

EFEITO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO NA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

BRUNO TIAGO BRITO DE JESUS

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

Orientador: Professor Doutor António Campos e Matos

Co-Orientador: Carmina Costa

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

Aos meus Pais

O bom humor é o maior encanto da vida

Ernst Renan

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos têm de começar obrigatoriamente pelo orientador e co-orientadora, que foram fundamentais para este trabalho. Uma palavra de apreço é aqui deixada pelo autor ao Engenheiro Campos e Matos pela simplicidade, simpatia e competência com que se dedicou a este trabalho. A mesma dose de dedicação foi utilizada pela Carmina que me incutiu responsabilidade e me ajudou a ultrapassar situações delicadas.

Não me posso esquecer, obviamente do pessoal do GEG com quem me fui cruzando, sempre disponível e solícito, de que é o seu maior exemplo, o Sérgio Pereira. Ao professor Couto Marques, um agradecimento pela forma como debelou as minhas dúvidas que ocorreram aquando das modelações.

RESUMO

A estabilidade de encostas é um tema que suscita particular interesse em países de topografia mista como é o caso de Portugal. Particularmente no Norte, mas não só, o relevo do território português mostra-se como sendo bastante irregular. Esta irregularidade nunca foi factor impeditivo da fixação de aglomerados populacionais nas encostas espalhadas pelo país. De facto, não só se verifica que se recorreu ao engenho para se edificar povoações como vias de comunicação foram sendo abertas ao longo dos tempos. Assim, o nosso país tem tradição e conhecimento neste campo do conhecimento. Contudo, a evolução da sociedade, da tecnologia, mudanças ambientais e o carácter singular que caracteriza tudo o que seja de origem natural obriga a que a investigação não finde e explore situações pouco examinadas.

A presença de água nos solos está identificada como sendo extremamente negativa no comportamento de encostas e taludes. A reacção dos solos face à presença de água é um tema de relevante importância na nossa sociedade, em termos de engenharia. O nosso país é afectado por fenómenos de precipitação regulares, tem um grande comprimento de costa banhada por mar e tem um elevado número de barragens, pelo que a água é presença obrigatória em obras de engenharia civil. O seu estudo é de elevada importância para que obras se façam em segurança.

Neste trabalho pretende-se estudar a influência que a precipitação e a descida abrupta do nível das águas de um rio têm nos níveis freáticos de encostas naturais. Pretende-se averiguar de que forma estas condições influenciam o factor de segurança das encostas. Recorrendo a ferramentas computacionais adequadas, pretende-se modelar duas situações principais: o efeito que a descida rápida do nível da água de um rio devido à construção de aproveitamentos hidroeléctricos que aproveitem a energia eólica; e o efeito que a precipitação tem nas encostas de cultivo do Alto Douro Vinhateiro. A importância da primeira situação reside no facto de virem a ser construídos aproveitamentos deste género no nosso país, pelo que é um tema que se reveste de actualidade. A segunda situação refere-se a uma zona do território muito particular de Portugal e com interesse crescente face ao seu potencial turístico e à aposta política que lá tem sido feita nos últimos tempos. Sugestões são feitas para que se investiguem assuntos relacionados com estas matérias

PALAVRAS-CHAVE: água nos solos, Alto Douro Vinhateiro, aproveitamentos hidroeléctricos e energia eólica, estabilidade de encostas

ABSTRACT

Slope stability is a topic that raises particular interest in countries with a mixed topography, such as Portugal. Specially, but not only in the North, the land relief of the Portuguese territory is extremely irregular. However, this irregularity never stopped the populations from fixing themselves to the slopes spread throughout the country. In fact, not only the populations have employed ingenious techniques to build villages but also pathways were built during the times among these natural slopes. Thus, the Portuguese has tradition and knowledge in this field. Nevertheless, the evolutions of the society and technology, environmental changes and the singularities which characterizes all the Nature related things forces the investigation to go further and explores less known situations.

The presence of water in the soils is identified as being extremely negative to the behaviour of slopes. The reaction of the soils when facing the presence of water is an issue of enormously magnitude in the Portuguese society, in terms of engineering. Portugal is affected by regular rainfall phenomena, has a large coast and a huge number of dams, whereby the water is an assiduous presence in civil engineering works. The study of the water in this context is very important so that works can proceed with safety.

In the present paperwork, is intended to study the influence that rainfall and the sudden drawdown of a river's water level has in the water table in natural slopes. Is intended to check how these features affect the factor of safety of slopes. Using adequate computerized tool, is intended to model two different situations: the effect that a rapid drawdown of the water lever of a river due to the construction of dam that use eolic energy; and the effect that rainfall has in the cultivated slopes of Alto Douro. The importance of the first issue is due to the fact that this type of dams will be built soon in Portugal, so this matter is quite current. The second issue is about a very particular piece of the Portuguese territory, with increasingly interest due to its touristic potential and to the political strength that is being made in the zone in the last few year

KEYWORDS: water in soil, Alto Douro Vinhateiro, eolic energy, slope stability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	2
2. NOVOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. COMPLEMENTARIDADE DAS ENERGIAS EÓLICA E HÍDRICA	6
2.3. APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DO FRIDÃO	9
3. O ALTO DOURO VINHATEIRO E A PRECIPITAÇÃO	11
3.1. INTRODUÇÃO	11
3.1.1. BREVE REFERÊNCIA HISTÓRICA	11
3.1.2. CONSEQUÊNCIAS DA INTERVENÇÃO HUMANA	12
3.2. PROPRIEDADES ÚNICAS DA REGIÃO DEMARCADA DO DOURO	14
3.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS	14
3.2.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	15
3.2.3. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE CULTIVO DE VINHAS	18
3.2.3.1. VINHA PRÉ-FILOXERA E VINHA TRADICIONAL	18
3.2.3.2. VINHA EM PATAMARES	20
3.3. LEGISLAÇÃO, ACIDENTES E A PRODUÇÃO DE VINHO	21
3.4. SITUAÇÃO ACTUAL E ACIDENTES	23

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
4.1. INTRODUÇÃO	25
4.2. SLOPE/W E SEEP/W	25
4.3. MÉTODO DAS FATIAS E O SLOPE/W	26
4.3.1. MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE.....	29
4.4. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL NO SEEP/W.....	31
4.4.1. O CICLO HIDROLÓGICO	35
5. CASOS PRÁTICOS E ANÁLISES	39
5.1. INTRODUÇÃO	39
5.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
5.2.1. DESCIDA RÁPIDA DO NÍVEL DA ÁGUA DE UM RIO	39
5.2.1.1. CASO 1	42
5.2.1.2. CASO 2	49
5.3. ALTO DOURO VINHATEIRO	52
5.3.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA.....	52
5.3.2. MODELAR A ENCOSTA	55
5.4. CONCLUSÕES	59
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Produtividade média mensal eólica em função da potência instalada (fonte: REN)	6
Figura 2.2 – Produção eólica horária na 2ª semana de Janeiro.	7
Figura 2.3 – Gráfico exemplificativo da complementaridade energia hídrica-eólica (EDP).	7
Figura 2.4 – Esquema da complementaridade Hídrica-Eólica (EDP).	8
Figura 2.5 – Distribuição das unidades geotécnicas na albufeira de jusante. (Fonte: GEG)	9
Figura 2.6 – Esquema em AutoCad do perfil transversal a analisar.	10
Figura 3.1 – Mapa da Região Demarcada do Douro.	12
Figura 3.2 - Equilíbrio entre Homem e Natureza: socacos numa encosta do Douro.	13
Figura 3.3 – Exemplo de mau enquadramento paisagístico no ADV.	14
Figura 3.4 – Distribuição espacial da precipitação média anual no Norte de Portugal. (Adaptado de SNIRH).	16
Figura 3.5 – Vinha pré-filoxera (esquerda) e vinha tradicional (direita).	19
Figura 3.6 – Esquematização da plantação da vinha em patamares.	20
Figura 3.7 – Patamares e Mecanização.	21
Figura 3.8 – Deslizamento numa encosta moldada em patamares.	22
Figura 4.1 – Método das Fatias.	26
Figura 4.2 – Esforços numa fatia: Método de Morgenstern-Price.	28
Figura 4.3 – Forças actuantes numa massa deslizando circular.	29
Figura 4.4 – Diferentes curvas de retenção: argila, silte e areia ('clay', 'silt' e 'sand')	34
Figura 4.5 – Ciclo da água.	35
Figura 4.6 – Variação típica do teor de humidade com a profundidade.	36
Figura 4.7 – Chuva Acumulada/Infiltração Acumulada pelo modelo de Green-Ampt.	37
Figura 5.1 – Perfil transversal e malha usada na análise.	39
Figura 5.2 – Curvas de condutividade/permeabilidade hidráulica e teor em água usadas na análise de estabilidade.	40
Figura 5.3 – Simulação do abaixamento do nível de água em 6 horas.	41
Figura 5.4 – Evolução do FS ao longo de um dia para um esvaziamento de 6 Horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.	42
Figura 5.5 – Comparação da evolução do factor de segurança para um $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s e vários tempos de esvaziamento.	43
Figura 5.6 – Alteração do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.	44
Figura 5.7 – Evolução da percentagem do teor em água em 3 dos pontos constantes da figura 5.6.	44
Figura 5.8 – Alteração do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s.	45

