descrição no Quadro 6.1., conclui-se que a presença de blocos de xisto de grande dimensão, raízes e terra vegetal, e ainda uma percentagem elevada de grossos e areia na composição granulométrica (49,5%), implica uma permeabilidade superior à obtida no ensaio de permeabilidade na camada ZG4.

No que diz respeito à influência da vegetação, o *software* usado (Slide 6.0) não simula o efeito radicular na estabilidade de taludes. Contudo, existem outros *softwares* como o CHASM, [44], que além da análise de infiltração também inclui a influência da vegetação na estabilidade. De forma alternativa, no Slide poder-se-ia realizar a simulação do efeito da vegetação na estabilidade introduzindo uma coesão aparente numa camada superficial com a espessura da profundidade das raízes e impondo uma dada permeabilidade a essa mesma camada. É claro que isto não é linear, pois não se sabe determinar com exatidão a influência que a vegetação tem no coeficiente de permeabilidade do solo ou na taxa de evapotranspiração e infiltração, pelo que este tipo de análises são sempre aproximações.

Por último, a malha usada na modelação foi composta por 2541 elementos triangulares de três nós, com 1336 graus de liberdade.

6.3. INFILTRAÇÕES IMPOSTAS AO MODELO

Os registos de precipitação fornecidos pela Quinta do Noval têm como registo mais antigo o dia 8 de julho de 2008. Inicialmente foram analisadas as precipitações diárias desde essa data até ao dia em que se iniciou o estudo estatístico (março 2013) com base nesses dados. Apesar de uma amostra de dados inferior a cinco anos, foi possível tirar algumas conclusões.

Comparando as precipitações médias mensais medidas na Quinta do Noval e as precipitações médias mensais medidas em Vila Real (período de 1981 a 2010, fonte: Instituto Português do Mar e da Atmosfera), Fig. 6.8. conclui-se que apesar da proximidade geográfica, ambas as estações possuem registos díspares, pelo que o investimento por parte das quintas do Douro em estações meteorológicas fará todo o sentido, pois a RDD insere-se numa região singular, com um microclima único. Além disso, a manutenção de todas as estações meteorológicas nacionais constantes no registo do SNIRH está suspensa desde março de 2010, pelo que os dados não são fiáveis, o que salienta ainda mais a necessidade desse investimento por parte das entidades gestoras das quintas durienses.

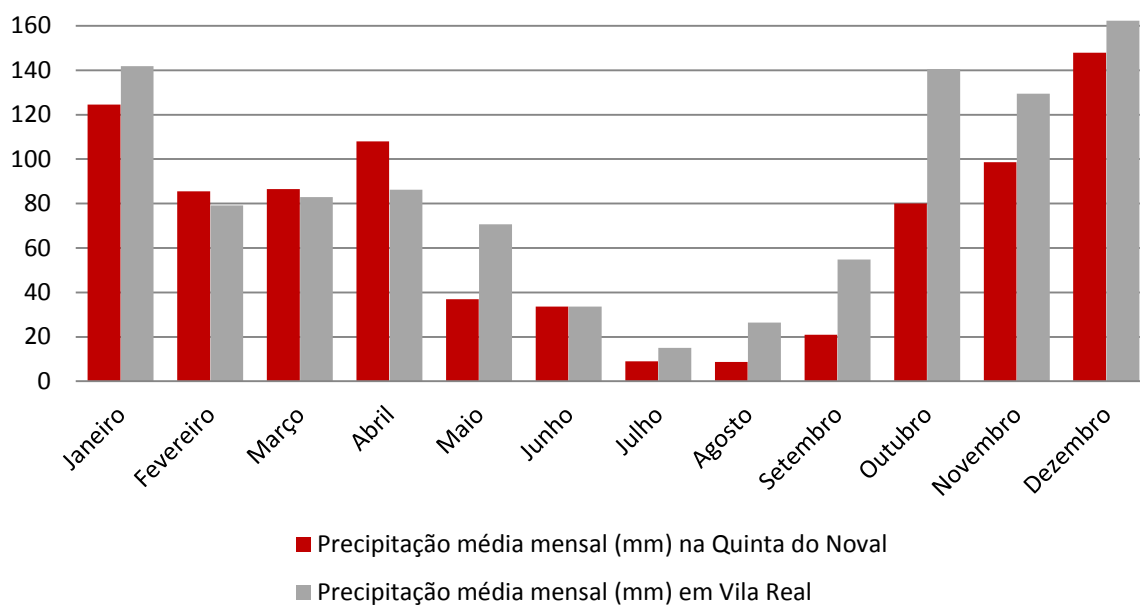


Fig. 6.8. – Precipitação média mensal registada na Quinta do Noval e em Vila Real

Depois de avaliar com detalhe as precipitações que ocorreram na Quinta do Noval antes do dia do escorregamento e extrapolando esses dados para a região da Quinta de Melres, conclui-se que nos meses de fevereiro e janeiro de 2010, e nos meses de outubro a dezembro de 2009, as precipitações registadas foram as máximas que se sucederam nesses meses no período de quase cinco anos de registos. Como se pode verificar no Quadro 6.6., nos meses anteriores ao acidente da encosta estudada e no próprio mês da ocorrência, a precipitação real foi substancialmente superior à média daquela zona, com especial atenção para os meses de dezembro e fevereiro.

Quadro 6.6. – Precipitações no mês da ocorrência e nos meses anteriores

	2009			2010	
	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
Precipitação mensal (mm)	130,2	151,4	304,6	153,6	202
Precipitação média mensal (mm)	80	98,6	147,8	124,6	85,4

No capítulo 4 ficou clara a complexidade da determinação da infiltração real num solo. Devido à falta de informação que possibilite uma avaliação correta da infiltração durante períodos de precipitação, e também da perda de humidade de solo devido à evaporação, considerou-se que todo o volume precipitado é infiltrado. É claro que isto não é verdade, e embora no início de um evento de precipitação a parcela infiltrada possa ter um valor semelhante à parcela precipitada, ao longo do tempo, e à medida que o solo aumenta o seu grau de saturação, a taxa de infiltração diminuiu. Adicionalmente, não há dados suficientes para estimar o processo inverso, isto é, a diminuição do teor em água do solo por processos de evaporação.

O modelo de infiltração introduzido no *software* é apresentado na Fig. 6.9. e tem em conta as precipitações horárias durante os três meses considerados, com início no dia 1 de dezembro de 2009 às 10 horas.

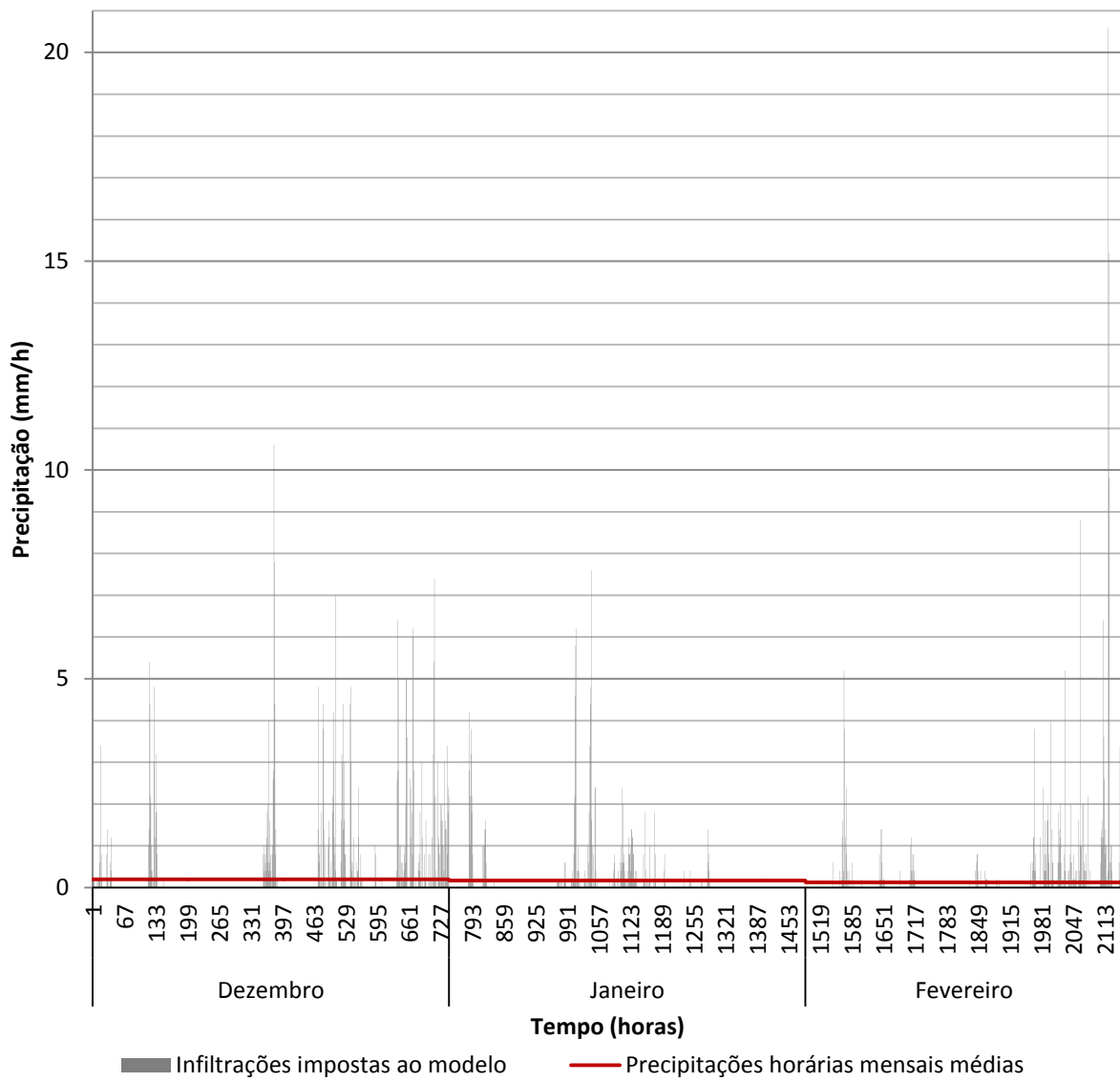


Fig. 6.9. – Infiltrações horárias impostas ao modelo

7

CASO DE ESTUDO: MODELAÇÃO
NUMÉRICA E RESULTADOS

7.1. SELEÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO

Numa primeira análise foi necessário definir uma curva de sucção para a camada ZG4 (camada de aterro) que se aproximasse das características reais do solo. Para isso, foram calculados três modelos numéricos, com a mesma geometria, alterando entre eles a curva característica do solo e o coeficiente de condutividade hidráulica saturada. Os três modelos foram os seguintes:

- Um modelo simples, que consta na biblioteca do *software*, com um coeficiente de permeabilidade saturado típico de uma areia ($k_s=8,25 \cdot 10^{-5}$ m/s) a que se chamou modelo A;
- Um modelo adaptado de van Genuchten, com um coeficiente de permeabilidade saturado típico de uma marga arenosa ($k_s=1,25 \cdot 10^{-5}$ m/s), a que se chamou modelo B;
- Um modelo adaptado de van Genuchten, com um coeficiente de permeabilidade saturado típico de uma marga siltosa ($k_s=1,25 \cdot 10^{-6}$ m/s), a que se chamou modelo C.

As curvas de Sucção Mátrica vs. Teor em Água, e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade estão representadas nas Fig. 7.1., Fig. 7.2., e Fig. 7.3., para cada modelo.

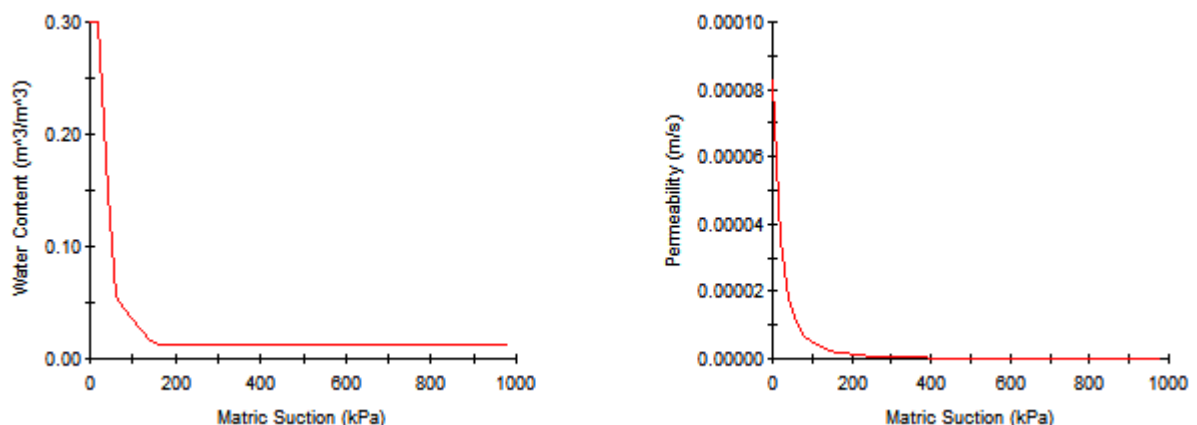


Fig. 7.1. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo A

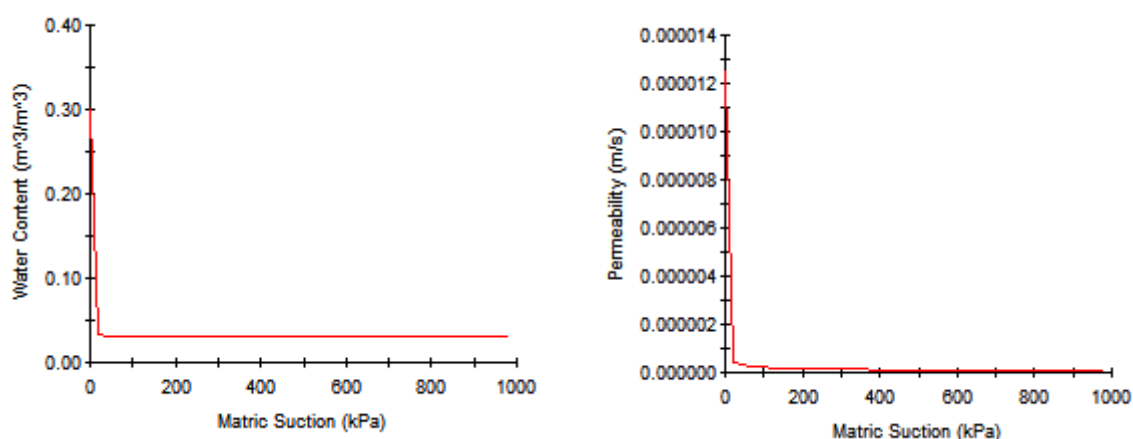


Fig. 7.2. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo B

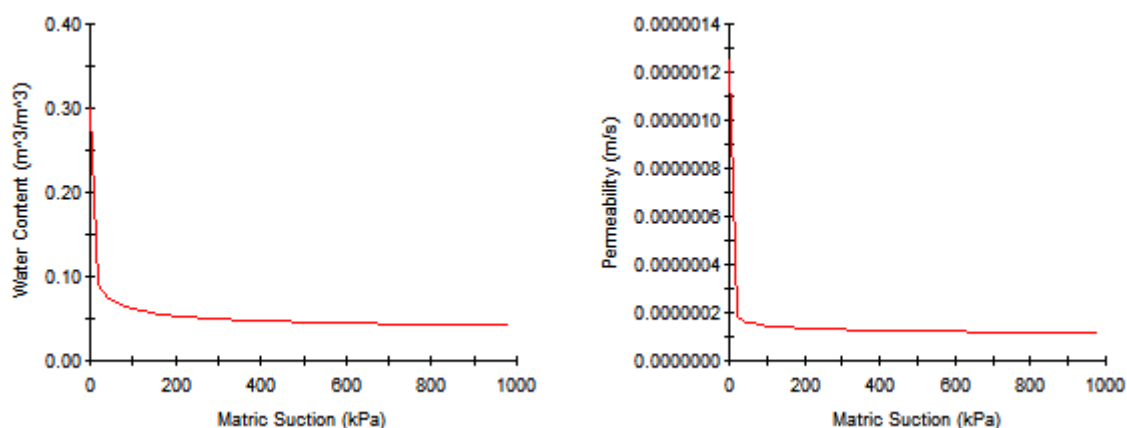


Fig. 7.3. – Sucção Mátrica vs. Teor em Água e Sucção Mátrica vs. Permeabilidade do Modelo C

Neste primeiro estudo foi considerado um nível freático inicial a 10 metros de profundidade. O tipo de análise considerada foi a análise drenada, em tensões efetivas, com uma coesão efetiva igual a 24 kPa, um ângulo de atrito igual a 35 graus, e um ϕ^b igual a 11,7 graus.

7.1.1. SUCCÃO E FATOR DE SEGURANÇA AO LONGO DO TEMPO

Como seria de esperar, numa fase inicial antes de se dar início à infiltração, o fator de segurança é igual nos três modelos, Fig. 7.4.

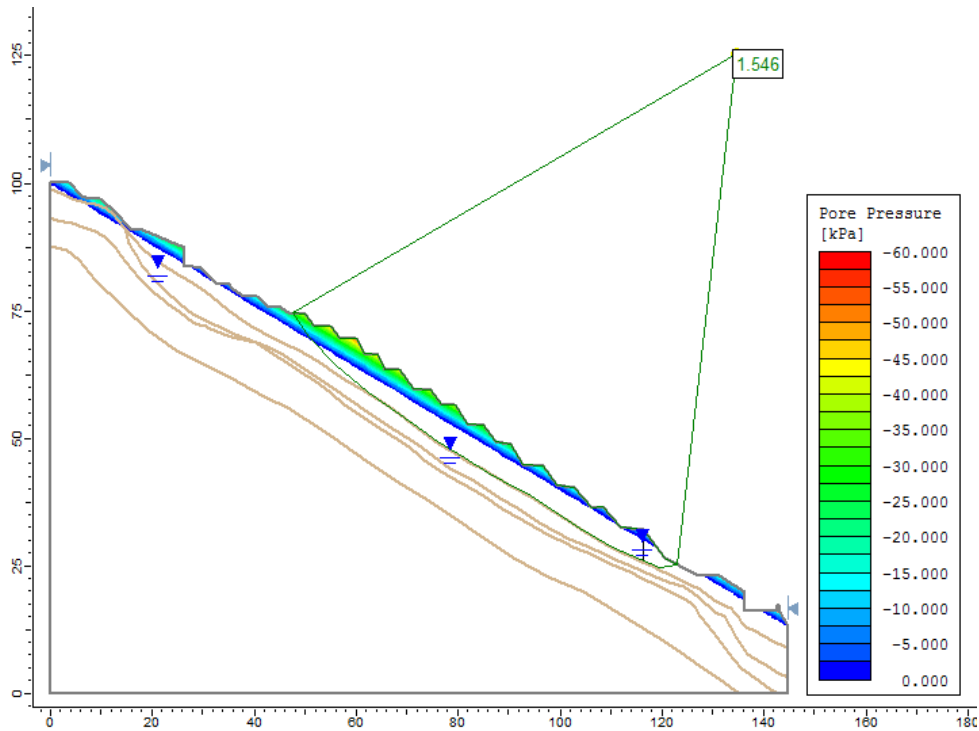


Fig. 7.4. – Sucção na camada superficial nos três modelos e fator de segurança mínimo nos três modelos antes da infiltração

No entanto, à medida que a água se infiltra e ocorre um avanço da frente de humedecimento, regista-se uma queda na sucção na camada geotécnica ZG4, e conseqüentemente, os fatores de segurança começam a decrescer. Deve ser mencionado que se optou por apresentar com cor apenas as pressões negativas na água dos poros, pois é sobre elas que a análise incide, permitindo desta forma ter uma representação gráfica mais clara e direta.

7.1.1.1. Modelo A

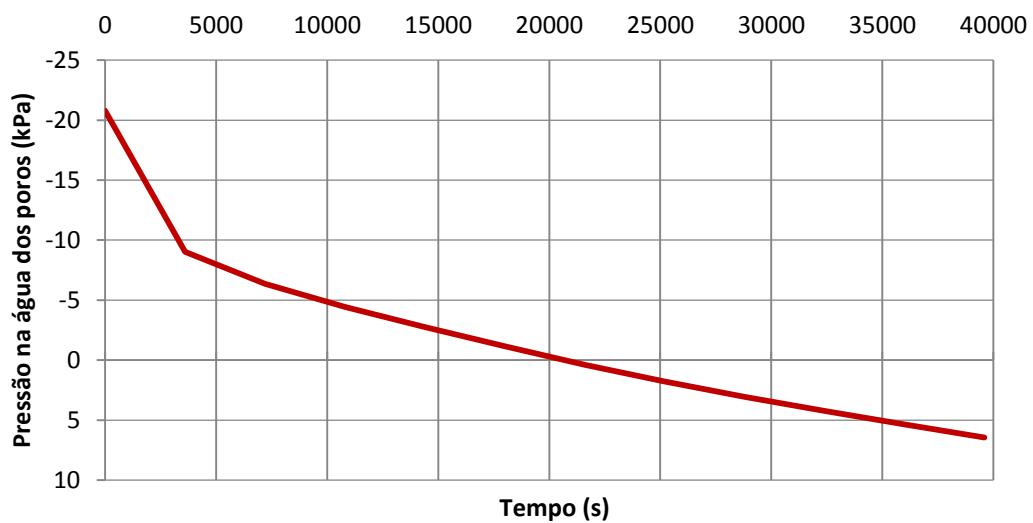


Fig. 7.5. – Sucção ao longo do tempo no Modelo A

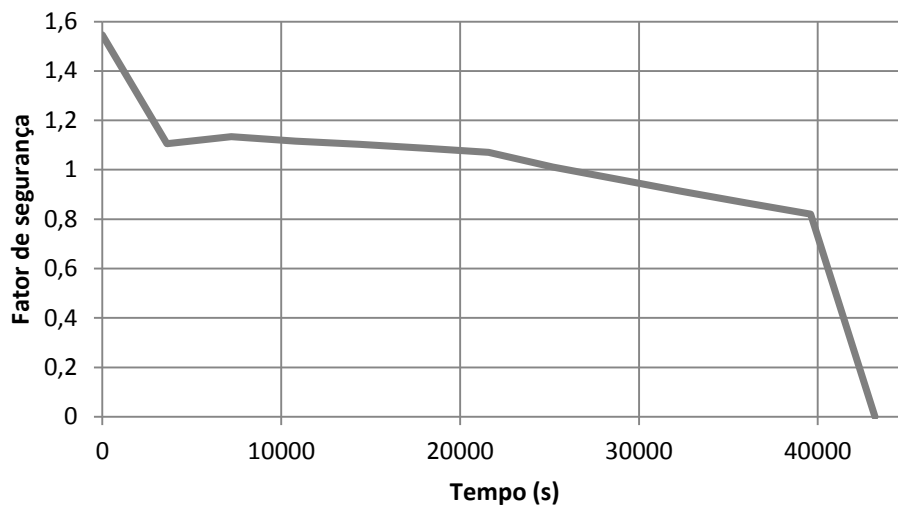


Fig. 7.6. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo A

Como pode ser observado na Fig. 7.5. e Fig. 7.6., o fator de segurança mínimo começa a decair e ao fim de 21600 segundos de infiltração (6 horas) atinge valores próximos da insegurança, isto é, a rotura ao longo da superfície de deslizamento representada na Fig. 7.7 é iminente.

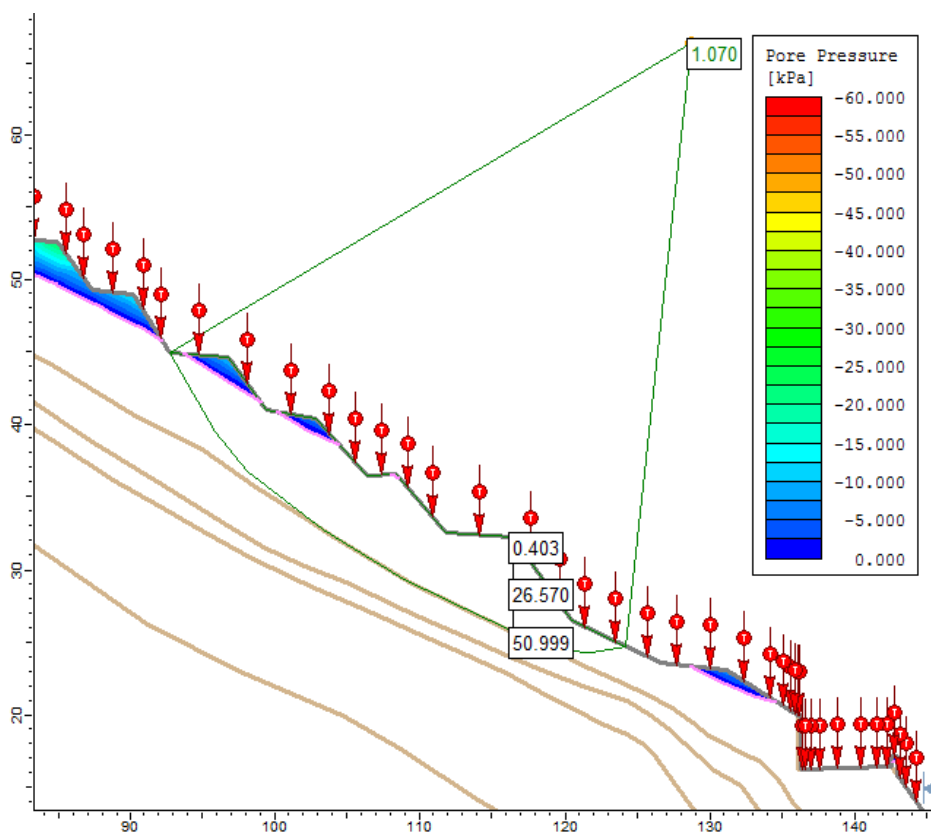


Fig. 7.7. – Superfície de deslizamento imediatamente após o instante 21600s e pressões na água dos poros positivas

Isto acontece porque à medida que a água se infiltra o grau de saturação do solo aumenta, reduzindo as pressões negativas nos poros. Essas pressões negativas que imprimiam uma coesão aparente no solo desvanecem lentamente, dando origem a fenómenos de instabilidade. Na Fig. 7.7. é visível a ausência de cor na maioria da massa de terreno prestes a escorregar, o que significa que as pressões negativas já se dissiparam ao fim de 6 horas, pelo que a rotura poderá estar iminente. Também é possível observar nessa figura que as pressões da água aumentam com a profundidade, como é esperado.

7.1.1.2. Modelo B

Foi realizado o mesmo tipo de análise com o Modelo B. A Fig. 7.8. e Fig. 7.9. apresentam a evolução das sucções e do fator de segurança mínimo ao longo do tempo. De forma semelhante ao modelo anterior, no modelo B regista-se uma diminuição de resistência abrupta (na ordem dos 29%) assim que se dá início à infiltração. Depois, o fator de segurança estabiliza, mas acompanhado de um decréscimo lento das sucções, até que quando as sucções se desvanecem, entre o instante 2 semanas e 2 semanas e um dia, ocorre rotura brusca do solo na região representada na Fig. 7.10. Nesta última figura também se verifica que as sucções diminuem com a profundidade.

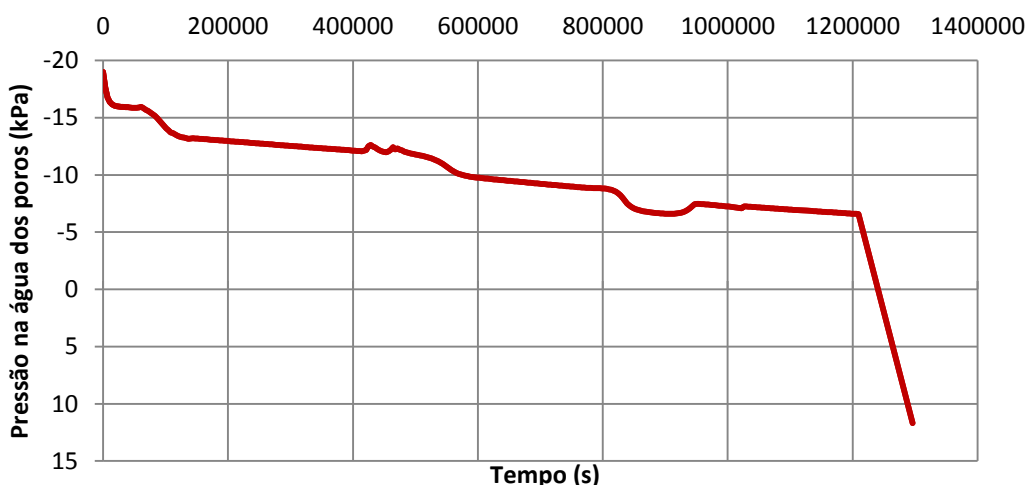


Fig. 7.8. – Sucção ao longo do tempo no Modelo B

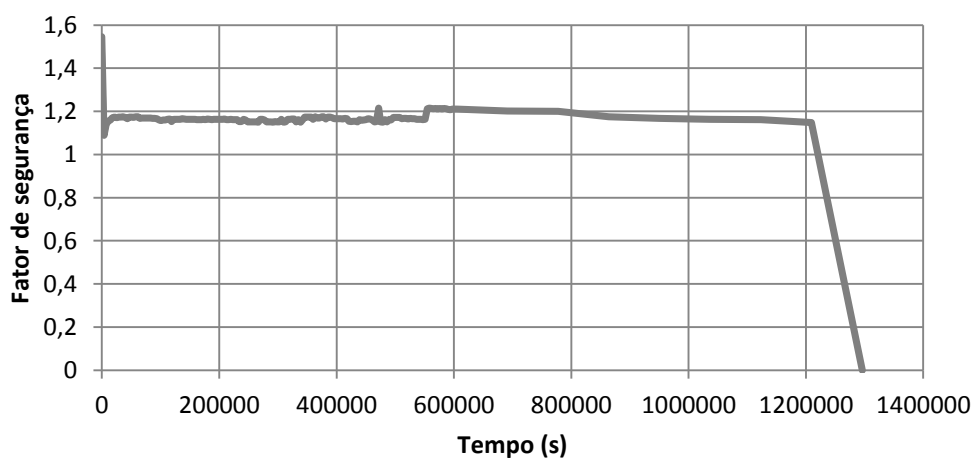


Fig. 7.9. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo B

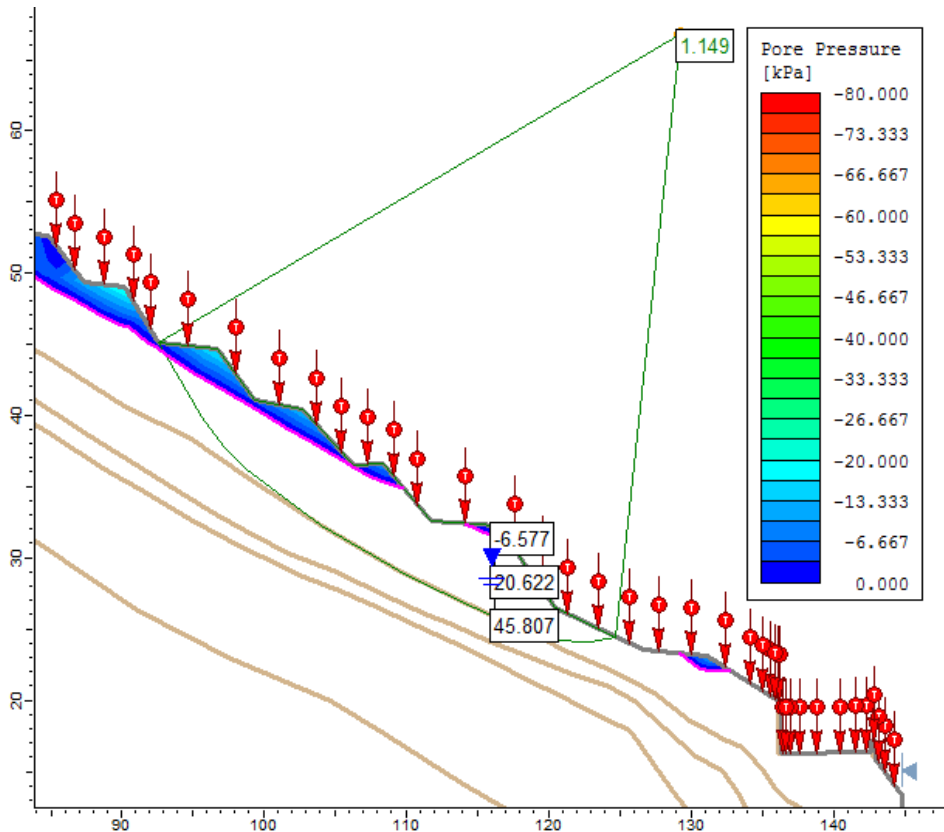


Fig. 7.10. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 2 semanas

7.1.1.3. Modelo C

No modelo C ainda é mais notável a coesão aparente resultante das sucções, pois as características hidráulicas impostas ainda lhe conferem uma menor permeabilidade. Assim, a infiltração ocorre a um ritmo mais lento, e conseqüentemente as pressões negativas na água dos poros também diminuem ao mesmo ritmo. Deve ser mencionado que, ainda que as sucções baixem lentamente ao longo do tempo, o fator de segurança permanece quase inalterado. No entanto, mal estas se desvanecem, o fator de segurança reduz bruscamente e a rotura ocorre entre os 2 meses e 2 semanas e os 2 meses e 3 semanas.