Figura 5.9 – Variação do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s. .	45
Figura 5.10 – Nível freático em três tempos diferentes.	46
Figura 5.11 – Variação da percentagem do teor em água em vários pontos da malha.	46
Figura 5.12 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.....	47
Figura 5.13 – Comparação do nível freático mínimo (esquerda) e factor de segurança mínimo (direita).	47
Figura 5.14 – Evolução das pressões neutras para um tempo de esvaziamento de 6 horas com $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.	48
Figura 5.15 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas com $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.	48
Figura 5.16 – Ciclo de esvaziamento usado para simular o caso 2.	49
Figura 5.17 – Evolução do factor de segurança com permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.	50
Figura 5.18 – Evolução do teor em água (à esquerda) dos pontos dentro da zona assinalada à direita	50
Figura 5.19 – Evolução do factor de segurança.	51
Figura 5.20 – Evolução do somatório das pressões neutras ao longo da superfície crítica de deslizamento.	51
Figura 5.21 – Polígonos de Thiessen de 27 postos udográficos.	53
Figura 5.22 – Curvas IDF dos três postos considerados. O período de retorno admitido foi 1000 anos.	54
Figura 5.23 – Curva de precipitação usada no SEEP/W como condição fronteira.	55
Figura 5.24 – Modelação da encosta em patamares de 2 metros de largura e cerca de 2,5 m de espessura mínima.	56
Figura 5.25 – Gráficos das funções de permeabilidade e teor em água da função #5, usadas no solo remexido.	57
Figura 5.26 – Gráficos das funções de permeabilidade e teor em água da função #16, usadas no solo da encosta.	57
Figura 5.27 – Situação inicial.	58
Figura 5.28 – A meio da chuvada.	58
Figura 5.29 – No fim da chuvada.	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados do clima em locais da RDD (1931-60).....	16
Tabela 3.2 – Precipitação média mensal (1992-02).	18
Tabela 4.1 – Equações de estática usadas em cada método.	31
Tabela 5.1 – Parâmetros da função utilizada.....	40
Tabela 5.2 – Dados utilizados para a análise de estabilidade das encostas.	41
Tabela 5.3 – Parâmetros a e b usados na equação 2.13 para obter curvas IDF.	53
Tabela 5.4 – Valores da intensidade de precipitação para uma chuvada de 30 minutos. Tempo de retorno de 1000 anos.	54
Tabela 5.5 – Dados utilizados situação 1.	57

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ADV	Alto Douro Vinhateiro
PNBEPH	Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hídrico
EDP	Energias de Portugal
REN	Rede Energética Nacional
GEG	Gabinete de Estruturas e Geotecnia
RDD	Região Demarcada do Douro
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
a	Declive Inicial
b	Declive Final
EN	Estrada Nacional
FS	Factor de Segurança
PIOT-ADV	Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território do Alto Douro Vinhateiro
Mr	Momento Resistente
Ms	Momento Instabilizador
Fv	Forças Verticais
Fh	Forças Horizontais
M	Momentos
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
dW	Peso da Fatia
P _w	Pressão Neutra no Contorno da Fatia
dP _b	Pressão Neutra Resultante na Base da Fatia
E	Esforços Entre Fatias
T	Esforços Entre Fatias
ds	Força Resistente de Corte
I	Intensidade de Precipitação [mm/h]
k-Sat	Permeabilidade de Saturação [m/s]
Θ	Teor em Água Volumétrico []
AEV	Air Entry Value [kPa]
P	Precipitação Total
Q	Runoff
E	Evapotranspiração
ΔW	Variação do Nível do Reservatório
I	Variação de Humidade do Solo
χ	Perdas Adicionais
k	Coefficiente de permeabilidade [m/s]
φ´	Ângulo de atrito efectivo do solo [°]

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A estabilidade de encostas e taludes é tema recorrente quando se fala em Geotecnia. Várias obras e estudos existem sobre esta temática. A estabilização de taludes é necessária quando obras rodoviárias ou ferroviárias são realizadas. A escavação e/ou construção de aterros origina taludes que é necessário, por razões de segurança, estabilizar. O estudo deste tipo de taludes é necessário e várias análises desta temática existem. O assunto a que diz respeito a estabilidade de encostas naturais é mais complexo e, por isso, de mais difícil análise [1]. A necessidade de assegurar a segurança de encostas naturais é uma urgência do mundo actual. No mundo desenvolvido, repleto de sociedades exigentes, é cada vez mais indispensável assegurar a segurança de todos em todas as situações. A valorização da vida humana é cada vez maior e a aceitação da sociedade face a acidentes é cada vez menor. Confrontada com acidentes com origens naturais, como as chuvas por exemplo, a sociedade tende a reagir com inquietação. A ideia, errada, de que todas contingências podem ser evitados e/ou acautelados está, em certa medida, impregnada no pensamento geral. Assim, a ética, política e responsabilidade civil forçam toda a sociedade a minimizar todas as possíveis situações de que possam resultar perigo para os cidadãos. Cabe, então, na proporção devida, à engenharia civil aumentar a segurança das construções que edifica. No caso das encostas, cabe-lhe o saber dos factores que podem originar instabilidade e, conseqüentemente, colocar em risco a qualidade de vida das populações. Existem factores identificados que originam instabilidade nas encostas. Os principais factores que podem originar problemas de estabilidade com conseqüências mais ou menos graves são:

- As condições de água no solo;
- Agentes erosivos;
- Acção Humana (escavações realizadas no pé das encostas, por exemplo);
- Acção sísmica.

Das causas enumeradas, a acção sísmica é aquela que, em Portugal, menor efeito tem na instabilidade de encostas. Não sendo uma zona tipicamente sísmica, há um risco moderado de ocorrência de sismos no território continental de Portugal. Regista-se, contudo, que o último grande sismo a dar-se em Portugal ocorreu em 1755. O grande hiato de tempo que medeia a ocorrência de sismos na região do mundo onde o território português se encontra sempre levou a um menor estudo deste fenómeno quando comparado com os restantes. Porém, tal estudo não deve ser negligenciado ou esquecido em obras de elevada envergadura. No pólo oposto estão as condições de água no solo, acção humana e acções erosivas. A construção desregrada ou alteração da fisionomia das encostas potencia uma redução da estabilidade das mesmas. Contudo, este trabalho pretende focar o seu estudo naquela que

será a causa mais frequente na instabilidade de encostas: as condições de água no solo. Escorregamentos e outros fenómenos decorrentes da variação das condições da água no solo são frequentes. O fenómeno da variação do nível freático está ligado à precipitação e ao esvaziamento/enchimento das albufeiras das barragens. A maior ou menor capacidade dos solos se adaptarem à variação da quantidade de água influencia e modifica as características dos solos, saturando-os, originando uma diminuição do chamado factor de segurança, podendo inclusivamente originar fenómenos de vertente.

Sendo a precipitação um fenómeno usual em Portugal e a descida rápida do nível das águas nas albufeiras das barragens um tema actual, optou-se por focar o estudo nestes dois casos. A construção de barragens que usam, alternadamente, as energias hídrica e eólica para que destas se possam obter maiores rendimentos é actual e a sua importância inegável

1.2 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A construção de barragens que compatibilizam as energias hídrica e eólica será, em breve, uma realidade no nosso país. A política energética seguida actualmente assim o indica. Em traços gerais, o que resulta da construção deste novo tipo de aproveitamentos é o facto de o esvaziamento se vir a efectuar em intervalos de tempo curtos: cerca de 6 horas. Esta nova realidade merece ser estudada e a sua importância reconhecida.

Análises acerca de precipitações nunca são em excesso quando se trata da instabilidade de encostas. Os fenómenos meteorológicos são variados e numerosos. As diferentes condições em que acontecem e a sua imprevisibilidade tornam-na em tema central e fulcral no estudo da estabilidade de encostas. As diferentes condições ambientais existentes, hoje em dia, colocam as sociedades em alerta para os novos fenómenos meteorológicos. Situações como chuvadas repentinas após grandes períodos de seca têm mais tendência a acontecer, assim como fortes e violentos aguaceiros. O planeta não está a acompanhar o ritmo de transformações imposto pelo ser humano, pelo que a regularidade com que fenómenos extremos se verificam um pouco por todo o planeta está a aumentar, não sendo Portugal uma excepção. É imbuído deste espírito que este trabalho pretende esta temática e aplicá-la a uma região importante do território: o Alto Douro Vinhateiro. Por razões de interesse estratégico e por ser uma região pouco estudada a este nível, as encostas do Alto Douro Vinhateiro afiguram-se como ideais para serem aqui abordadas. Embora seja uma região antiga e relativamente conhecida, o Alto Douro nem por isso está bem documentado. Existem situações particulares que não foram ainda estudadas e que merecem particular atenção. Sendo um território de cariz patrimonial, acresce o interesse pelo conhecimento e caracterização mais pormenorizada das situações que grassam naquela zona. O aprofundamento do saber e uma melhor compreensão dos fenómenos associados ao Douro são de todo o interesse. Nos últimos anos, a produção vinícola na Região Demarcada do Douro tem-se alterado, evoluindo da tradicional modelação de socalcos com muros de suporte, para uma modelação em patamares. Esta mudança tem provocado inúmeros escorregamentos, alguns deles de magnitude importante, com impactes negativos na região. Em particular no Inverno de 2009-2010, em que ocorreram quedas significativas de chuva, o referido problema foi particularmente grave. Pretende-se neste trabalho mostrar uma metodologia de avaliação de segurança que possa, depois de devidamente aplicada a dados ponderados, ser transformada em recomendações na modelação das encostas e construção de socalcos. Apesar de se ter a noção que os problemas em causa são excessivamente recentes para que se possa ter elementos que sustentem as análises pretendidas, considerou-se útil dar início ao trabalho e apresentar uma metodologia que permita o estudo destes casos. Com a obtenção de

resultados de ensaios, em curso, da caracterização do terreno em função do teor de humidade, saturação, drenagem, entre outros parâmetros, é que será possível desenvolver os estudos pretendidos.

Este trabalho tem como objectivo proceder a análises em campos pouco explorados até agora. Embora o estudo da influência da descida rápida do nível das águas em albufeiras de barragens não seja um tema novo, o caso a abordar é algo relativamente diferente. A descida analisada neste trabalho é registada num espaço de horas, o que é, de facto, novo. O interesse reside em perceber se e de que forma esta situação afecta o comportamento das encostas. Assim, os objectivos ao estudar este caso passam pela análise da influência da variação do nível freático nos valores do factor de segurança recorrendo à modelação computacional. Esta simulação, feita recorrendo ao GEOSTUDIO 2004 pretende retirar relações entre as variações no factor de segurança e as condições de água no solo impostas pela descida rápida do nível das águas do rio.