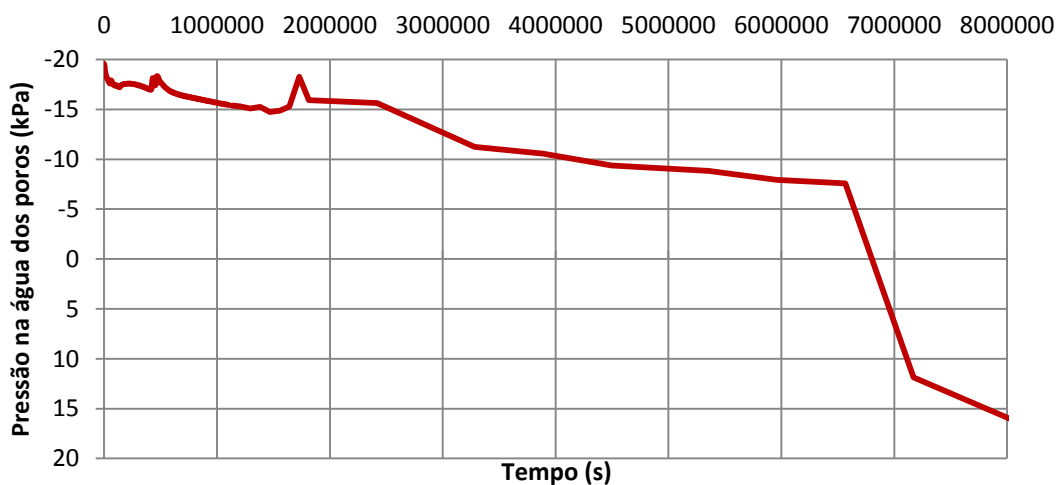


Fig. 7.11. – Sucção ao longo do tempo no Modelo C

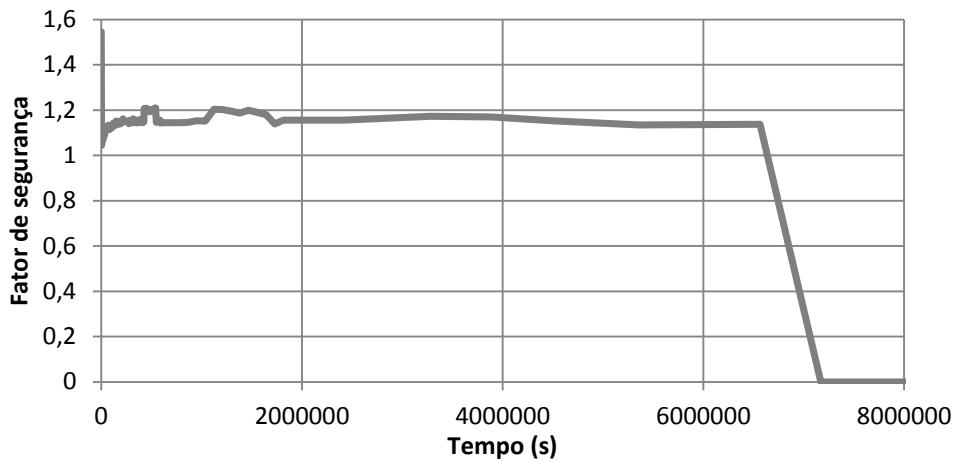


Fig. 7.12. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo C

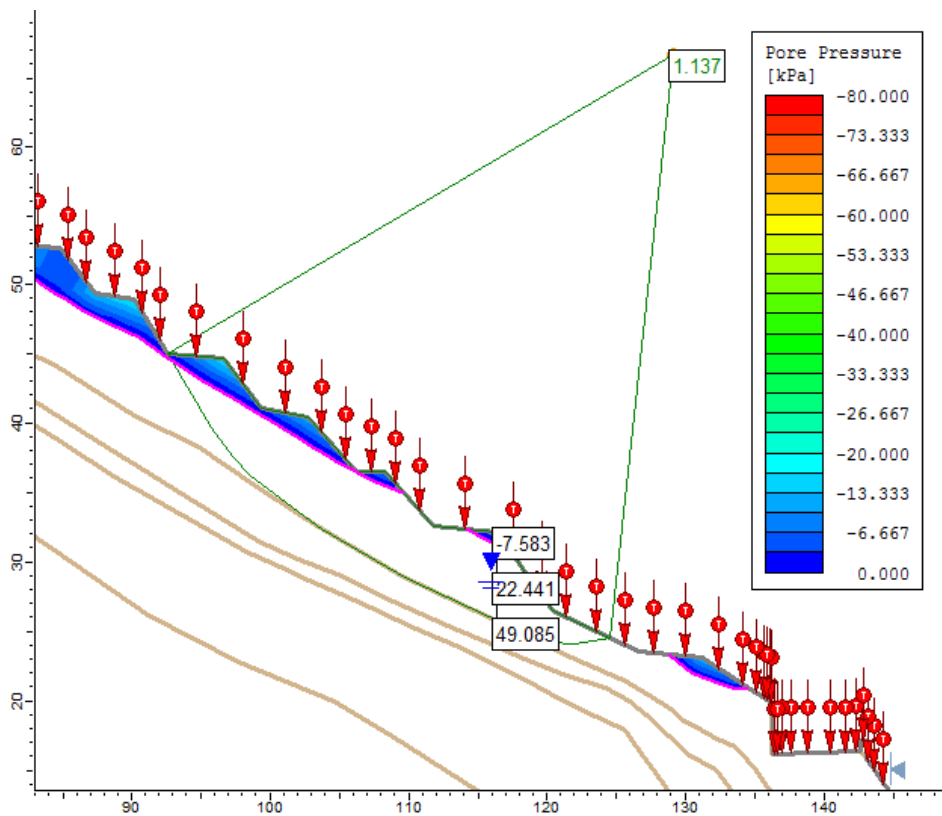


Fig. 7.13. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 2 meses e 2 semanas

7.1.2. CONSIDERAÇÕES E MODELO SELECIONADO

Depois da análise dos três modelos, ficou claro que é importante determinar com exatidão a curva característica do solo e o seu coeficiente de permeabilidade saturado, pois é visível que solos com características hidráulicas distintas apresentam comportamentos também eles muito distintos. Solos mais permeáveis têm um menor incremento de resistência devido à sucção, e perdem essa coesão aparente mais rápido, enquanto solos pouco permeáveis possuem sucções mais elevadas que se dissipam lentamente.

Deve ser referido que não é necessário que as sucções diminuam até valores nulos para que ocorra escorregamento do talude. O modelo de Green e Ampt, já mencionado anteriormente prevê a existência de uma frente de humedecimento e supõe que existe uma pressão negativa constante, ainda que pequena, mesmo acima da frente de humedecimento. Quando um talude é exposto a precipitação prolongada, a frente de humedecimento avança no sentido descendente, causando um decréscimo nas sucções do solo à medida que avança. Quando se observam deslizamentos que ocorreram segundo o fenómeno anteriormente mencionado, nota-se que a massa de solo que deslizou está muito húmida, apresentando por vezes valores de teores em água esperados a 15 ou mais metros de profundidade [45]. Assim, conclui-se que a frente de humedecimento penetrou até uma profundidade suficiente para reduzir a sucção para um valor crítico, ocorrendo dessa forma a rotura do talude.

O ponto fulcral seguinte seria tentar perceber a velocidade com que se propaga essa frente de humedecimento. Para isso, é de vital importância saber o coeficiente de condutividade hidráulica do solo, que neste trabalho foi admitido.

Observando os resultados obtidos anteriormente, notou-se que solos menos permeáveis apresentam roturas mais bruscas do que solos mais permeáveis. O fator de segurança do Modelo A foi decrescendo ao longo do tempo, enquanto nos restantes, este manteve-se quase inalterado até que se registou uma rotura brusca. Extrapolando esta informação para casos reais, será esperado que taludes mais permeáveis apresentem sinais de instabilidade, ainda que a rotura seja atingida mais rapidamente; enquanto taludes com materiais menos permeáveis poderão não dar tantos sinais de instabilidade, mas o tempo até à rotura é maior, pelo que eventuais sinais poderão ser atempadamente detetados.

Não tendo disponíveis dados exatos, foi escolhido como representativo do caso de estudo o Modelo B, por ser intermédio dos restantes.

7.2. ANÁLISES NÃO DRENADAS

Surgiu ao longo deste estudo a questão de como abordar o problema relativamente ao tipo de análise a aplicar. O solo da região em estudo tem uma componente expressiva de materiais grossos, o que o torna algo permeável. As análises em tensões não drenadas deverão ser realizadas em solos com argilas moles compressíveis e muito pouco permeáveis, pois nestes casos a resistência não drenada é a principal condicionante da resistência. Deve ser lembrado que, além de ter uma componente significativa de materiais grossos, em laboratório foram ensaiados os limites de consistência do solo, tendo este sido considerado não plástico. Além disso, as análises não drenadas são geralmente consideradas em estudos a curto prazo, onde não existe tempo suficiente para dissipar os excessos de pressão neutra gerados; enquanto as análises drenadas realizam-se em estudos a longo prazo, onde existem efeitos de drenagem, isto é, dissipação das pressões neutras geradas.

No entanto, deverá ser ressaltado que é erróneo admitir que o solo tem um comportamento verdadeiramente drenado. O seu comportamento real estará algures entre os dois tipos de comportamento, mas a sua composição granulométrica e os resultados dos ensaios realizados aquando da execução do projeto, levam a crer que o comportamento mais próximo da realidade será o drenado.

Ainda assim, foi realizada uma modelação semelhante às anteriores, recorrendo ao Modelo B, mas em análise não drenada ($\phi = 0$), admitindo uma resistência não drenada, s_u , da camada ZG4 igual a 67 kPa, para perceber o seu efeito nos resultados.

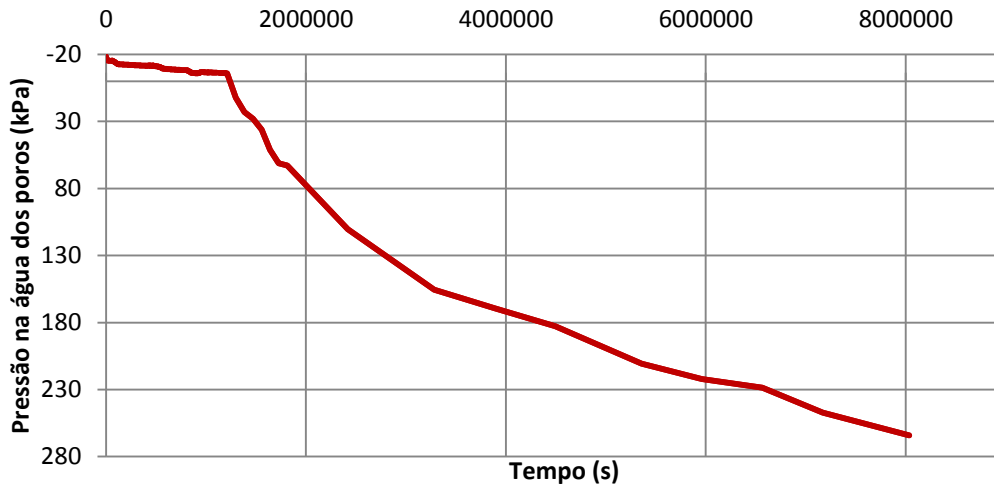


Fig. 7.14. – Sucção ao longo do tempo no Modelo B, numa análise não drenada

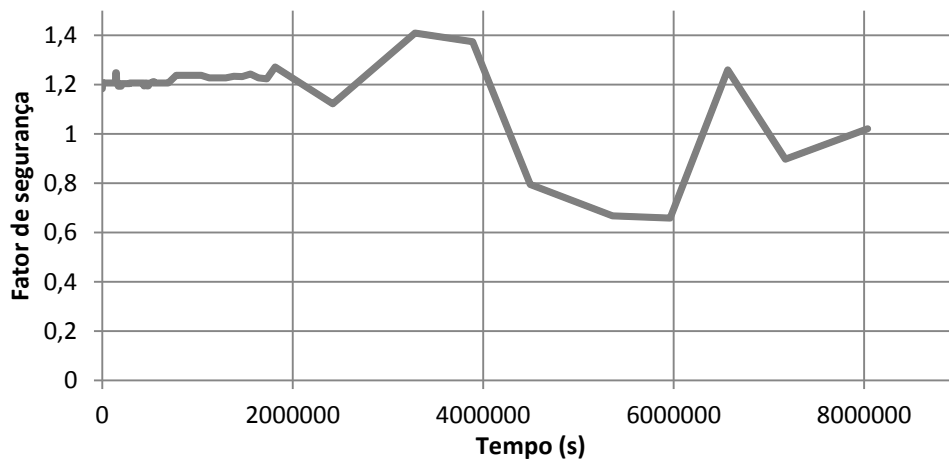


Fig. 7.15. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo no Modelo B, numa análise não drenada

Na Fig. 7.14. e Fig. 7.15. é possível verificar que não existe uma relação intrínseca entre as sucções no solo e os fatores de segurança. Estes últimos mantêm-se quase constantes durante as primeiras duas semanas de precipitação e depois apresentam um comportamento errático. Como seria de esperar, as pressões na água dos poros (positivas) são muito superiores às pressões vistas anteriormente no comportamento drenado, uma vez que o carregamento ocorre sem haver dissipação das pressões neutras.

Conclui-se que este tipo de análise não faz sentido neste trabalho, quando o que é pretendido é demonstrar o efeito da infiltração da água em problemas de estabilidade de taludes na RDD.

Este tipo de análise faria sentido se a componente argilosa do solo fosse significativa. Foi mencionado no subcapítulo 3.7. que um aumento do teor em água do solo implica um decréscimo da componente coesiva do mesmo, o que no caso de solos argilosos se traduziria na diminuição da resistência não drenada s_u . Esta quebra poderá ser a causadora de fenómenos de instabilidade, isto é, escorregamento dos taludes por perda da capacidade coesiva do solo. Ainda que o solo estudado não se enquadre neste cenário, é interessante tentar perceber como o teor em água afeta a coesão ou resistência não drenada de um solo.

A Fig. 7.16. é representativa do tipo de relação entre o teor em água e a coesão ou resistência não drenada de um solo.

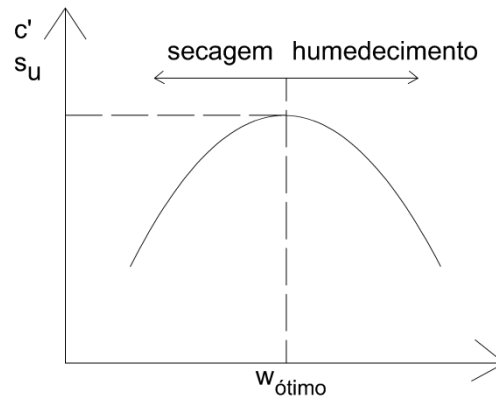


Fig. 7.16. – Relação entre o teor em água e a coesão ou resistência não drenada

A resistência não drenada e a coesão são função do teor em água e propriedades mineralógicas do solo, e nota-se que o valor máximo da componente de resistência é máximo para valores próximos do teor em água ótimo do solo. Além disso, durante o humedecimento das amostras, é notável um decréscimo significativo da componente coesiva do solo, e nalguns estudos realizados esse decréscimo será até exponencial, dependendo do tipo de argila constituinte do maciço.

O solo analisado aquando da realização do projeto realizado pelo GEG, [4], exibiu a relação entre a componente resistiva e o teor em água apresentada na Fig. 7.17.

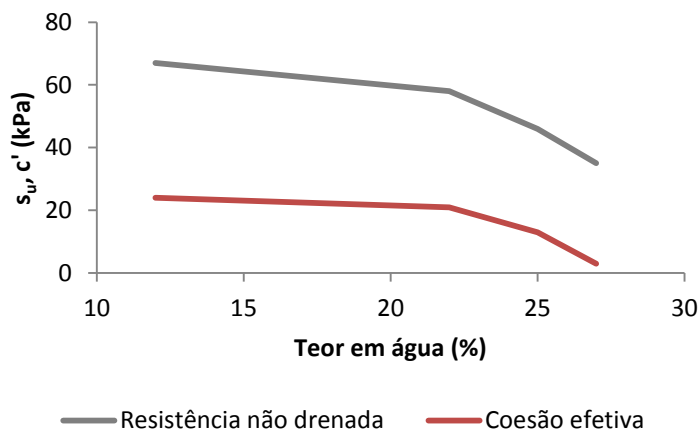


Fig. 7.17. – Relação entre a resistência não drenada e coesão efetiva com o teor em água

Existe um claro decréscimo da coesão e resistência não drenada com o aumento do teor em água, pelo que a perda de resistência que daí advém poderá ser uma das causadoras de fenómenos de instabilidade, neste caso escorregamento de taludes. No entanto, o software utilizado não permite variar a resistência não drenada (ou a coesão efetiva) com o tempo ou o teor em água, pelo que não foi possível modelar a influência direta deste fenómeno.

7.3. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO INICIAL DO NÍVEL FREÁTICO NA SUCÇÃO DO SOLO

Durante períodos de seca prolongados ocorre evaporação e evapotranspiração excessiva na superfície do solo, o que provoca a dessecação do solo, com a abertura de fendas de tração na superfície do

talude, o que aumenta a permeabilidade do solo nas camadas mais superficiais. Além disso, o nível freático poderá descer até níveis mais profundos durante o período de seca, e como resultado as pressões de água nos poros na zona não saturada tornam-se negativas, contribuindo para a resistência ao corte do solo. Quando chove, o solo que já está mais permeável devido às fendas de tração irá ter uma taxa de infiltração maior e conseqüentemente, o nível freático sobe, causando um aumento nas pressões de água nos poros na zona acima do nível freático, [46]. Como resultado, a resistência ao corte do solo diminui e o fator de segurança reduz para valores tão baixos que poderão ser desencadeados fenômenos de escorregamento. Por isso, é importante controlar o nível de água no solo, e este subcapítulo intenta demonstrar a influência que a posição do nível freático tem na estabilidade de taludes.

Nesta simulação foi usado o Modelo B e fez-se um cálculo numérico semelhante ao executado no subcapítulo 7.1., mas variando a profundidade do nível freático inicial, colocando-o a 8 e 12 metros.

7.3.1. NÍVEL FREÁTICO A 8 METROS DE PROFUNDIDADE

Quando o nível freático inicial está a 8 metros de profundidade, as sucções à superfície são muito pequenas, e quase nulas, se é que existem e ao fim de uma hora de precipitação a encosta já tinha sofrido rotura.

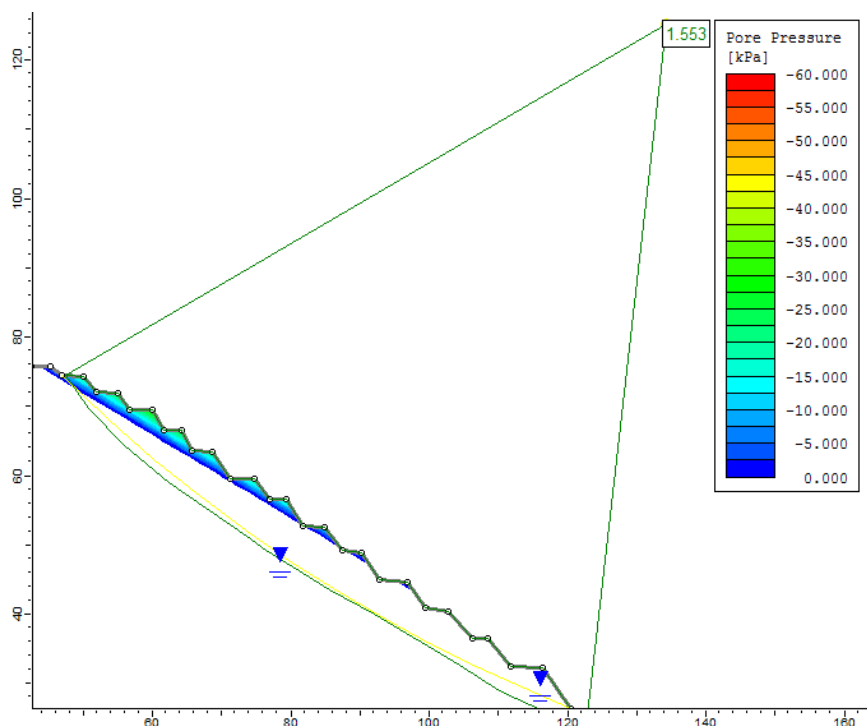


Fig. 7.18. – Superfície de deslizamento com fator de segurança mínimo antes de se iniciar a infiltração

7.3.2. NÍVEL FREÁTICO A 12 METROS DE PROFUNDIDADE

Colocou-se o nível freático inicial a uma profundidade superior à inicialmente considerada, isto é, a 12 metros de profundidade. Quando o nível freático está mais profundo, as sucções nas camadas superficiais são maiores, e conseqüentemente os fatores de segurança também são superiores. Como aconteceu anteriormente, as sucções vão dissipando lentamente (ainda mais do que previamente) até que ocorre a rotura brusca entre 1 mês e 2 semanas e 1 mês e 3 semanas de precipitação.

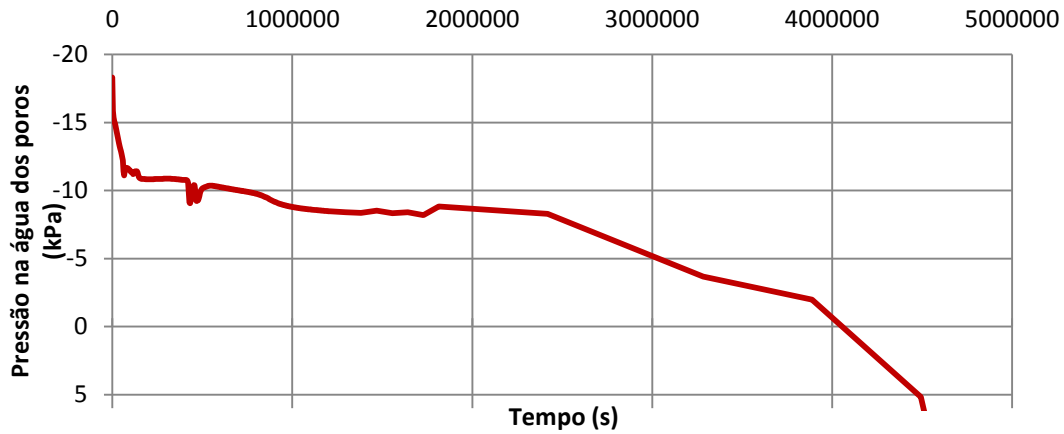


Fig. 7.19. – Sucção ao longo do tempo, com um nível freático inicial a 12 metros de profundidade

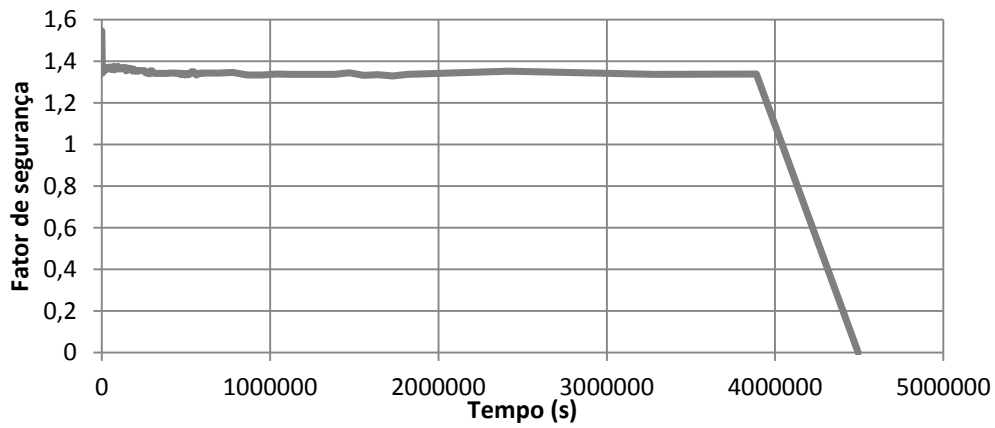


Fig. 7.20. – Fator de segurança ao longo do tempo, com um nível freático inicial a 12 metros de profundidade

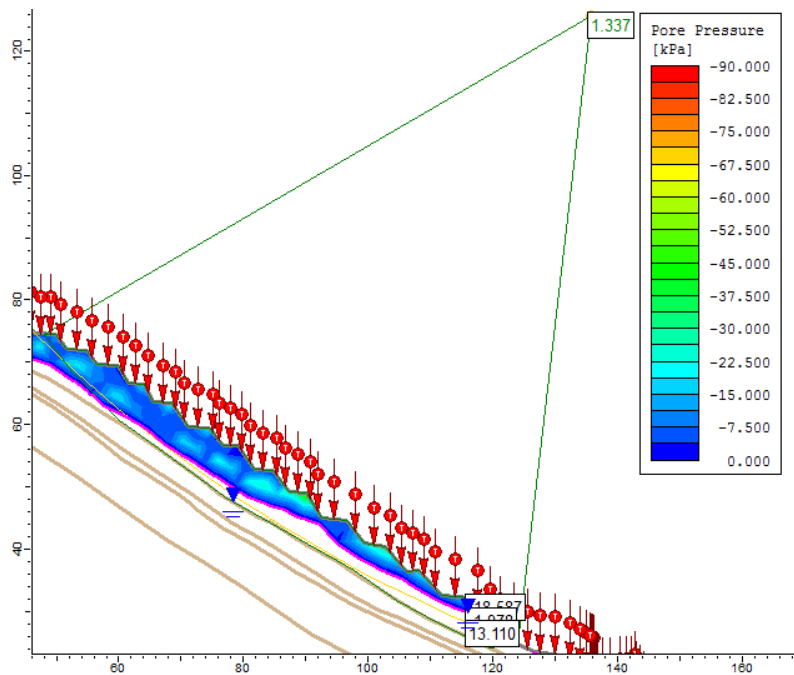


Fig. 7.21. – Superfície de deslizamento com menor segurança no instante 1 mês e 2 semanas

7.3.3. COMENTÁRIOS

Comparando as três situações com níveis freáticos iniciais distintos, conclui-se que é importante saber a posição do nível freático no solo ao longo do ano, pois este afeta consideravelmente a estabilidade, influenciado pelas sucções instaladas no maciço.

Quanto mais profundo o nível freático, maiores as sucções instaladas, maior o fator de segurança da encosta e maior o período de dissipação das pressões neutras, pelo que o maciço está em segurança durante mais tempo. Um nível freático muito superficial implica sucções muito reduzidas, e quando a frente de humedecimento começa a avançar, rapidamente estas se dissipam, diminuindo a resistência ao corte do solo, provocando fenómenos de instabilidade.

Assim, deve ser reforçado que é fundamental no estudo de estabilidade de encostas, principalmente em encostas com inclinação considerável (o caso da encosta estudada) fazer uma monitorização constante do nível freático, ao longo de todo o ano, pois desta forma é possível prevenir ou antecipar escorregamentos. Nas encostas do Douro, as quintas mais orientadas e interessadas neste tipo de problemas poderão investir em instrumentação *in situ* capaz de realizar essa monitorização, ou em alternativa, apostar em sistemas de rebaixamento do nível freático, como drenagem profunda, ainda que esta última possa apresentar outros inconvenientes, já mencionados no capítulo 5.

7.4. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE DAS DIFERENTES ARMAÇÕES DE TERRENO

Aquando da abordagem deste problema, foram tomadas em conta as formas de armar o terreno que atualmente se praticam em encosta, a legislação vigente e as boas práticas agrícolas. O objetivo deste tipo de análise é determinar a influência da inclinação da encosta e dos taludes na estabilidade dos mesmos, e simultaneamente maximizar a rentabilidade, isto é, o número de plantas por hectare.

Foram analisados três tipos de geometria distintos, vinha ao alto, vinha em patamares largos de dois bardos, e vinhas em patamares estreitos de um bardo. Ainda que hoje em dia a vinha já não seja sistematizada em patamares largos de dois bardos, pelas razões que foram apresentadas no capítulo 2, esta armação também foi aqui estudada, uma vez que uma parcela significativa da vinha já existente (17%) tem esse arranjo. Não foi considerada a vinha em micropatamares, pois são geralmente sistematizadas entre muros, como já foi mencionado no capítulo 2, e por isso não são objeto deste estudo. No entanto fica aqui ressaltado que a tendência atual é aproveitar o espaço dos antigos muros pós-filoxéricos para a implantação deste tipo de vinha, pelo que o seu estudo seria interessante em trabalhos futuros.

7.4.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ARMAÇÕES DE TERRENO ESTUDADAS

7.4.1.1. Vinha ao Alto

A lei obriga a que a vinha ao alto seja implementada em encostas com declives inferiores a 40% (30% no Baixo Corgo), no entanto, as boas práticas agrícolas apontam para um valor mais baixo, e acima dos 25% de declive a mecanização da vinha já se torna difícil. Normalmente são construídos caminhos de acesso segundo as curvas de nível a cada 60-80 metros de extensão, que têm inclinações para o interior na ordem dos 4-5% para realizar o escoamento adequado das águas.

A geometria considerada neste estudo teve como inclinação da encosta 30%, estando já nos limites previstos na lei, e passando mesmo os limites das boas práticas; mas foi escolhido este declive, porque de outra forma não seria possível comparar esta armação com as apresentadas de seguida. Como a

extensão da geometria estudada supera os 60-80 metros de extensão sugeridos, foi necessário considerar caminhos de acesso, representados em patamar, com uma largura de 2,20 metros, considerada suficiente para a circulação de máquinas e veículos, e inclinada para o interior de 5%.