No que respeita ao Alto Douro, pretende-se, usando o mesmo software, explorar a relação que as condições pluviométricas têm na estabilidade das encostas cultivadas ao longo do traçado do rio. Tendo por certo que esta tarefa aparenta ser de difícil execução face à pouca exploração do tema, o objectivo primordial passa mais por estimular e contribuir com novas linhas de investigação do que obter conclusões. A complexidade do tema pode, inclusivamente, levar a que outros estudos sejam feitos, com mais pormenor e mais extensos, podendo destes retirar algumas conclusões.

Este trabalho é constituído por 6 capítulos, em que o primeiro se revela como sendo uma primeira abordagem ao tema geral. Os capítulos 2 e 3 abordam, explicam e contextualizam as situações modeladas e analisadas. O quarto capítulo é uma resenha de alguns conceitos teóricos usados pelo software que foi empregue na realização das análises. Tece-se também algumas considerações no que concerne ao modo de simulação da precipitação. O quinto capítulo é aquele em que se explica os procedimentos adoptados e se expõe os dados recolhidos durante as análises. Proceda-se ainda a uma discussão dos resultados no quinto capítulo antes de se fazerem as considerações finais e explanar as conclusões no sexto e último capítulo.

2

NOVOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉCTRICOS

2.1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens traz, como qualquer outra obra, consequências. Dependendo do tipo e tamanho da barragem, tais consequências podem atingir patamares demasiado elevados, pondo em risco o ambiente e/ou populações. Quando uma barragem é projectada para ter uma grande albufeira, a consequente elevação do nível das águas pode levar, por exemplo, ao desaparecimento de povoações e habitats naturais. Um exemplo disso está presente na barragem do Alqueva. A construção da barragem o enchimento da albufeira levou a que uma nova Aldeia da Luz tivesse de ser construída noutra local para compensar o desaparecimento da povoação original. Este é apenas um dos possíveis impactes que uma construção deste calibre potencialmente origina. A realização de estudos de impacte ambiental é, então, indispensável, para perceber que implicação tem a construção e entrada ao serviço de uma barragem na sociedade e na paisagem.

Uma das consequências mais estudadas em sede da geotecnia é o rebaixamento rápido da altura da água nas albufeiras das barragens. Por ‘rápido’ entende-se, normalmente, o abaixamento da água em cerca de um ou mais dias. Com o Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hídrico (PNBEPH) [2], tal definição atinge outro sentido. O PNBEPH apresenta os seguintes objectivos gerais:

- Contribuição para as metas de produção de energia com origem em fontes renováveis;
- Redução da dependência energética nacional;
- Redução de emissões de gases com efeito de estufa. [3]

A construção e reforços de potência de vários aproveitamentos hidroeléctricos em Portugal visa aumentar a capacidade de algumas empresas do ramo energético em produzir energia eléctrica e traduz um investimento significativo tanto público como privado. Das empresas a quem foram adjudicadas obras, contam-se a Iberdrola, Endesa e EDP (Energias de Portugal). Destas, EDP é a que irá utilizar a energia eólica como complemento à hídrica, pelo que será referida com mais ênfase ao longo deste trabalho. A construção de 5 novos aproveitamentos hidroeléctricos e 6 reforços de potência de aproveitamentos já existentes por parte de EDP não é aqui colocado em causa nem alvo de estudo. O que se pretende estudar é o impacto para os níveis freáticos e estabilidade de encostas que os novos aproveitamentos e reforços de potência dos aproveitamentos podem ter. A construção de barragens e consequências a ela associadas não é tema novo. Novidade é o tipo de barragens que irão, previsivelmente, ser erguidas. De modo a rentabilizar os investimentos feitos na área das energias renováveis, a EDP pretende aproveitar a energia eólica e conciliá-la com a energia hídrica. Este aproveitamento é feito à custa de um rebaixamento mais rápido do que é considerado ‘rápido’. A EDP

prevê, em certos casos, descidas do nível da água na ordem dos 9 metros em apenas 4 ou 6 horas, dependendo da quantidade de energia que for necessário fornecer às populações nos períodos de maior exigência. É sobre esta nova situação que recai o estudo presente neste trabalho. Apresenta-se neste capítulo uma breve explicação do modo como se pretende aproveitar a energia eólica.

2.2 COMPLEMENTARIDADE DAS ENERGIA EÓLICA E HÍDRICA

A eficácia do plano político vigente em questões energéticas extravasa em larga medida o conteúdo deste trabalho. Contudo, uma explicação sobre a nova forma de rentabilizar os investimentos é nesta fase feita para apreender alguns conceitos. Com vista a adquirir independência energética, Portugal tem tentado apostar nas energias renováveis em detrimento das energias fósseis, como o petróleo, da qual está dependente de outros Estados. É este contexto que tem levado a um investimento significativo na construção de parques eólicos, barragens e na investigação do aproveitamento da energia proveniente nas ondas do mar. A construção de parques eólicos vai-se multiplicando um pouco por todo o país, constituindo uma forte aposta justificada pelas excelentes condições existentes em Portugal para a produção eólica [4]. Colocadas em pontos estratégicos, os aerogeradores aproveitam a força do vento para produzir energia. Reconhecido e conhecido por todos é o facto de esta energia ser limpa e renovável. Já a sua eficácia e aplicabilidade são mais questionáveis. Tirando partido das características do território e com o intuito de diversificar a origem das energias renováveis, o aumento em larga medida do parque eólico é uma realidade. No entanto, o grande aumento da potência instalada levanta simultaneamente problemas técnicos [4]. Estas questões técnicas associadas ao próprio funcionamento de cada aerogerador levam alguns a questionar a legitimidade de uma aposta tão grande nesta energia. A produção de energia eólica é extremamente irregular e de difícil previsão. Este facto levanta problemas de rendimento. A irregularidade de que se fala não diz respeito à distribuição da produção de energia ao longo do ano. A distribuição da produção de energia aparenta ser mais ou menos uniforme, ocultando nos valores médios a discrepância que existe na produção (figura 2.1).

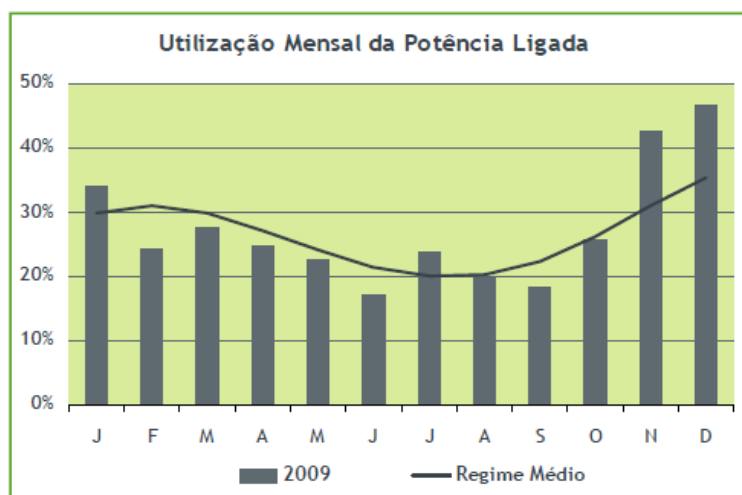


Fig. 2. 1 – Produtividade média mensal eólica em função da potência instalada em 2009.[5]

Ao longo dos meses, grandes picos diários são atingidos, tal como dias de produção muito fraca. Também durante o dia, a produção varia, sendo o período nocturno aquele que, por norma, tende a produzir mais energia. Assim, há tendência para produzir mais energia durante a noite (figura 2.2), em

que o consumo é menor, e uma tendência para uma redução da produção durante o dia, quando os consumos são maiores.

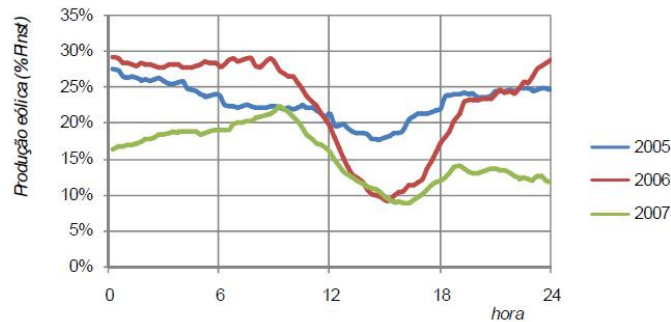


Fig. 2. 2 – Produção eólica horária na 2ª semana de Janeiro.

Aliando a ininterrupta actividade dos aerogeradores à escassa utilização de energia eléctrica durante a noite e ao elevado volume de vento existente no mesmo período, um problema de rentabilidade surge. A energia produzida está a ser desperdiçada pois não é vendida. A hipótese da energia ser vendida a Espanha é posta de parte, uma vez que também em Espanha há o mesmo problema de produção de energia excedentária. Esta questão provoca claramente problemas cuja resolução passa pela existência de equipamentos geradores de reserva capazes de poderem entrar ou sair do serviço de forma a complementarem a energia eólica. As centrais hidroeléctricas apresentam características de rapidez de entrada ao serviço e flexibilidade de operação que as tornam adequadas como complemento à energia eólica. Além dos equipamentos hidroeléctricos convencionais, recorrer-se-á à instalação de equipamentos reversíveis. Este equipamento possibilitará a sua intervenção quer quando a produção de energia for inferior à prevista quer quando ela for superior. Neste último caso, a energia eólica excedentária será usada para bombear água para um reservatório superior, sendo aí turbinada mais tarde quando as necessidades forem maiores e/ou quando a produção de energia eólica for menor. Os aproveitamentos reversíveis funcionarão então como acumuladores de energia eólica.

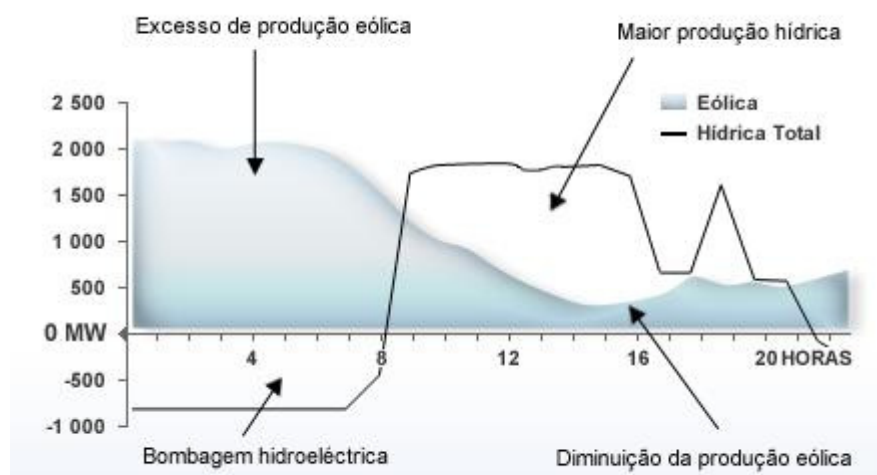


Fig. 2. 3 – Gráfico exemplificativo da complementaridade energia hídrica-eólica (EDP) [7].

A legitimidade e rentabilidade energética desta estratégia é discutível e posta em causa por autores especializados em energias renováveis [6]. Este estudo não pretende nem tem poder para colocar em causa tais estratégias, mas talvez esta explicação permita perceber porque é esta estratégia pouco utilizada e constitua uma novidade.

O aproveitamento do Alvito irá utilizar a estratégia de rentabilização de energias mencionada. Como foi dito, durante o dia a água é turbinada de modo a produzir energia, reduzindo o nível de água da albufeira. Durante a noite, a energia eléctrica produzida pelos parques eólicos é usado para bombear a água de volta para as albufeiras, elevando o nível das águas. Este bombeamento só é possível porque os aproveitamentos são constituídos por dois volumes.

No caso do aproveitamento específico do Fridão, prevê-se a construção do Escalão Principal e da Barragem de Jusante, que servirá para regularizar caudais. Está prevista uma variação diária do nível de água na albufeira de jusante na ordem dos 9 metros. Prevê-se que estas oscilações do nível da água variem entre 4 e 6 horas. Em todo o trabalho, o aproveitamento do Fridão é descrito como sendo um daqueles que aproveita a energia eólica no seu funcionamento e que esse facto origina variações no nível da água da albufeira de jusante. Tal não é verdade. As variações que irão existir devem-se, apenas e só, à necessidade de regularizar caudais. Assim, o fenómeno que se aborda neste trabalho acerca desta temática é fictício e o enquadramento efectuado é desnecessário. O que se constata é que irão haver oscilações no nível da água da albufeira de jusante, mas não como resultado da compatibilização das energias eólica e hídrica. À data da elaboração deste trabalho, o autor considerou precisamente a situação contrária e, por isso, assume a sua quota-parte de responsabilidade. O estudo realizado neste documento é, assim, fictício e não tem como base o retrato de uma situação real.

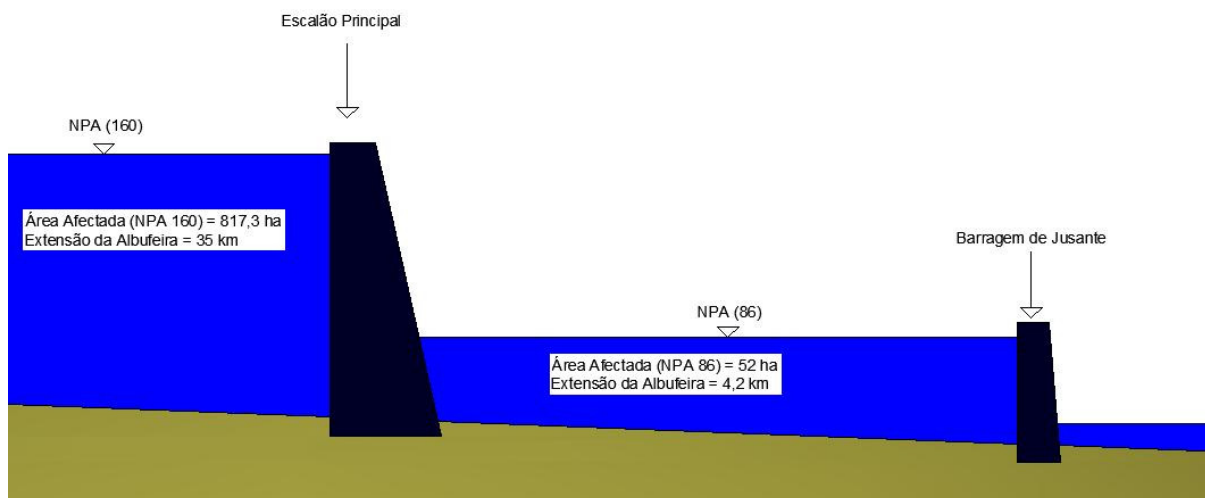


Fig. 2. 4 – Esquema do Aproveitamento do Fridão (EDP).

2.3 APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DO FRIDÃO

Estando mais a Norte, o aproveitamento do Fridão afigura-se como uma boa opção para estudar o fenómeno em causa. Inseridos no PNBEPH estão o projecto e estudos sobre todas as barragens que irão, em princípio, ser construídas. Como resultado disso, bastante informação está disponível para consulta, embora muita dela seja ainda resultante de estudos preliminares.

Da informação disponível, há a salientar as características onde o aproveitamento será construído. Não havendo nesta fase recolha de amostras, os dados constantes na documentação relativa ao Fridão e características da envolvente são oriundos da análise de documentos já existentes, como a carta geológica nacional e carta geológica regional. Assim, e usando a informação afecta à zona da albufeira, é possível sustentar que predominam as formações metassedimentares e granitos, sendo o relevo típico da morfologia destes afloramentos. A região envolvente é relativamente plana, existindo, contudo, inúmeros vales onde linhas de água pouco profundas se encaixam. Estas linhas de água ramificam-se conferindo uma morfologia característica, representada por uma série de cabeços, de formas relativamente arredondadas e de vales apertados. O local onde irá ser implantada a barragem é um vale apertado e profundo, relativamente assimétrico, com vertentes íngremes e elevadas.

A zona que interessa analisar é a da albufeira de jusante. Aí, as unidades geotécnicas identificadas, como resultado de um estudo preliminar efectuado pelo Gabinete de Estruturas e Geotecnia (GEG), foi de três tipos: Granito, Metassedimentos e Corneanas (figura 2.5).

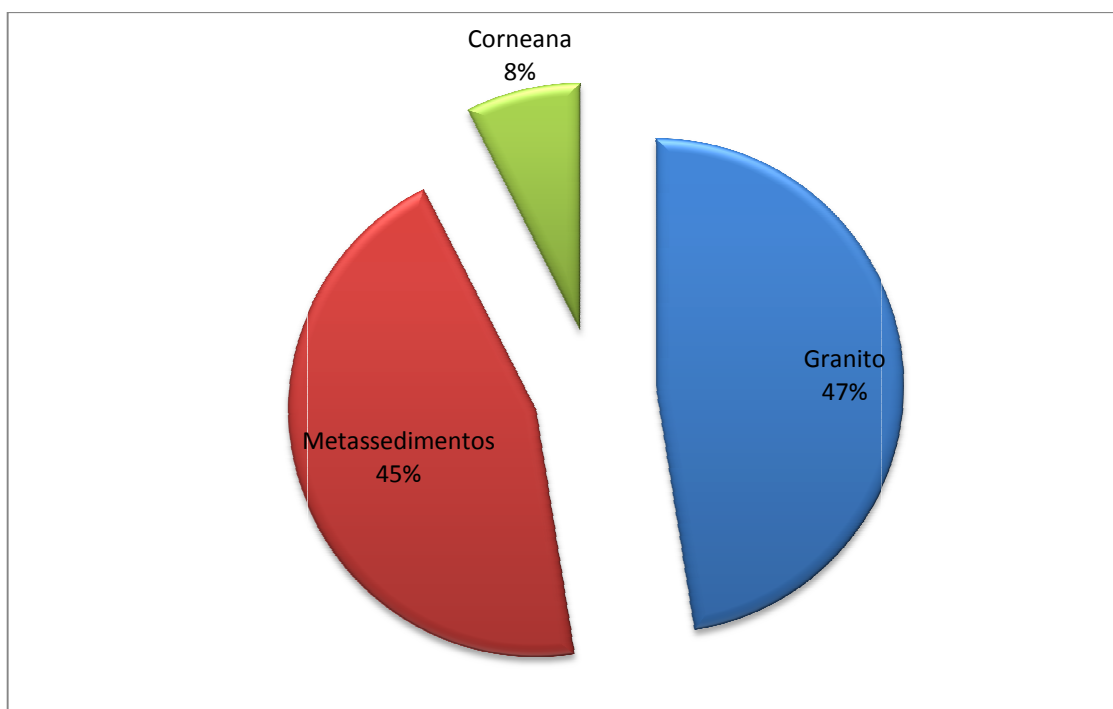


Fig. 2. 5 – Distribuição das unidades geotécnicas na albufeira de jusante. (Fonte: GEG)

Verifica-se que a presença de Granito é predominante (47,5%) a par dos Metassedimentos (45%), enquanto a unidade geotécnica Corneana está apenas presente em percentagem residual (7,5 %). De modo sintético, o estudo prevê que a unidade geológica denominada Corneana seja aquela que menos problemas venha a originar. No caso do Granito, verifica-se que os maciços são compostos por núcleos de grandes massas rochosas compactas de forma circular (bolas graníticas). A envolver estas bolas graníticas está um solo residual granítico arenoso, saibro granítico, muito permeável. Este

material está sujeito a ser arrastado pela água, como resultado da variação do nível da água do rio. Daí pode resultar o descalçamento das bolas graníticas e consequente queda destas. Este fenómeno é de difícil modelação computacional, pelo que se optou por estudar as consequências previsíveis nos Metassedimentos. Esta unidade geotécnica é um solo residual xistente com características próximas de um solo silto-argiloso. Este solo, mais impermeável que o Granito, pode potencialmente originar problemas devido à capacidade de retenção de água que tem. O lençol freático pode não acompanhar a descida rápida do nível da água, devido à capacidade de reter água que o solo possui. A dificuldade em dissipar a água existente no solo devido a essa descida pode ou não provocar instabilidade nas encostas e é isso que se pretende avaliar neste trabalho. Como tal, considerou-se na modelação computacional que toda a encosta é constituída por solo residual xistente. Esta simplificação permitiu uma modelação menos complexa da situação real, transformando-o num caso académico.