7.4.1.2. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos

Já foi referido no capítulo 2 que este sistema de armação apresenta mais desvantagens do que vantagens. São sistematizados em encostas com declives superiores a 25%. Para declives acentuados (35-40%), as alturas dos taludes dos patamares são consideráveis (2 a 3 metros), e isto provoca instabilidade, aumenta o risco de erosão, e a grande altura dos taludes implica que em caso de deslizamento seja muito difícil aceder aos mesmos para os reparar. As boas práticas tentam limitar a implementação deste tipo de armação de terreno até aos 40% de declive da encosta.

Na geometria estudada, este sistema foi usado em encostas com 30% e 40% de declive, cujas plataformas possuem 3,50 metros de largura.

7.4.1.3. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo

São sistematizadas em declives de encosta superiores a 30% e até 50%. São construídos com bulldozers equipados com um sistema de laser rotativo para garantir um declive dos patamares de valor tipicamente igual a 3% para o interior.

Na geometria estudada, este sistema foi usado em encostas com 30 e 40% de declive, cujas plataformas possuem 2,30 metros de largura e declive para o interior de 3%.

Os compassos considerados foram os mesmos nos três tipos de armação (2×1,1 metros ou apenas 1,1 em patamares estreitos com apenas um bardo) para que a comparação direta fosse possível.

7.4.1.4. Sobre a Geometria

Na construção do perfil das encostas usaram-se as zonas geotécnicas com as mesmas características analisadas neste e no capítulo 6 deste estudo. Contudo, foi realizada uma simplificação da geometria, para que fosse possível usar as mesmas espessuras dos distintos solos nos diferentes perfis considerados (declives de encosta distintos, doravante designados β). O modelo de infiltração permaneceu o mesmo usado anteriormente. As zonas geotécnicas consideradas foram as seguintes:

- ZG4 até 5 metros de profundidade;
- ZG3 dos 5 aos 8 metros de profundidade;
- ZG2 dos 8 aos 10 metros de profundidade;
- ZG1 dos 10 aos 17,5 metros de profundidade;
- ZG0 a partir dos 17,5 metros de profundidade.

Adicionalmente considerou-se o nível freático inicial a 10 metros de profundidade. Além disso, nesta primeira análise, os declives dos taludes, doravante designados θ , são aqueles considerados ótimos nas boas práticas agrícolas, isto é, 150% (cerca de 56°) para patamares largos e 175% (cerca de 60°) para patamares estreitos.

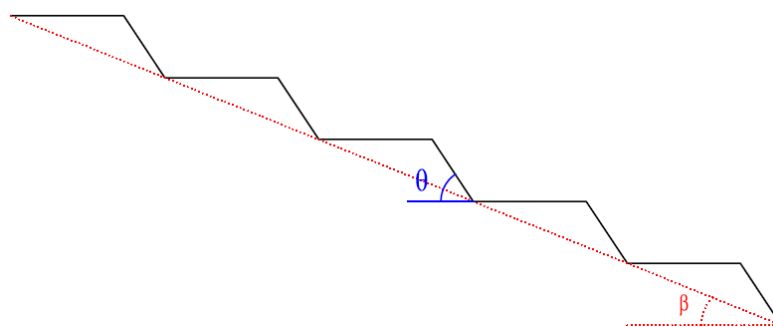


Fig. 7.22. – Figura representativa da nomenclatura usada na inclinação da encosta e na inclinação dos taludes

O Quadro 2.1. e Quadro 2.2. do capítulo 2 foram utilizados como ferramenta inicial na construção da geometria, mas rapidamente se constatou que no Quadro 2.2., não foram tomadas em conta as inclinações direcionadas para o interior (geralmente 3%) dos patamares estreitos de um bardo. Assim, foram feitos novos cálculos trigonométricos, com vista a obter as alturas e larguras dos taludes, respeitando valores de β e θ predefinidos. A geometria dos casos estudados é sumarizada no Quadro 7.1. Este tipo de ferramenta poderá ser útil para os agricultores e engenheiros agrónomos da RDD, pelo que se realizou uma pequena aplicação, que será pormenorizada no capítulo 8.

Quadro 7.1. – Quadro resumo das geometrias adotadas nos casos em estudo

Declive da encosta		Vinha ao alto	Patamares largos de 2 bardos	Patamares estreitos de 1 bardo
30% $\beta \approx 17^\circ$	y	NA	1,31	0,92
	x	NA	0,87	0,52
	l	NA	3,5	2,3
	α	NA	0°	$\approx 2^\circ$ (3%)
	θ	NA	56° (150%)	60° (175%)
40% $\beta \approx 22^\circ$	y	-	1,91	1,28
	x	-	1,27	0,73
	l	-	3,5	2,3
	α	-	0°	$\approx 2^\circ$ (3%)
	θ	-	56° (150%)	60° (175%)

Onde:

- x , é a largura dos taludes;
- y , é a altura dos taludes;
- l , é a extensão (largura) da plataforma;
- α , é o declive da plataforma para o interior.

7.4.2. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE EM ENCOSTAS COM β IGUAL A 30%

7.4.2.1. Vinha ao Alto

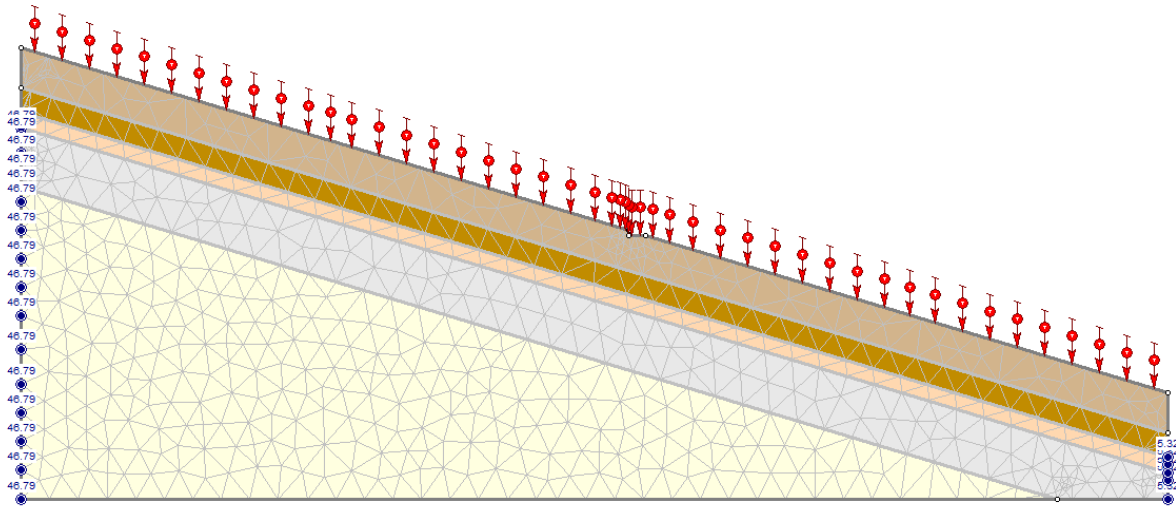


Fig. 7.23. – Modelo representativo da vinha ao alto na análise de infiltrações

Na Fig. 7.24. são apresentados os fatores de segurança mínimos ao longo do tempo. Como a inclinação da encosta é algo reduzida, os fatores de segurança são elevados. Inicialmente sem chuva, o fator de segurança mínimo assume um valor igual a 3,4 mas assim que começa a chover, esse fator de segurança diminui 37% para 2,1.

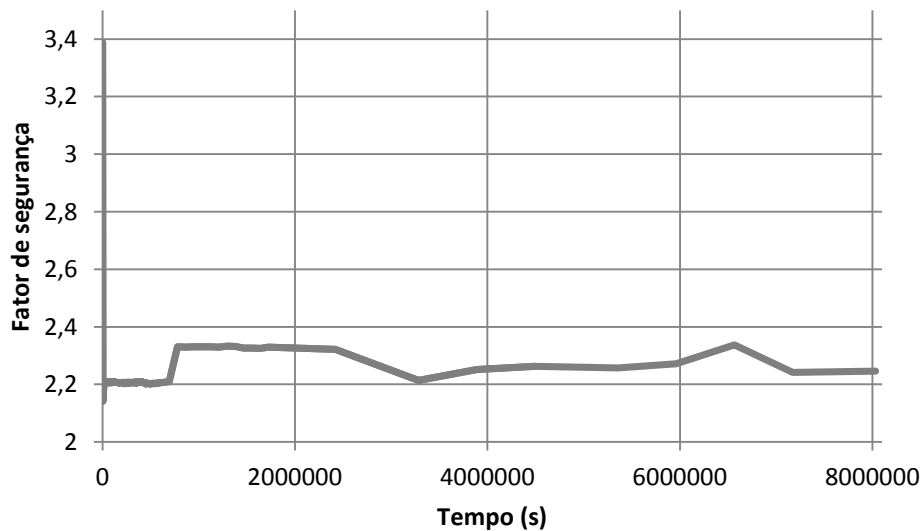


Fig. 7.24. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, na vinha ao alto

Além disso, foi também calculada a densidade de plantas desta geometria, igual a 4746 plantas por hectare.

7.4.2.2. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos

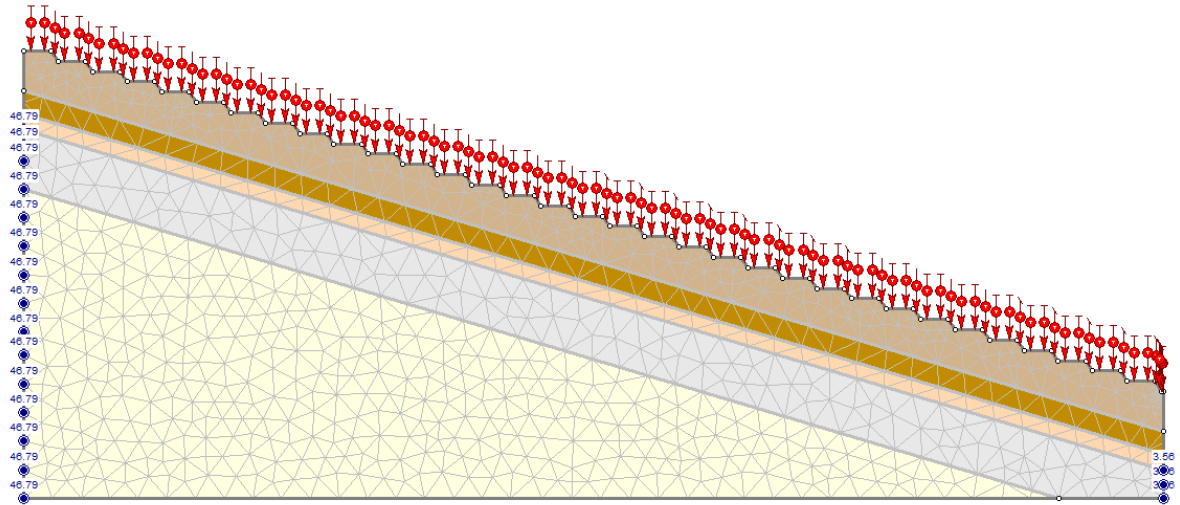


Fig. 7.25. – Modelo representativo da vinha em patamares largos de dois bardos na análise de infiltrações

O fator de segurança mínimo diminui 29% durante a primeira hora de infiltração. Os fatores de segurança poderão ser maiores do que aqueles obtidos na vinha ao alto, no entanto, como já foi comentado anteriormente, este tipo de armação de terreno apresenta vários inconvenientes (mencionados no capítulo 2), além de apresentar uma densidade de plantação inferior. A densidade de plantas calculada foi 4161 plantas por hectare.

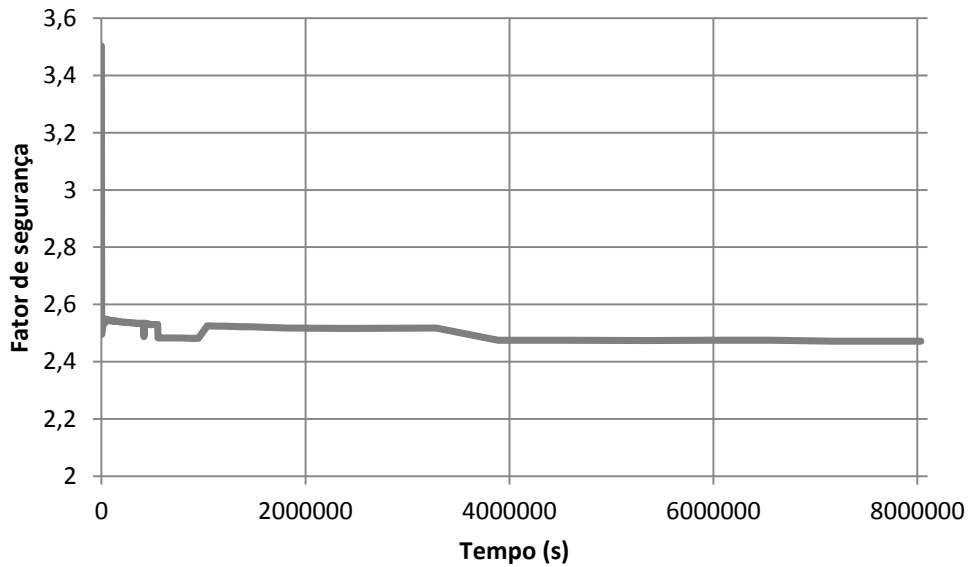


Fig. 7.26. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares largos de dois bardos

7.4.2.3. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo

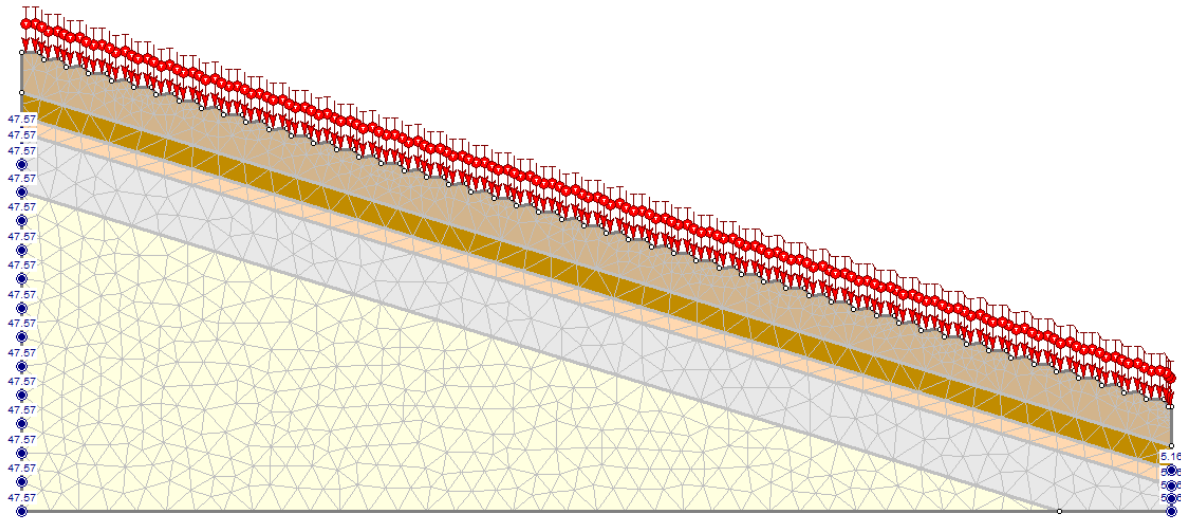


Fig. 7.27. – Modelo representativo da vinha em patamares estreitos de um bardo na análise de infiltrações

Quando as inclinações da encosta são superiores a 25%, as armações de terreno mais usadas atualmente são a vinha em patamares estreitos de um bardo e a vinha em micropatamares. Apesar de apresentar uma densidade de plantação inferior às armações estudadas anteriormente (3225 plantas por hectare), este tipo de armação para a mesma inclinação de encosta, e um declive de talude superior à vinha em patamares largos de dois bardos, consegue ter fatores de segurança quase idênticos, para a mesma infiltração. O fator de segurança diminui 29% durante a primeira hora de infiltração.

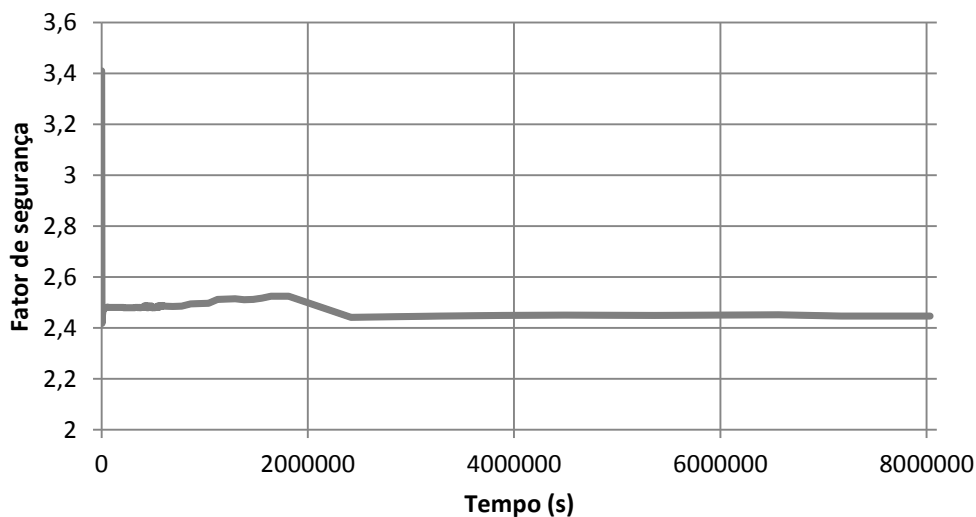


Fig. 7.28. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo

7.4.3. ESTABILIDADE E RENTABILIDADE EM ENCOSTAS COM β IGUAL A 40%

Para inclinações médias (30%) a vinha em patamares largos e estreitos apresenta fatores de segurança semelhantes, como visto previamente. Colocou-se a questão do que acontecerá se a inclinação da encosta for maior, neste caso 40%, e com as mesmas condições geológicas/ geotécnicas dos modelos anteriores.

7.4.3.1. Vinha em Patamares Largos de 2 Bardos

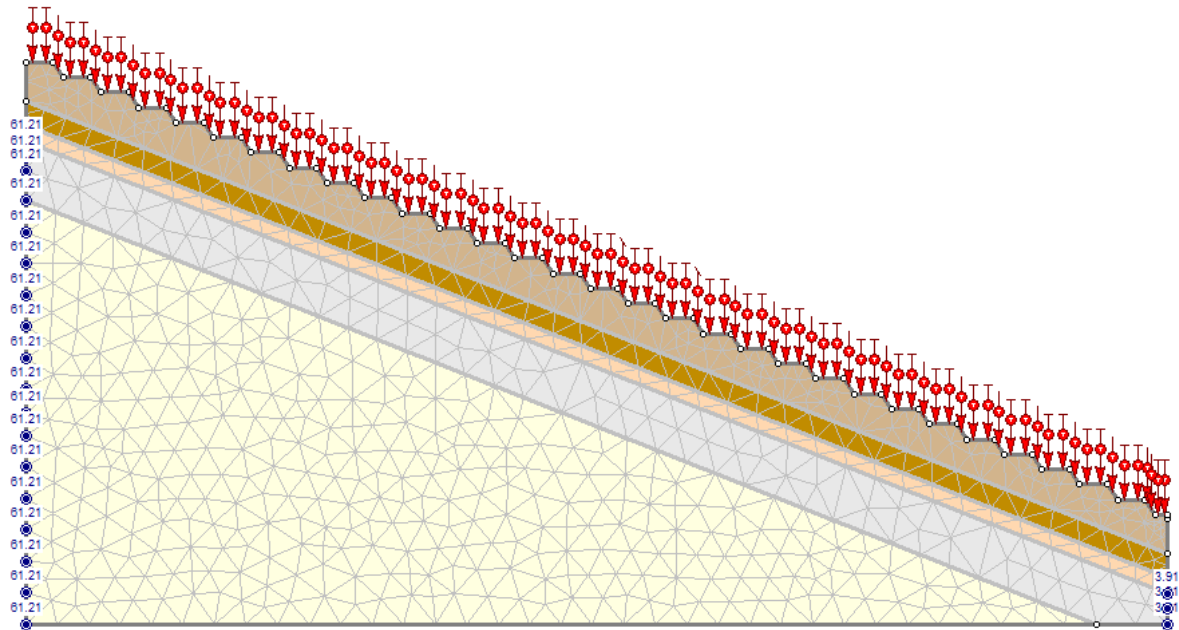


Fig. 7.29. – Modelo representativo da vinha em patamares largos de dois bardos na análise de infiltrações

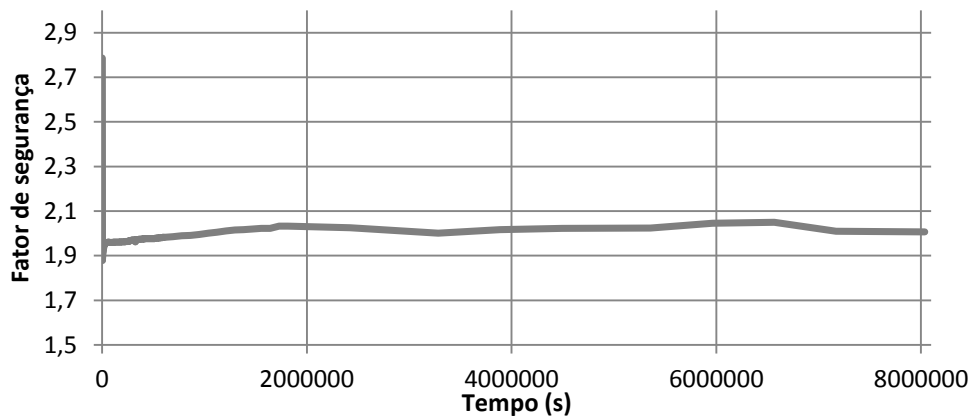


Fig. 7.30. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares largos de dois bardos

Na Fig. 7.30. é apresentado o fator de segurança mínimo ao longo do tempo. Consta-se que na primeira hora este diminui 33%, o que é um decréscimo superior ao que ocorria na situação em que a encosta tinha apenas 30% de inclinação. Assim, o declive da encosta é uma das principais condicionantes da estabilidade quando ocorrem fenómenos de precipitação, pelo que a legislação vigente atualmente, que proíbe a plantação de vinha em encostas com inclinações superiores a 50%, faz todo o sentido.

A densidade de plantação calculada para esta geometria foi 3812 plantas por hectare. Nota-se um decréscimo acentuado na densidade de plantas em relação ao mesmo modelo numa encosta de inclinação menos acentuada (decrécimo de 8%). Isto seria de esperar, pois para uma encosta mais inclinada, e mantendo o mesmo declive dos taludes dos patamares, estes últimos precisam de ser mais

altos e largos. Ainda assim, a segurança também diminui relativamente ao modelo anterior, cerca de 24%.

7.4.3.2. Vinha em Patamares Estreitos de 1 Bardo

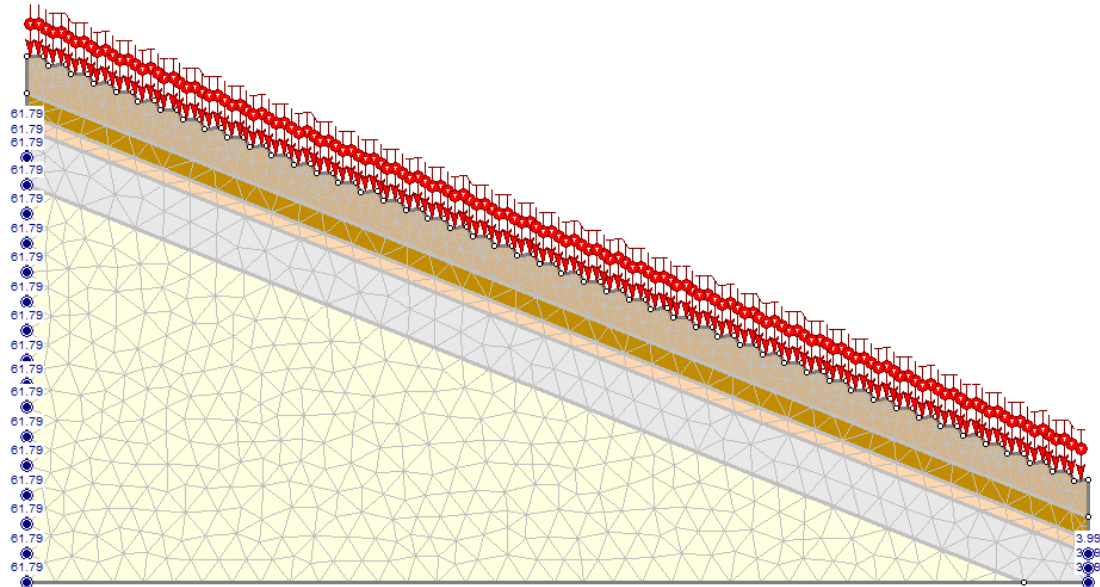


Fig. 7.31. – Modelo representativo da vinha em patamares estreitos de um bardo na análise de infiltrações

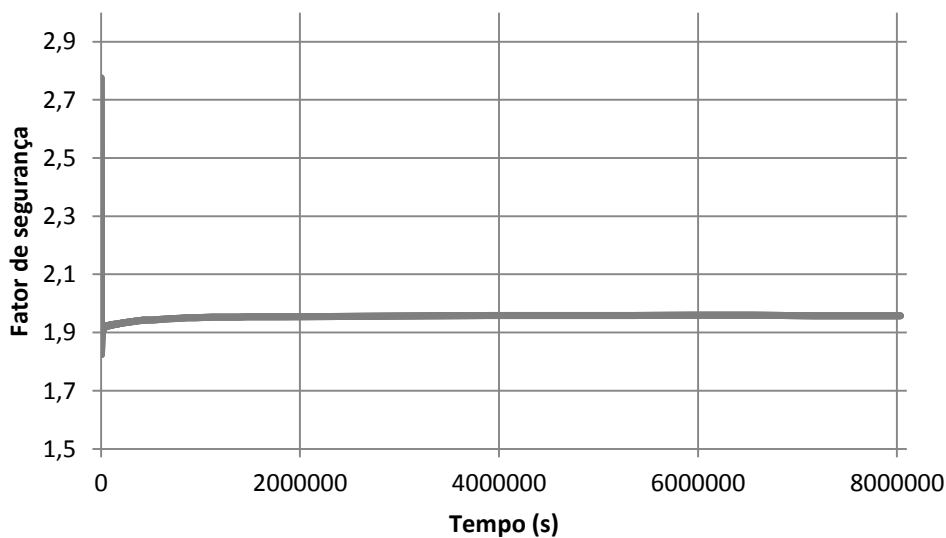


Fig. 7.32. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo

Na Fig. 7.32. é apresentado o fator de segurança mínimo ao longo do tempo. Constatase que na primeira hora este diminui 34%, o que é um decréscimo superior ao que ocorria na situação em que a encosta tinha apenas 30% de inclinação.

A densidade de plantação calculada para esta geometria foi 3001 plantas por hectare, cumprindo (por pouco) a legislação vigente, que impõe uma densidade mínima de 3000 plantas por hectare em patamares. Poder-se-ia ainda diminuir o compasso entre plantas para valores inferiores, para aumentar a densidade de plantação. Nota-se um decréscimo acentuado na densidade de plantas em relação ao

mesmo modelo numa encosta de inclinação menos acentuada (decréscimo de 7%). A segurança também diminui relativamente ao modelo anterior, cerca de 25%.

7.4.4. ESTUDO COMPARATIVO DOS TIPOS DE ARMAÇÃO ESTUDADOS

No Quadro 7.2. são apresentados o fator de segurança mínimo e a densidade de plantação para cada tipo de armação do terreno, considerados no estudo.

Quadro 7.2. – Resumo da densidade de plantas e fatores de segurança mínimos dos diferentes tipos de armação e declives da encosta

Declive da encosta	Tipo de armação do terreno	Densidade de plantas	FS mínimo
30%	Vinha ao alto	4746	2,14
	Patamares largos de 2 bardos	4161	2,47
	Patamares estreitos de 1 bardo	3225	2,42
40%	Patamares largos de 2 bardos	3812	1,88
	Patamares estreitos de 1 bardo	3001	1,82

Consta-se que a vinha ao alto é o sistema de armação que dá uma maior rentabilidade à vinha. Deve ser mencionado que para inclinações inferiores a 25%, este é o tipo de armação mais usado pelos agricultores durienses. Além de uma maior densidade de plantação, apresenta outras vantagens. Porque a vinha está disposta em troços retilíneos, isto facilita e rentabiliza os trabalhos na vinha ao longo do seu crescimento. Adicionalmente, os tratamentos fitossanitários são mais eficazes.

Assim que as inclinações das encostas superam os 25%, o tipo de armação de terreno preferencial passa a ser vinha em patamares estreitos de um bardo. Apesar de terem uma densidade de plantas inferior, a colheita é homogénea, enquanto que em patamares largos de dois bardos as vinhas na zona exterior e interior do patamar apresentam maturações distintas. Além disso, para a mesma inclinação de encosta, a vinha em patamares largos apresenta taludes mais altos, o que dificulta os tratamentos fitossanitários. Em patamares estreitos, é ainda possível fazer o controlo de vegetação nos taludes mecanicamente, o que possibilita a implantação de vegetação na face dos taludes com vista a incutir um reforço estabilizador. Embora o comportamento de ambos os tipos de armação pareça semelhante no que diz respeito à estabilidade, não o são. Isto porque na modelação não se implementou drenagem superficial, existente ao longo dos patamares estreitos que possuem um declive para o interior de cerca de 3%, o que altera o regime de infiltração implementado, isto é, uma parcela da precipitação considerada seria escoada pelo sistema de drenagem superficial, diminuindo a infiltração existente. Os patamares largos não apresentam declive, até porque no lado interior existe uma fileira de vinha, que seria afetada duplamente, pela água que escoar pela face do talude a montante, e a água que escoaria pelo declive em direção ao interior do patamar.

7.4.5. ESTUDO INCIDINDO SOBRE A ALTERAÇÃO DE θ

Alterar a inclinação da encosta para reforçar a estabilidade ou aumentar a produtividade da vinha poderá não ser a melhor solução, pois diminuir a inclinação da encosta acarreta escavações volumosas e conseqüentemente custos elevados. Outra solução será alterar o ângulo dos taludes até um número considerado aceitável, sem que isso leve a riscos muito acrescidos de escorregamento. Assim, com recurso à ferramenta de otimização realizada anteriormente, e usando a geometria e características de uma encosta com declive de 40% e com vinha em patamares estreitos de um bardo, alterou-se o

ângulo do talude, θ , diminuindo-o para 56° (150%), Quadro 7.3. e aumentando-o para 63° (200%). Foi também calculada a densidade de plantação destes dois novos casos.