Quanto à informação topográfica, escolheu-se uma secção do transversal do rio com inclinações assinaláveis e onde o vale é bastante profundo e encaixado. A altura desde o leito do rio até à cota máxima é, como alude a figura 2.6 de cerca de 125 metros. O rio corre no fundo do vale com uma altura de água estimada à volta dos 10 metros. Assim, uma primeira avaliação, levou a que as encostas fossem encurtadas. A ideia inicial passava por analisar as encostas de ambas as margens quanto à estabilidade, por terem declives diferentes. Contudo, como se argumenta adiante, houve factores que condicionaram esta ideia. Não sendo possível analisar ambas as margens, a opção passou pela escolha do estudo da análise da encosta com maior declive junto do leito do rio. Essa encosta é a direita¹ da figura 2.6. É sobre essa margem que todo o estudo referente ao caso dos aproveitamentos irá incidir.

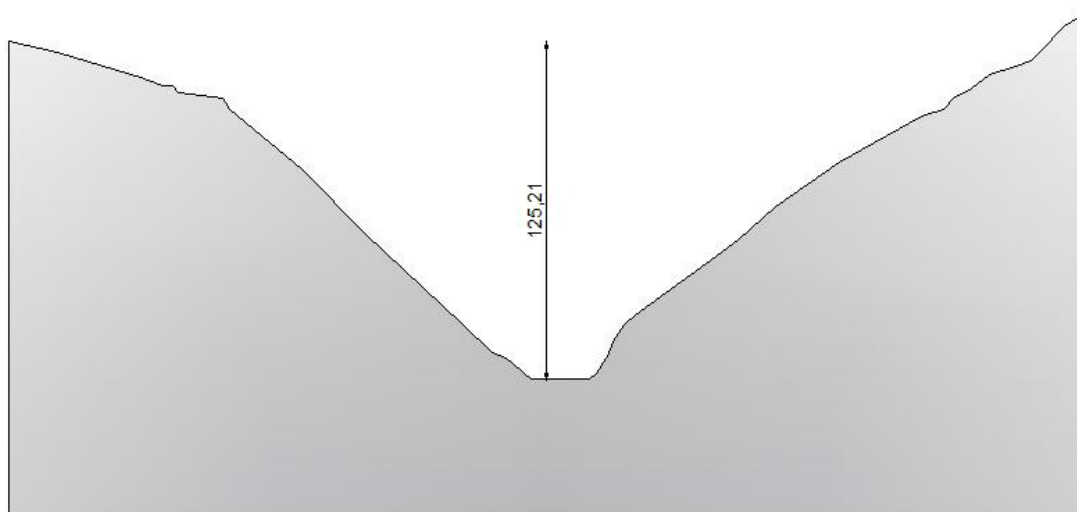


Fig. 2. 6 – Esquema em AutoCad do perfil transversal a analisar.

¹ 1 - A encosta da direita da figura corresponde, na realidade, à margem esquerda do rio Tâmega. Ao longo do trabalho, são mencionadas a encosta e margem direita. Por simplicidade, lado direito mencionado é o da figura 2.6 e não o da realidade.

3

O ALTO DOURO VINHATEIRO E A PRECIPITAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

A importância da Região Demarcada do Douro (RDD) para o nosso país é inegável e inquestionável. Apresentando características naturais únicas, a RDD viu de tal forma reconhecida a sua importância que, em 2001, uma parte do seu território foi reconhecida pela United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) com o título de Património Mundial: o Alto Douro Vinhateiro (ADV) [8]. O ADV refere-se a uma zona relativamente pequena onde o Vinho do Porto é produzido. É uma zona situada ao longo do traçado do rio Douro.

Com características paisagísticas únicas aliadas a uma topografia repleta de encostas naturais, a RDD assumiu-se, assim, como o local escolhido para análise neste trabalho. À beleza reconhecida, especialmente ao ADV, associam-se problemas de movimentos de vertente, desde há muito identificados, mas nem por isso totalmente resolvidos. Uma panóplia de factores associa-se de modo peculiar para que aquela região se torne única também na forma como se lida com os problemas geotécnicos. A precipitação é, desde há muito tempo, o maior factor causador de instabilidades. Uma análise aos efeitos na estabilidade de encostas devido à precipitação é abordada neste trabalho.

3.1.1 BREVE REFERÊNCIA HISTÓRICA

Estendendo-se por mais de 250.000 hectares (dos quais, cerca de 10% afectos ao ADV), a RDD nasceu no século XVIII pela mão do homem que viria a ser conhecido por Marquês de Pombal. A necessidade da criação de uma região demarcada surgiu de um misto de acontecimentos, especificidades e particularidades que, em conjunto e de modo único, proporcionaram o nascimento da primeira Região Demarcada e Reconhecida em todo o mundo. O registo da produção de vinho na RDD data de há, pelo menos, 2000 anos. Fruto de condições meteorológicas e topográficas únicas, os homens e mulheres que habitaram aquela área cedo se aperceberam do potencial das encostas soalheiras e das características favoráveis do solo para a produção do Vinho do Porto. A vitivinicultura tornou-se parte integrante do modo de vida das gentes daquela região.



Fig. 3. 1 – Mapa da Região Demarcada do Douro.

Os registos de produção de vinho tornam-se mais intensos após a queda do Império Romano (séc. III-IV). Durante séculos, as gentes do Douro dedicaram-se à produção de vinho e à adaptação do terreno natural às suas necessidades por meio de construção de socalcos. O equilíbrio entre Natureza e Homem permitiu a produção de um vinho generoso, bastante apreciado cujas características são inimitáveis.

A dada altura, séculos mais tarde, a produção de vinho aliou a arte ao negócio, extremamente lucrativo por sinal, devido ao facto deste vinho ser bastante apreciado pelos ingleses. O gosto dos britânicos originou uma elevada quantidade de exportações do vinho produzido no Norte de Portugal para a ilha Britânica, facto que iria, mais tarde, baptizar o produto como Vinho do Porto. Não sendo produzido no Porto, este era transportado de barco a partir de lá para Inglaterra. Resultado deste sucesso nas relações comerciais, bastante lucrativas, começaram a aparecer falsificações de outras regiões e adulterações do vinho original, de menor qualidade. Tornou-se, então, necessário delimitar a região de onde provinha o vinho de modo a não comprometer as relações comerciais com a nação que viria a inventar o futebol. Nascia a Região Demarcada do Douro em 1756 [9].

Desde então, a RDD tem passado por várias etapas de mudança. Surgiram novas técnicas de produção de vinho, a região foi afectada por pragas, guerras eclodiram pelo mundo, crises assolaram Portugal e Europa, mas, de uma forma ou de outra, a produção de Vinho do Porto manteve-se viva e o negócio de boa saúde. Hoje em dia, o Vinho do Porto é uma marca mundialmente conhecida e o ADV reconhecido como um dos mais belos locais onde se produz vinho.

3.1.2 CONSEQUÊNCIAS DA INTERVENÇÃO HUMANA

A importância do Vinho do Porto na RDD é enorme. A simbiose entre Natureza e actividade humana existente durante séculos na RDD é, ainda hoje, perfeitamente visível. O ténue equilíbrio entre a produção de vinho e os condicionalismos impostos pela Natureza está patente nas encostas do Douro ao longo de vários quilómetros, figura 3.2.



Fig. 3. 2 – Equilíbrio entre Homem e Natureza: socalcos numa encosta do Douro.

A moldagem das encostas por parte do Homem ao longo de tantos séculos transformou a paisagem da região. Os antigos viticultores do Douro construíram os muros, armaram a encosta em socalcos, plantaram a vinha seguindo curvas de nível, colonizaram o solo com elevadas densidades e fizeram obras de arte na condução de águas [10]. As alterações introduzidas pelos homens nas encostas acarretaram consequências. Positivas e negativas. As consequências positivas foram já, na sua maioria mencionadas e são reconhecidas e enaltecidas pela população em geral: a produção de um vinho único e criação de um negócio lucrativo fruto desta; e a atribuição do título de Património Mundial ao ADV. Cabe então à engenharia civil apontar consequências negativas, porque, em boa verdade, nem tudo é positivo. Nem o podia ser. A alteração profunda dos perfis das encostas trouxe consigo problemas associados à instabilidade de taludes e a complicações na abertura de vias de comunicação por entre as encostas vinhateiras.