Quadro 7.3. – Quadro resumo das geometrias adotadas com a alteração de θ

Declive da encosta	Patamares estreitos de 1 bardo	
40% $\beta=22^\circ$	y	1,35
	x	0,9
	l	2,3
	α	$\approx 2^\circ$ (3%)
	θ	56° (150%)
	y	1,24
	x	0,62
	l	2,3
	α	$\approx 2^\circ$ (3%)
	θ	63° (200%)

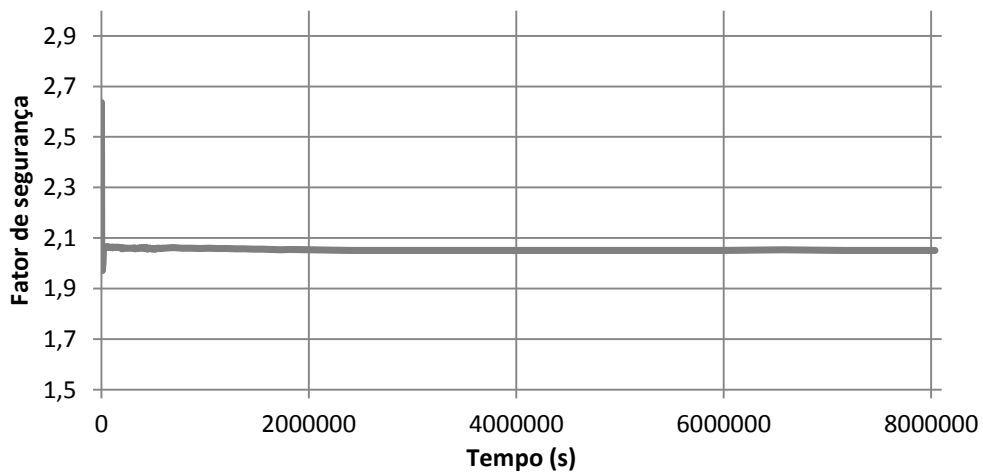


Fig. 7.33. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo e θ igual a 150%

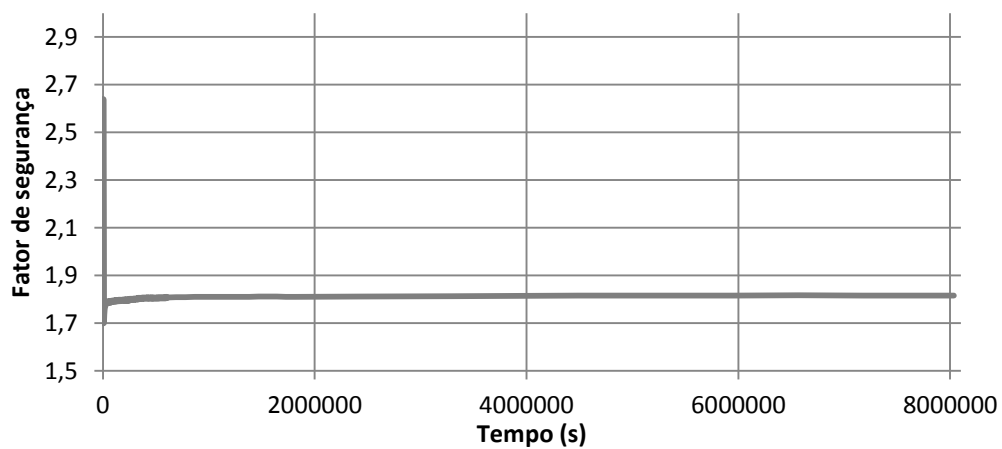


Fig. 7.34. – Fator de segurança mínimo ao longo do tempo, em patamares estreitos de um bardo e θ igual a 200%

Os fatores de segurança ao longo do tempo dos dois novos casos de estudo são apresentados no Quadro 7.4., juntamente com a geometria estudada anteriormente, em que θ assumia o valor de 60° (175%).

Quadro 7.4. – Quadro resumo comparativo entre os diferentes declives de talude

$\beta=40\%$	Densidade de plantas	FS mínimo
$\theta=150\%$	2842	1,97
$\theta=175\%$	3001	1,82
$\theta=200\%$	3114	1,70

Como se pode verificar no Quadro 7.4., quando se diminui o declive de 175 para 150% há um decréscimo de 6% na densidade de plantas, e um aumento da segurança na ordem dos 8%. Quando se aumenta o declive dos taludes de 175 para 200%, há um aumento na densidade de plantas de 4%, mas uma diminuição na segurança de 7%.

A diferença poderá não parecer importante à primeira vista, mas aumentando o ângulo de inclinação de um talude em 3° , consegue-se mais de uma centena de plantas por hectare. Relativamente à segurança, uma quinta que pretenda ter uma maior densidade de plantação poderá aumentar o declive dos seus taludes, com o cuidado de implementar um sistema de drenagem superficial eficiente e bem dimensionado, que o decréscimo na segurança não será muito gravoso.

8

APLICAÇÃO PARA O CÁLCULO DA LARGURA E ALTURA DE TALUDES, E DENSIDADE DE PLANTAÇÃO

8.1. INTRODUÇÃO

Durante os cálculos realizados no capítulo 7 sentiu-se a necessidade de recorrer à matemática, especificamente à trigonometria, para calcular a altura e largura de taludes dos patamares a construir, tendo como dados iniciais o declive médio da encosta e o declive do talude pretendido.

Além disso, no cálculo de densidades de plantação também foram necessárias algumas estimativas da densidade de plantação. Assim, considerou-se que seria útil desenvolver uma ferramenta que conseguisse realizar estas duas funções de uma forma expedita, não só para ser usada durante este trabalho, mas que também poderá servir como ferramenta de auxílio aos agricultores, quando estes necessitarem de planejar a reestruturação da vinha.

8.2. CÁLCULO DA LARGURA E ALTURA DE TALUDES

8.2.1. FORMULAÇÃO

O caso geral é representativo da vinha de patamares estreitos com um bardo, no entanto, introduzindo um valor de α nulo, as expressões seguintes também são válidas para patamares largos de dois bardos.

A Fig. 8.1. é um esboço da geometria tipo de vinha em patamares, e na legenda são apresentadas as variáveis do problema.

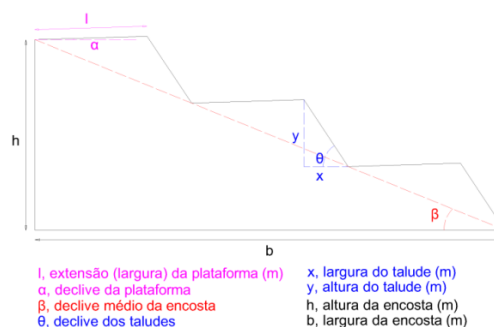


Fig. 8.1. – Geometria tipo da sistematização de vinha em patamares

Conhecendo as equações trigonométricas 8.1. e 8.2,

$$\tan(\beta) = \frac{h}{b} \quad (8.1.)$$

$$\tan(\theta) = \frac{y}{x} \quad (8.2.)$$

e sabendo que em b e h cabem n conjuntos de patamar mais talude, tem-se o sistema de equações 8.3.

$$\begin{cases} b = n \cdot (l \cdot \cos(\alpha) + x) \\ h = n \cdot (y - l \cdot \sin(\alpha)) \end{cases} \quad (8.3.)$$

Então, igualando n , tem-se a equação 8.4.

$$\frac{b}{l \cdot \cos(\alpha) + \frac{y}{\tan(\theta)}} = \frac{h}{y - l \cdot \sin(\alpha)} \quad (8.4.)$$

No entanto, é possível relacionar a altura da encosta com a sua largura e ângulo, como demonstra a expressão 8.5.

$$h = b \cdot \tan(\beta) \quad (8.5.)$$

Então, é possível retirar o b da equação, como se pode verificar na expressão 8.6.

$$\frac{h}{l \cdot \cos(\alpha) + \frac{y}{\tan(\theta)}} = \frac{h \cdot \tan(\beta)}{y - l \cdot \sin(\alpha)} \quad (8.6.)$$

Resolvendo a equação em ordem a y , tem-se a equação 8.7.

$$y = \frac{l \cdot \sin(\theta) \cdot [\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)]}{\sin(\theta) \cdot \cos(\beta) - \cos(\theta) \cdot \sin(\beta)} \quad (8.7.)$$

Finalmente, é possível relacionar x com a variável y , como na expressão 8.8.

$$x = \frac{y}{\tan(\theta)} \quad (8.8.)$$

8.2.2. MANUAL DE UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA

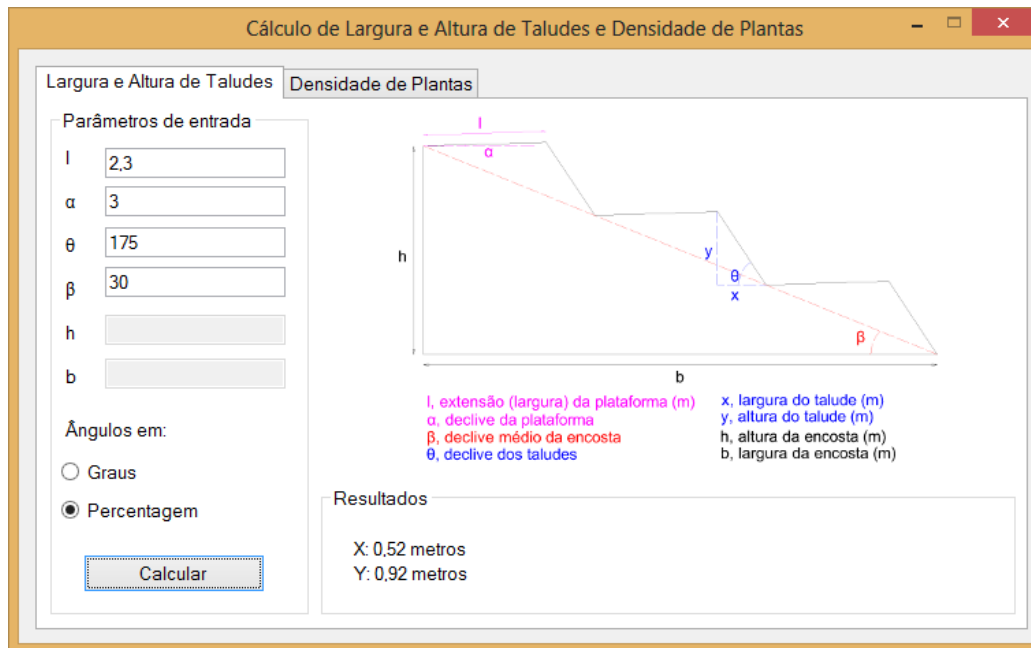


Fig. 8.2. – Interface da aplicação para calcular larguras e alturas de taludes

A Fig. 8.2. apresenta a interface da aplicação. Para calcular larguras e alturas de taludes, a *tab* “Largura e Altura de Taludes” deverá estar ativa. Nela serão necessários introduzir parâmetros como a extensão da plataforma, declive da plataforma (no caso de patamares largos este valor deverá ser zero), declive dos taludes e declive médio da encosta. Em contrapartida, em vez do declive médio da encosta poderão ser introduzidos os valores da altura e largura da encosta, e a aplicação calculará o declive da encosta.

As unidades de comprimento a introduzir são o metro, e as de declive serão graus ou percentagem. Na introdução dos declives em graus, é aconselhável introduzir pelo menos duas casas decimais, para se obter resultados mais exatos.

Para calcular, basta clicar no botão “Calcular”, e os resultados serão apresentados na caixa de “Resultados” em metros.

8.3. CÁLCULO DA DENSIDADE DE PLANTAS

8.3.1. VINHA AO ALTO

Na Fig. 8.3. está representado um esquema da sistematização da vinha ao alto.

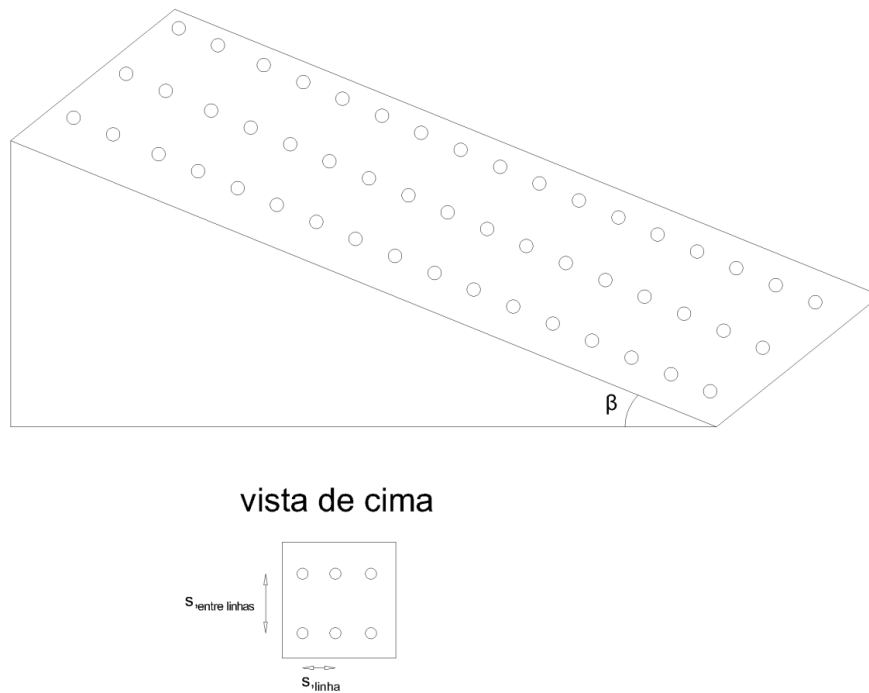


Fig. 8.3. – Esquema representativo da sistematização da vinha ao alto no cálculo de densidade de plantas

A densidade de plantas deste tipo de armação é calculada pela expressão 8.9.

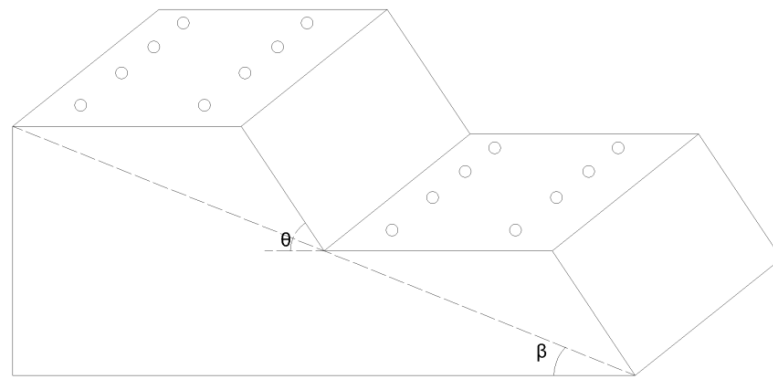
$$\rho = \frac{10000}{s_{linha} \cdot s_{entre linhas} \cdot \cos(\beta)} \quad (8.9.)$$

Onde:

- ρ , é a densidade de plantas;
- s_{linha} é o espaçamento de plantas na linha;
- $s_{entre linhas}$, é o espaçamento de plantas entre linhas;
- β , é o declive da encosta.

8.3.2. PATAMARES LARGOS DE DOIS BARDOS

Na Fig. 8.4. está representado um esquema da sistematização da vinha em patamares largos de dois bardos.



vista de cima

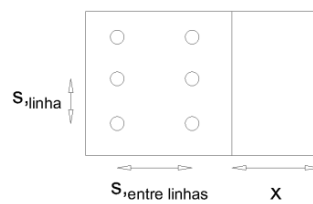


Fig. 8.4. – Esquema representativo da sistematização da vinha em patamares largos de dois bardos no cálculo de densidade de plantas

A densidade de plantas deste tipo de armação é calculada pela expressão 8.10.

$$\rho = \frac{20000}{s_{\text{linha}} \times (l+x)} \quad (8.10.)$$

Onde:

- l , é a extensão (largura) da plataforma;
- x , é a largura do talude.

8.3.3. PATAMARES ESTREITOS DE UM BARDO

Na Fig. 8.5. está representado um esquema da sistematização da vinha em patamares estreitos de um bardo.