A maneira de conciliar aspectos positivos e negativos de forma a manter o equilíbrio entre as necessidades específicas da região e segurança tem exigido, especialmente por parte da engenharia civil, soluções muitas vezes inadequadas aos problemas intrínsecos à RDD. A busca pelo equilíbrio entre Homem e Natureza continua ainda hoje em dia, com a balança a pender para o lado da Natureza desde que o ADV foi considerado Património Mundial. A necessidade, inegável, de preservar intactas a região e suas propriedades esbarra muitas vezes com a urgência em estabilizar encostas ou proteger vias de comunicação, por exemplo. É deste ténue equilíbrio que resulta grande parte dos problemas abordados neste trabalho e referidos com particular ênfase neste capítulo.



Fig. 3. 3 – Exemplo de mau enquadramento paisagístico no ADV.

3.2 PROPRIEDADES ÚNICAS DA REGIÃO DEMARCADA DO DOURO

3.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS

O facto de no Douro se produzir um vinho com características únicas não é fruto apenas do labor e sacrifício das gentes durienses. A Natureza, como referido, interpreta um papel tão ou mais importante neste enredo intrincado e complexo. O rio Douro e seus afluentes desenvolvem-se por entre vales apertados e fortemente encaixados, com profundidades muitas vezes superiores a 200 metros [11]. Esta tipologia do terreno origina condições climáticas também elas especiais. Tais condições serão abordadas ainda dentro deste subcapítulo. Uma das consequências da existência destes vales fortemente encaixados é, naturalmente, o surgimento de encostas com elevada exposição ao Sol, o que condiciona a qualidade do vinho. Em regra, é nas vertentes soalheiras (viradas para Sul) que existem as melhores condições para a produção de vinho, uma vez que a maturação das uvas é influenciada de modo positivo pelo elevado grau de insolação. Embora haja casos excepcionais, devido a níveis elevados de secura, esta é a regra geral.

O carácter geológico da RDD revela-se fundamental para a cultura da vinha. A RDD encontra-se maioritariamente sobre uma formação geológica denominada complexo xisto-grauváquico ante ordovício. Autores especializados consideram o vinho oriundo de terrenos xistosos de qualidade superior aos dos terrenos graníticos [11] pelo que a localização deste complexo na RDD não é um simples acaso. A forma como a natureza xistosa dos terrenos se relaciona com a qualidade dos vinhos desvia-se do âmbito tanto deste capítulo como do trabalho, mas não deve ser negligenciado ou desvalorizado. A relação entre vinho e o xisto e o modo como as gentes durienses souberam tirar partido dela é um dos factores que permitiu o surgimento de um vinho único. Importa perceber que existem também afloramentos graníticos na região, mas por uma questão percentual, deve ser dado particular ênfase à predominância do xisto. Embora de modo grosseiro, pode-se assumir que o vinho de qualidade superior proveniente do ADV tem origem em terrenos xistosos.

O modo como o rio Douro se encaixa na vertentes varia. Os declives existentes na RDD não são homogéneos, como é apanágio da Natureza, tendo alguns deles declives bastante elevados. A maioria das vinhas instaladas na região encontra-se em terrenos com declives compreendidos entre 30% e 70%. Dos 250.000 hectares de vinha da região, mais de 90% encontra-se estabelecido em declives superiores a 40% [11]. O cultivo da vinha em tais declives não foi, nem é, facilitado pela Natureza.

Soluções para tirar partido do terreno natural foram surgindo ao longo dos tempos e as técnicas de cultivo foram-se adaptando. A sublime adaptação das gentes durienses ao longo dos tempos às condições naturais impostas são, talvez, a principal razão que motivou a atribuição do título de Património Mundial por parte da UNESCO. Um olhar mais profundo sobre esta temática está patente neste capítulo.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Também o clima representa um papel fundamental na produção do vinho e, por conseguinte, na região. Sem transformar este trabalho num estudo meteorológico exaustivo, algumas considerações não podem, de modo algum, ser descuradas ao analisar os factores que individualizam a RDD e influenciam o comportamento dos taludes. Em primeiro lugar, é necessário referir que, mais uma vez, a RDD apresenta condições particulares no que às características climáticas diz respeito. Nomeadamente, em factores como precipitação e temperatura. Os valores médios de precipitação e temperatura variam de modo elevado quando comparados com as zonas envolventes à RDD, não apresentando valores homogêneos no seu interior, o que indicia a presença potencial de microclimas. Antes de analisarmos as partes, há que começar por uma análise ao todo. Aquilo que distingue a RDD das zonas envolventes é, mais uma vez, obra da Natureza. Não bastando o facto do rio Douro correr por entre vales fortemente declivosos, toda a região está ‘protegida’ da precipitação. Saltando pormenores demasiado técnicos, é do domínio geral que o oceano expelle ventos húmidos que originam precipitações. O facto das regiões montanhosas do litoral português apresentarem, regra geral, valores elevados de humidade e precipitação não é coincidência. Tais ventos húmidos entram pelo território continental levando com eles fortes probabilidades de precipitação que se efectivam aquando do contacto destes com as montanhas, potenciando a ocorrência de chuvas orográficas. Estando situada no Norte de Portugal, rodeada por áreas de grande pluviosidade e tendo uma topografia constituída por zonas montanhosas, seria de esperar que a RDD tivesse valores de precipitação elevados. Contudo, não é isso que se verifica. A RDD encontra-se protegida pelos conjuntos montanhosos das Serras do Marão/Alvão e Serra de Montemuro. A disposição em ‘V’ aberto para Este origina a divergência dos ventos vindos de Oeste. A precipitação média anual nestes conjuntos pode ser superior a 2500 mm, uma das mais elevadas de Portugal [11]. Este ‘V’ funciona com uma barreira eficaz aos ventos carregados de humidade vindos do Atlântico. Não impedindo a precipitação na RDD, esta barreira diminui significativamente o grau de precipitação, contrariando talvez a ideia pré-concebida de que nesta zona os níveis de pluviosidade são elevados.

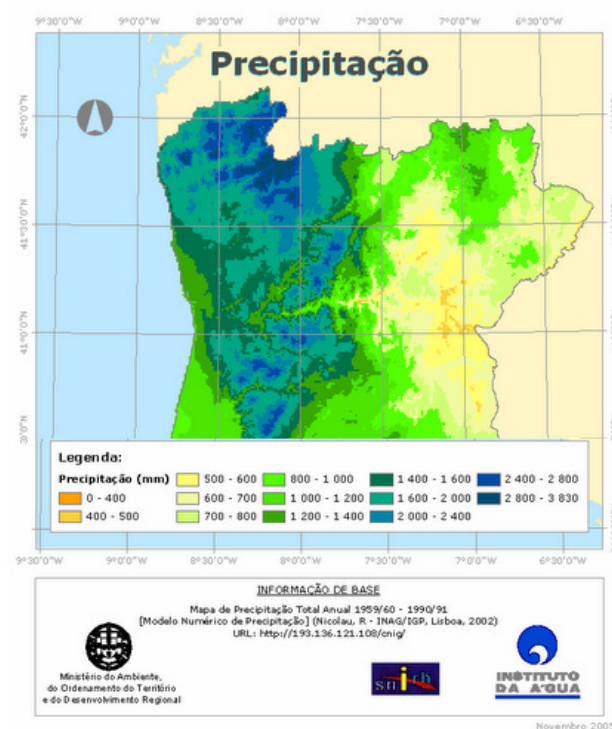


Fig. 3. 4— Distribuição espacial da precipitação média anual no Norte de Portugal. (Adaptado de SNIRH).

O efeito desta barreira natural fica patente quando se procede a uma comparação espacial dos registos de pluviosidade. Analisando a distribuição espacial da precipitação total anual do território de Portugal Continental (Figura 3.3) comprova-se a teoria de que a RDD apresenta valores inferiores aos das regiões de Oeste. A barreira natural referida coincide ainda com a divisão existente entre os valores mais elevados (a azul) e os mais reduzidos (a amarelo) a Norte.

Aproveitando dados recolhidos por autores de trabalhos sobre a RDD [11] é possível escolher e sintetizar os dados que mais importam para perceber o tipo de clima que impera na região duriense. Um breve olhar à tabela 3.1 permite concluir que os valores de precipitação média anual não vão além dos 1000 mm, o que reforça a ideia que a RDD apresenta valores de precipitação muito baixos.

Tabela 3. 1 – Dados do clima em locais da RDD (1931-60).

	Régua	Vila Real	Pinhão	Alijó	Pocinho	Moncorvo
Temperatura média do ar (°C)	15,5	13,6	16,2	13,6	16,5	15,2
Precipitação média anual (mm)	855,7	1018,8	658	780,6	405,5	505,7

O modo como a precipitação se distribui ao longo do ano merece também uma análise. Como é característico do nosso país, a precipitação não se distribui de modo uniforme ao longo do ano, havendo períodos onde a precipitação é mais intensa e outros onde esta é escassa. Nos meses de Verão, a precipitação é, como esperado, bastante reduzida. Apresentando valores residuais, os meses de Junho, Julho e Agosto contribuem, num ano considerado normal, com percentagens diminutas no somatório de dados para o total anual. De resto, a precipitação concentra-se nos meses entre Outubro e Fevereiro havendo, curiosamente, registos de valores elevados nos meses da Primavera, como é o caso de Abril ou Maio. Este facto levou até a um estudo sobre os fenómenos de precipitações extremas na RDD no período Primavera-Verão [12] e consequências na paisagem. Nesse trabalho, os autores fazem uma análise bastante interessante sobre o tipo de chuvas que ocorrem neste período e das suas consequências. Não estando disponível informação precisa relativa à precipitação em todo o território da RDD face à escassez de postos udométricos, os autores utilizam dados recolhidos em notícias dos meios de comunicação social da área acerca das consequências (acidentes) resultantes de episódios de precipitação intensa e, por vezes, violentos ocorridos na RDD. Fazendo uma resenha de episódios de chuva intensa, concluiu-se nesse estudo que há casos em que a precipitação acontece em espaços muito pequenos e em pequenos intervalos de tempo. Casos extremos como a queda de chuva numa quantidade equivalente ao total de um mês ‘normal’ em apenas uma hora são relatados neste estudo. Fenómenos extremos deste tipo são ecoados, hoje em dia, nos meios de comunicação social devido às consequências que deles resultam. Especialmente quando tais fenómenos acarretam consequências para o quotidiano de populações como é o caso do corte da linha ferroviária do Norte ou corte de estradas nacionais. Perceber que a precipitação é um catalisador de acidentes na RDD é fundamental. Mas não basta. É necessário entender que os episódios pluviométricos podem assumir diversas formas, sendo de imperial utilidade saber interpretar dados como os que se apresentam em seguida na tabela 3.2. Retirado de um estudo sobre a RDD [11] os dados presentes na tabela servem para tirar ilações quanto à distribuição da precipitação ao longo do ano e fazer comparações mês a mês. Ir mais além é seguir por um caminho perigoso. Os fenómenos de precipitação na RDD revestem-se de particular interesse e complexidade pela natureza variada que assumem pelo que o seu comportamento se torna imprevisível. Os fenómenos extremos não são raros na Região Demarcada do Douro. Embora não sendo regra, a possibilidade de os valores de precipitação obtidos para um determinado mês se ficar a dever à soma de chuvadas verificadas em poucos dias está longe de ser remota. A falta de dados facilmente acessíveis impede um maior grau de certeza quanto a esta matéria, ficando até a ideia de que seria possível desenvolver vários trabalhos em torno da temática da pluviosidade e do modo como esta pode ser medida com exactidão.

Tabela 3. 2 – Precipitação média mensal (1992-02).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total Anual
Pinhão	69,5	31,3	17,6	91,8	89,3	12,6	16,6	23,9	56,5	65	93,1	156,9	724,1
Régua	119,3	65,4	71,3	71,4	68,6	18,3	11,8	17	55,2	91,9	119,4	142,8	852,2
Stª Marta	99,1	41,5	39,7	49,8	45,5	7,2	4,9	9,5	30,9	75,3	76,6	102,8	582,8
Penajóia	119	62,2	61,1	80,7	58,5	17,5	7,3	13,5	42,8	100,2	141,8	169,7	874,4
Mesão Frio	127,9	59,2	52,5	118,9	81,8	14	7,1	13,4	44	130,8	143,7	149,2	942,4
Média	106,9	51,9	48,4	82,5	68,7	13,9	9,5	15,4	45,9	92,6	114,9	144,3	795,2

O modo como a informação está disponível não permite perceber que tipos de chuvas estão presentes nos dados compilados. O facto dos dados disponíveis serem compilados com base em ‘médias mensais’ ou ‘totais anuais’ ajudam os fenómenos extremos a disfarçarem-se. Mesmo que haja dados diários sobre precipitação, estes podem facilmente ocultar fenómenos extremos ocorridos num curto espaço de tempo, como é o caso de uma manhã ou uma hora. Vincado no trabalho sobre pluviosidades está uma ideia que é neste trabalho reforçada: não abundam em Portugal estudos específicos na área dos episódios pluviométricos intensos. Ao suprir esta lacuna, novos dados poderiam ser utilizados quando se trata de estudar as consequências destes fenómenos. Actualmente, é aceite que o clima está a mudar e que o equilíbrio natural do nosso planeta está a mudar. Ecossistemas estão em mutação, em risco e em processo de adaptação. O resultado final é, para já, imprevisível. Certo é que os fenómenos extremos começam a ser parte do quotidiano e têm de ser tidos em linha de conta. Um correcto e extensivo estudo desta temática revestir-se-ia de vital importância no controlo de situações de risco, especialmente quando de zonas sob forte domínio da Natureza se trata, como é o caso da RDD.

3.2.3 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE CULTIVO DAS VINHAS

A importância das diferentes técnicas de cultivo reside na potencial afectação que estas podem introduzir na estabilidade das encostas. Ao longo dos tempos, as técnicas foram-se modificando. Seja por força de fenómenos naturais, caso do aparecimento de pragas, ou do aumento da exigência ao nível da eficácia da produção vitivinícola, as técnicas têm mudado, acarretando diferentes efeitos nas vertentes. Justifica-se, portanto, uma explicação superficial das principais técnicas adoptadas pelas populações.

3.2.3.1 Vinha Pré-Filoxera e Vinha Tradicional

A técnica de cultivo de vinha Pré-Filoxera, a mais antiga a ser aqui abordada, caracteriza-se por ser constituída por socalcos estreitos que seguiam, aproximadamente as linhas de nível. Muros de pedra posta de xisto, com cerca de 50 cm de largura, suportavam uma determinada quantidade de terra arável. Os muros não só continham as terras como eram também bastante eficientes a reduzir a erosão por acção no Inverno além de permitirem a drenagem de água por entre as pedras, retendo apenas a quantidade de água suficiente para uma regular maturação durante o período seco. No Verão, os raios solares são absorvidos e reflectidos pelas pedras dificultando a evaporação da água. A existência dos muros impedia ainda a proliferação de infestantes nos taludes [11][13].

Esta técnica foi desenvolvida ao longo dos séculos, pois alcançou bastante sucesso. Tida como uma técnica trabalhosa, mas eficiente, a vinha do tipo Pré-Filoxera foi, talvez, aquela que mais alterou os perfis das vertentes, sem modificar excessivamente o declive das mesmas. Aplicável a zonas de declive forte, esta técnica permite a plantação de uma ou duas linhas de videiras e estima-se que a densidade de plantação ande à volta das 3000, 3500 plantas por hectare [10]

Hoje em dia, encontram-se ainda em funcionamento alguns destes terraços, mas muitos deles foram abandonados, especialmente em zonas de declive acentuado. Estes terraços tomam o nome de ‘mortórios’.

O aparecimento da praga da Filoxera em Portugal destruiu vários hectares de vinha e provocou quebras na produção na ordem de 50%. A Filoxera arruinou agricultores, fez aumentar a emigração e o despovoamento de freguesias, provocou crises sociais, esteve na origem da crise vinícola do final do século XIX, afectou as finanças públicas e a balança comercial e deixou marcas indeléveis no sector vinícola e paisagem [14]

Esta praga afectou incrivelmente o nosso país e especialmente a região duriense, onde a praga primeiramente se manifestou. As consequências foram muitas e profundas. O efeito mais visível ainda hoje é a evolução da técnica de vinha adoptada. Após o aparecimento da filoxera, os agricultores procuraram terrenos menos declivosos e aumentaram o espaço entre muros, respeitando o declive natural [11].



Fig. 3. 5 – Vinha pré-filoxera (esquerda) e vinha tradicional (direita).

Semelhante, no seu todo à técnica pré-filoxera, a vinha tradicional apresenta algumas diferenças. Resultado do maior espaço entre muros, mais linhas de plantação são introduzidas, sendo que o terreno onde estas assentam deixa de ser quase horizontal, como acontecia antes, passando a ter um declive idêntico ao das vertentes. O melhor aproveitamento do solo faz subir os números relativos a densidades de plantação para mais de 5000 plantas por hectare [10]. Em zonas de menor declive, os muros eram mesmo descartados, o que aumenta ainda mais esta densidade. A ideia geral associada a estas técnicas é a de que, apesar da existência ocasional de pequenos acidentes relacionados com a queda de muros e de alguns escorregamentos, a segurança global das encostas não é afectada. Embora,

sob condições atmosféricas adversas, possam ocorrer movimentos de vertente com maior amplitude a ideia prevaiente é a de que a segurança está, em certa medida, assegurada.

3.2.3.2 Vinha em Patamares

Com o intuito de mecanizar a produção, surgiram outras técnicas, das quais se destaca a plantação em patamares devido às implicações que esta introduz na paisagem. Esta técnica caracteriza-se pela alteração praticamente total da encosta onde é aplicada (Figura. 3.6). O declive final (representado por b) é sempre muito maior do que o declive inicial (a). Os volumes de escavação, a cinzento, tendem a ser usados para aterrar outras zonas (a cinzento mais carregado), procedendo-se à alteração da estética paisagística sem recurso a terras externas. A técnica dos patamares é aplicada em casos em que os elevados custos da mecanização que originariam o abandono das terras pelo que a perda de área útil de produção assume relevância menor (Bianchi de Aguiar, 1985) [11].

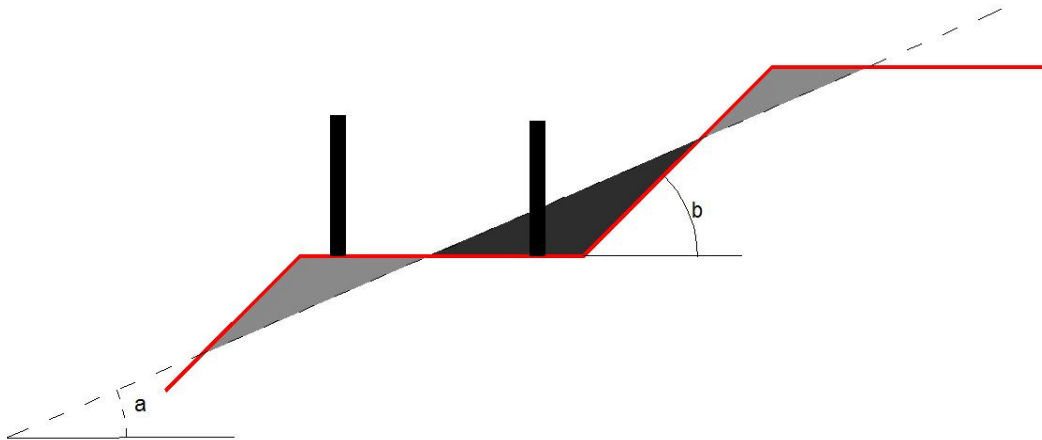


Fig. 3. 6 – Esquematisação da plantação da vinha em patamares.