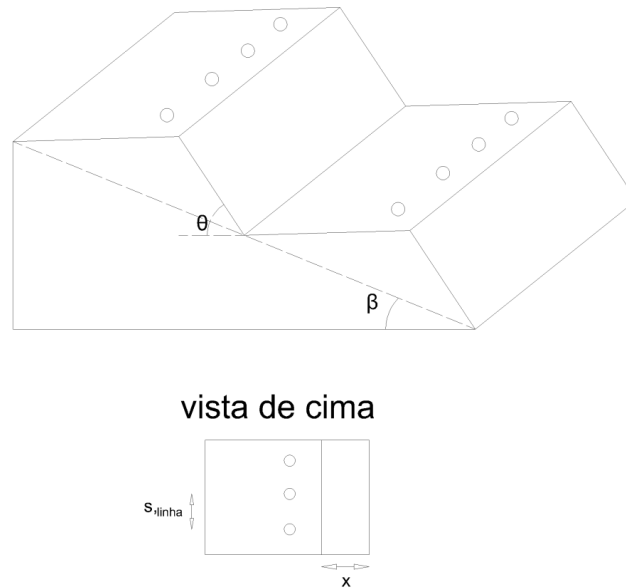


Fig. 8.5. – Esquema representativo da sistematização da vinha em patamares estreitos de um bardo no cálculo de densidade de plantas

A densidade de plantas deste tipo de armação é calculada pela expressão 8.11.

$$\rho = \frac{10000}{s_{linha} \times (l \cdot \cos(\alpha) + x)} \quad (8.11.)$$

Onde:

- α , é o declive da plataforma para o interior

8.3.4. MANUAL DE UTILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA

Para calcular densidades de plantas a *tab* “Densidade de Plantas” deverá estar ativa. Nela, poderão ser seleccionados três tipos de armação de terreno: “Vinha ao Alto”, “Patamares Estreitos de 1 Bardo” ou “Patamares Largos de 2 Bardos”, Fig. 8.6.

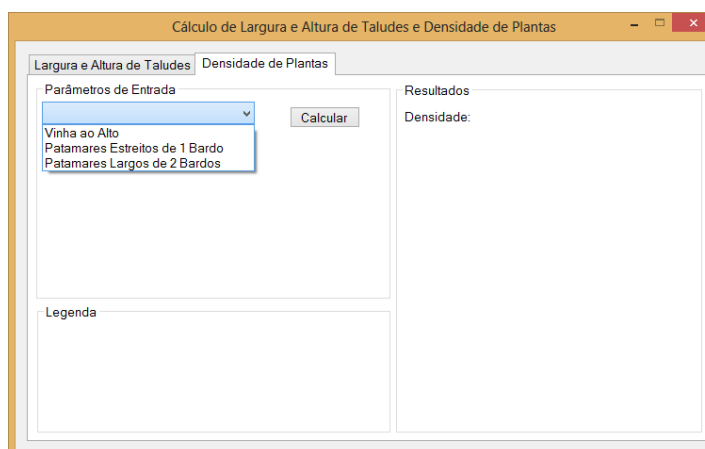


Fig. 8.6. – Janela de seleção da armação de terreno para calcular a densidade de plantas

8.3.4.1. Vinha ao Alto

Fig. 8.7. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em vinha ao alto

Selecionando “Vinha ao Alto”, serão pedidos três parâmetros de entrada apresentados na legenda. Novamente, todas as medidas de comprimento devem ser introduzidas em metros, e as de declive poderão ser introduzidas em graus ou percentagem. Basta clicar em “Calcular” e a densidade calculada é apresentada no lado direito na caixa de “Resultados”.

8.3.4.2. Patamares Estreitos de Um Bardo

Fig. 8.8. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em patamares estreitos de um bardo

Selecionando “Patamares Estreitos de 1 Bardo”, serão pedidos quatro parâmetros de entrada apresentados na legenda. Como anteriormente, todas as medidas de comprimento devem ser introduzidas em metros, e as de declive poderão ser introduzidas em graus ou percentagem.

8.3.4.3 Patamares Largos de Dois Bardos

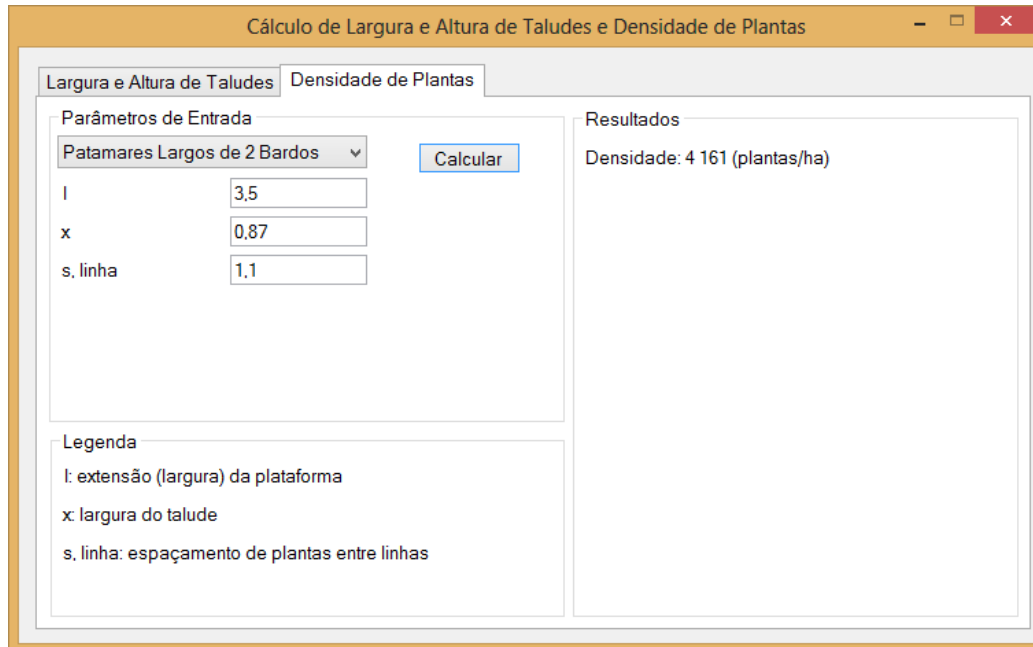


Fig. 8.9. – Interface da aplicação para calcular a densidade de plantas em patamares largos de dois bardos

Selecionando “Patamares Estreitos de 2 Bardos”, serão pedidos três parâmetros de entrada apresentados na legenda. Todas as medidas deverão ser introduzidas em metros.

8.4. COMENTÁRIO

Esta aplicação pretende facilitar o cálculo de larguras e alturas de taludes, e a densidade de plantas. A geometria de taludes obtida pode ser utilizada para posteriormente fazer a modelação da encosta num *software* de estabilidade de taludes, para determinar a segurança dessa encosta e compará-la com a de outras geometrias possíveis.

Este tipo de abordagem será útil para os engenheiros agrónomos e agricultores mais curiosos, que pretendam explorar com maior detalhe o tema da estabilidade de encostas.

9

CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Ficou claro ao longo deste estudo que a relação entre a estabilidade das encostas durienses e a densidade de plantação pode ser otimizada. Para isso, podem ser implementadas algumas medidas aquando da reestruturação da vinha, umas previstas na lei, outras que serão medidas estabilizadoras ou de monitorização adicionais, mas que no seu conjunto poderão reduzir em grande parte o risco de deslizamento dos taludes das vinhas. Um dos fatores preponderantes na estabilidade é a inclinação da encosta. No entanto, alterar a inclinação de uma encosta poderá não ser de todo viável, pelo impacto ambiental decorrente de grandes escavações e aterros e os custos que isso acarreta. Assim, consoante a inclinação da encosta, é possível otimizar, dentro de certos limites, o declive dos taludes dos patamares da vinha, para reduzir o risco de deslizamentos, ou até para aumentar a densidade de plantas do terreno.

Como medidas adicionais de estabilização, poderão ser plantados enrelvamentos entre linhas e na face dos taludes, que além de reduzirem a erosão, pela perda de velocidade do escoamento ao longo dos taludes, também incutem uma resistência mecânica ao solo, ainda que superficial, que poderá ser importante. Adicionalmente, aquando da construção dos novos taludes, poderão ser colocadas na face dos mesmos geocélulas, que garantem um acréscimo de confinamento na camada superficial do talude, aumentando a estabilidade. Além disso, poderão ser implementadas geogrelhas, mas assegurando a sua disposição em profundidade para que estas não sejam danificadas durante os trabalhos normais da vinha.

As medidas de monitorização estão intimamente ligadas à hidrologia do maciço, isto é, a influência que a água subterrânea tem na estabilidade. Conclui-se neste estudo que durante fenómenos de precipitação, isto é, quando existe infiltração de água no solo, a água é umas das principais causadoras de escorregamentos, e isto é tanto mais grave, quanto maior a inclinação da encosta e quanto mais superficial estiver o nível freático no início da precipitação. Isto porque à medida que a frente de humedecimento avança no sentido descendente, as pressões negativas na água dos poros diminuem, e isto leva a uma perda de resistência do solo, pela diminuição da coesão “aparente” que essas sucções nele incutiam. Além disso, quanto mais superficial estiver o nível freático, menores serão as sucções instaladas no solo, pelo que com o avanço da frente de humedecimento, estas rapidamente se dissipam, o que poderá provocar a rotura do solo, especialmente quando a inclinação da encosta é considerável. Assim, as medidas de monitorização passam pela instalação de estações meteorológicas nas quintas, para medir as precipitações ao longo do ano, e talvez ainda mais importante, fazer uma monitorização permanente ao longo do ano do nível freático no solo, e assim que estas medições indicarem um nível

freático superficial, implementar medidas preventivas para evitar infiltração ou desviar escoamentos dos taludes, com vista a evitar que ocorram deslizamentos.

Um sistema de drenagem superficial é essencial para garantir a estabilidade, uma vez que o desvio de água precipitada diminui a parcela de água infiltrada no solo. Deve no entanto ser bem dimensionado, e a sua manutenção é importante para que seja mantida a eficácia desse sistema ao longo do tempo.

Futuramente seria interessante caracterizar de forma exaustiva o solo da RDD, o que é tarefa difícil pela sua heterogeneidade e singularidade, sendo este também muito variável de zona para zona, e variando até dentro das próprias quintas. A determinação de parâmetros como o coeficiente de condutividade hidráulica do solo, a curva característica do solo, taxa de infiltração e taxa de evaporação, são essenciais para a perceção precisa do comportamento das camadas superficiais dos maciços, que são as que condicionam os escorregamentos.

BIBLIOGRAFIA

- Caicedo, B. et al. *Advances in Unsaturated Soils*. CRC Press, Colombia, 2013.
- Dagadu, J. S., Nimbalkar, P. T. *Infiltration studies of different soils under different soil conditions and comparison of infiltration models with field data*. International Journal of Advanced Engineering Technology, Abril-Junho/2012.
- Kézdi, Á. *Handbook of soil Mechanics – Soil Physics*. Akadémiai Kiadó, Budapeste, 1974.
- Vogel, T. et al. *Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions*. Advances in Water Resources, 24/Junho/2000, Elsevier Ltd., Philadelphia, 2000.
- [1] <http://www.douro-turismo.pt/>. Junho/2013.
- [2] http://www.dn.pt/inicio/portugal/interior.aspx?content_id=3039575&seccao=Norte&page=-1. Junho/2013.
- [3] <http://visao.sapo.pt/duzentos-km-de-muros-de-xisto-reconstruidos-no-douro-custam-125meuro=f711388>. Junho/2013.
- [4] Projeto de Execução elaborado por GEG para Estradas de Portugal, S.A. *EN 222 – Estabilização da encosta contígua à EN 222 ao km 132+200 (LD)*. Setembro/2010.
- [5] Ramalho, J. *Influência do Teor de Humidade dos Terrenos na Estabilidade de Encostas*. Dissertação de Mestrado Integrado, FEUP, 2011.
- [6] Guichard, F., et al. *Port Wine*. Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, Porto, 2004.
- [7] Museu do Douro. *Arquitecturas da Paisagem Vinhateira*. Fundação Museu do Douro, Peso da Régua, 2008.
- [8] <http://www.ivdp.pt/>. Maio/2013.
- [9] Coleção Enciclopédia dos Vinhos de Portugal. *O Vinho do Porto, Vinhos do Douro*. Chaves Ferreira – Publicações, S.A., Lisboa, 1998.
- [10] SUVIDUR. *Manual de Boas Práticas Vitícolas na Região Demarcada do Douro*. Programa Operacional de Cooperação Transfronteiriça Espanha – Portugal, Régua, 2009.
- [11] Lourenço-Gomes, L., Rebelo, J. *Alto Douro Vinhateiro Património da Humanidade: a Complexidade de um Programa de Preservação*. UTAD, 2012.
- [12] Ribeiro, J. *Caracterização Genérica da Cultura da Vinha na Região Demarcada do Alto Douro*. Notícias do Douro – Semanário da Região Demarcada do Douro, 11/Fevereiro/2011, A Gráfica Duriense, Lda., Régua.
- [13] <http://malvedos.wordpress.com/glossary/>. Maio/2013.
- [14] Pereira, C. *Reestruturar a Vinha na Região Demarcada do Douro*. Centro de estudos vitivinícolas do Douro/ núcleo da vitivinicultura, Peso da Régua, 2008.
- [15] <http://www.sograpevinhos.eu/regioes/Douro/Vinha>. Maio/2013.
- [16] <http://www.quintadonoval.com/>. Maio/2013.

- [17] Fredlund, D. G., Rahardjo, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., E.U.A., 1993.
- [18] Fernandes, M. M. *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais – Volume I*. FEUP Edições, Porto, 2006.
- [19] Campos, L. E. P. *Influência da Sucção na Estabilidade de Taludes Naturais em Solos Residuais*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.
- [20] Soares, E. P. *Caracterizações Geotécnica e Mineralógica de um Filito Dolomítico do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao Estudo da Estabilidade de Taludes Incorporando a Sucção*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- [21] Yang, H. et al. *Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils*. Canadian Geotechnical Journal, Outubro/2004.
- [22] Fredlund, D. G. et al. *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, Março/1994.
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Water_cycle#cite_ref-1. Maio/2013.
- [24] <http://www.idfcurve.org/>. Maio/2013.
- [25] <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/10009/page03.cfm>. Maio/2013.
- [26] http://snirh.inag.pt/snirh/download/relatorios/prec_intensas_1000anos.pdf. Maio/2013.
- [27] <http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~carlosetuado/111Escoamento%20Superficial.pdf>. Maio/2013.
- [28] http://cee.uma.pt/hlima/Doc%20Hidraulica/0582Hidrologia_Metodo_Racional_SCS.pdf. Maio/2013.
- [29] Abramson, L. W et al. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, Inc., E.U.A., 2001.
- [30] <http://geology.er.usgs.gov/eespteam/brass/ground/groundintro.htm>. Maio/2013.
- [31] http://www.fullstop.com.au/HTMLfilesv2/000_OpeningPage/010_WhatIs/WhatIs.html. Maio/2013.
- [32] Cho, S. E., Lee, S. R. *Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Setembro/2002.
- [33] Turner, E. R. *Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation*. Dissertação de Mestrado, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2006.
- [34] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0032_talajtan/ch07s08.html. Maio/2013.
- [35] Jimeno, C. L. *Manual de Estabilización y revegetación de taludes*. U. D. Proyectos, Madrid, 2002.
- [36] Morgan, R. P. C., Rickson, R. J., *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Taylor & Francis, Londres, 1994.
- [37] <http://quintadasparcelas.blogs.sapo.pt/tag/reestrutura%C3%A7%C3%A3o/reconvers%C3%A3o> Junho/2013.
- [38] <http://vidaterra.wordpress.com>. Maio/2013.

- [39] Fredlund, D. G et al. *The relationship between limit equilibrium slope stability methods*. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981.
- [40] <http://www.roscience.com/products/8/feature/79>. Maio/2013.
- [41] Fernandes, M. Matos. *Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica – Volume II*. FEUP edições, Porto, 2011.
- [42] Cheng, Y. M., Lau, C. K. *Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight*. CRC Press, E.U.A., 2008.
- [43] Manual de Ajuda integrado no *software* Slide 6.0, da Rocscience Inc. Maio/2013.
- [44] <http://www.chasm.info>. Maio/2013.
- [45] Greenwood, J. R., et al. *Shallow slips in highway embankments constructed of overconsolidated clay*. Failures in Earthworks, Institution of Civil Engineers, 6/3/1985, Londres, Thomas Telford, 1985.
- [46] Rahardjo, H. et al. *Unsaturated soil mechanics for slope stabilization*. Unsaturated Soils: Theory and Practice 2011. Kasetsart University, Thailand, 2011.