Quanto maior for o declive, os patamares a construir têm necessariamente de ser mais estreitos. Existem dois tipos de patamares: uns com duas linhas de plantação e outros com apenas uma só linha (representados na figura 3.6 por duas linhas verticais negras). Esta técnica origina bastantes problemas. A construção dos patamares é feita recorrendo a maquinaria pesada que transforma a rocha-mãe xisto em solo, acarretando uma alteração tanto no perfil inicial das encostas como no declive em si. Esta alteração nas vertentes induz também problemas graves de erosão, o que torna os deslizamentos de terras fenómenos algo comuns, especialmente aquando da ocorrência de chuvadas. Aliado à transformação do perfil das encostas está outro factor que em muito contribui para a desestabilização das mesmas. Ao remexer o solo, é inevitável que a maquinaria arranque a vegetação existente. A vegetação, que serve como absorvente das águas, deixa de desempenhar o seu papel, aumentando o risco de deslizamentos. Depois de construídos os patamares, nem todos os agricultores têm a preocupação de replantar a vegetação entretanto arrancada. Apesar de implicar tantos riscos que podem colocar em causa todo o investimento realizado pelos agricultores, esta técnica é bastante utilizada devido à sua componente lucrativa.



Fig. 3. 7 – Patamares e Mecanização.

Associado a esta técnica estão bastantes movimentos de vertente devidamente registados pela imprensa, mas nem por isso exaustivamente documentados. A prevenção em áreas como o ADV é de difícil execução pelo que a solução tem sido ir reparando as encostas à medida que estas escorregam.

3.3 LEGISLAÇÃO, ACIDENTES E A PRODUÇÃO DE VINHO

O reconhecimento por parte da UNESCO da importância histórica do ADV trouxe prestígio e notoriedade à região. O reconhecimento internacional trouxe, contudo, obrigações para autarquias e Estado. De modo a preservar as características que valeram o título de Património Mundial, é função do Estado português assegurar que tudo é feito para proteger eficazmente o património e preservar as características que conferem ao ADV um valor universal excepcional. Sendo uma zona patrimonial, o Alto Douro Vinhateiro, tal como outras zonas de importância semelhante, goza de condições de excepção. Fruto dos problemas existentes na região e da necessidade de proteger e estimular o ADV, surgiu em 2004 um decreto-lei que pretende, entre outras coisas, regar a alteração das encostas. O PIOT-ADV (Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território do Alto Douro Vinhateiro) visa a protecção do património histórico relacionado com a vinha e paisagem natural característica. Houve, desde então uma vontade das instituições públicas em dinamizar a região, tirando partido do seu potencial turístico.

A face mais visível dos problemas existentes no ADV é aquela que afecta a linha ferroviária e a Estrada Nacional 222. Ambas encontram-se nos sopés das encostas, pelo que são bastante afectadas aquando da ocorrência dos movimentos de vertente, como é o caso dos deslizamentos. Não são raros os casos em que, tanto a EN222 como a linha do Norte são fechadas, temporariamente, devido, maioritariamente, ou a escorregamentos no primeiro caso, ou à queda de blocos no segundo. Estas situações são recorrentes e, em certos casos, de difícil resolução. Embora extravasando, em larga medida talvez, o âmbito deste trabalho, uma referência deve ser feita à complexidade excepcional existente no ADV no que se refere ao modo como se lida com os deslizamentos. Pretende-se deste modo alertar para a necessidade de maior investigação neste campo para que, no futuro, origine estudos mais aprofundados e variados, contribuindo assim para a tentativa de resolução dos problemas do ADV.



Fig. 3. 8 – Deslizamento numa encosta moldada em patamares.

Sendo o negócio do vinho um negócio lucrativo e o principal meio de subsistência das gentes durienses, é natural que os produtores tentem tirar o máximo partido das suas terras. A tentativa do aumento do índice de ocupação do solo é a consequência natural deste facto, o que leva a que alguns agricultores, por vezes, alterem os perfis das encostas e remexam os solos de modo a tornar a produção de vinho o mais mecanizada e barata possível. Com a maquinaria pesada disponível actualmente, tornou-se exequível a transformação dos perfis das encostas de modo a recorrer à técnica dos patamares. Alguns produtores resolveram, por volta do ano 2000 investir nesta técnica que lhes confere maior lucro. O facto de se remexerem os solos, se efectuar desmatação e se alterar os perfis das encostas, reduz a estabilidade destas, podendo originar grandes movimentos de vertente. Casos desses já se verificaram e continuam a acontecer.

Em 2004, aparece o PIOT-ADV que, entre outras coisas, pretende regar a alteração das encostas. O PIOT-ADV visa a protecção do património histórico relacionado com a vinha e paisagem natural característica. Houve, desde então uma vontade das instituições públicas em dinamizar a região, tirando partido do seu potencial turístico. O investimento no turismo tem vindo a ganhar relevo devido a este facto.

Os problemas mais complexos surgem quando as encostas que foram alteradas antes da implementação do PIOT-ADV deslizam e afectam a linha ferroviária ou a EN222. Estas vertentes que podem não estar em concordância com a lei em vigor, pois esta não tem efeitos retroactivos, estão mais susceptíveis ao escorregamento. Sempre que uma encosta desliza, obrigando ao corte da EN222, por exemplo, pode-se gerar um imbróglie jurídico de difícil resolução. Em regra, quando uma encosta moldada em patamares com uma inclinação que não obedece ao plano (declive > 50% [15]), escorrega, fá-lo movimentando um grande volume de terras. Quando uma encosta desliza ou está em risco de deslizar junto à EN222, esta é cortada por imperativos de segurança. Cria-se então um problema de responsabilidades. Por um lado, os produtores não querem abrir mão do sistema em patamares que

lhes é mais lucrativo, moldando a encosta de modo mais seguro (com muros, por exemplo) mas menos lucrativo. Por outro, a possibilidade de perder todo o investimento feito devido à possibilidade de toda a encosta deslizar é pouco agradável. As entidades responsáveis pela estrada (ou caminhos de ferro) têm por obrigação fazer com que a infra-estrutura seja aberta ao público sem risco para os utilizadores. Por outro lado, não querem pagar a estabilização de toda uma encosta que não lhes pertence. A juntar a isto há ainda a pressão turística, que obriga a uma rápida resolução dos problemas e o PIOT-ADV que, por si só, exclui um imenso rol de soluções devido ao seu não enquadramento paisagístico.

O modo com estes problemas, típicos da região do Douro é resolvido tem alternado entre a destruição visual das encostas e o abandono da produção da vinha. A solução ideal parece não existir, constituindo um dos maiores desafios da engenharia no ADV.

3.4 SITUAÇÃO ACTUAL E ACIDENTES

Os acidentes na Região Demarcada do Douro não são raros. É especialmente no período Outono/Inverno que os relatos de ocorrências são mais intensos. A precipitação é o grande ‘inimigo’ da segurança das encostas. A água, proveniente da precipitação, constitui um dos factores principais da meteorização dos maciços, pode provocar o aumento das pressões neutras, saturar os solos e originar situações de instabilidade.

O estudo dos acidentes e de possíveis soluções é importante para todos os intervenientes na mesma medida em que é difícil a sua resolução. A extensão do território da RDD e a sua componente rural dificultam estudos aprofundados. Aliando-se a isto a heterogeneidade das propriedades das encostas e a existência de microclimas que dificultam a recolha de dados meteorológicos precisos, o resultado é a quase impossibilidade de generalização das situações que provocam os acidentes. Até mesmo o maior factor causador de acidentes apresenta características variadas. A chuva apresenta-se sob formas distintas na RDD, alternando entre episódios de precipitação intensa em curtos intervalos de tempo (menores que uma hora) e a longos períodos de chuva menos intensa, que podem durar horas ou dias. Os fenómenos extremos são cada vez mais frequentes. Não só no ADV, mas um pouco por todo o lado. Assim, neste trabalho tenta-se dar particular ênfase a estes fenómenos. Tendo por certo que esta questão poderá constituir um factor problemático no futuro, a ideia é, mais uma vez, alertar para este caso particular, não descurando nunca o estudo de outros tipos de fenómenos. Mais do que obter resultados, o que seria difícil, face à escassez de dados, procura-se, com a abordagem deste tema, colocar em foco o Douro, os seus problemas e possíveis alternativas à resolução dos mesmos.

4

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Como foi dito anteriormente, o foco deste trabalho incide na análise das potenciais consequências na estabilidade das encostas decorrentes das mudanças induzidas nos níveis freáticos pelas barragens e precipitações. Dados existentes, em falta e outras considerações serão tratados mais adiante neste trabalho. Este capítulo pretende aclarar os procedimentos a usar e a teoria em casos desta índole.

A água está identificada como o maior inimigo das obras civis, em geral, e geotécnicas, em particular. A paragem de trabalhos em frentes de obra como resultado da precipitação é um facto comum. No caso da geotecnia, a chuva causa a saturação dos solos, provocando a interrupção dos trabalhos de construção de aterros ou de escavação, por razões de segurança. A presença de água nos solos provoca instabilidade e põe em risco pessoas e infra-estruturas desde há muito tempo. Por isso, o estudo de fenómenos associados à presença de água em solos é amplo. Avanços significativos no estudo de fenómenos associados a instabilidade de encostas e taludes e de presença de água nos solos têm sido feitos, como resultado do avanço tecnológico. A modelação computacional aplicada a problemas de engenharia civil provocou mudanças verdadeiramente revolucionárias na forma de abordar e resolver este tipo de problemas. De tal forma que, hoje em dia, ferramentas computacionais foram e são desenvolvidas e estão disponíveis para análises e estudos na área da engenharia geotécnica. É com base numa dessas ferramentas que, neste trabalho, se pretende aferir as consequências da presença de água. O software usado foi o GEOSTUDIO 2004 que é propriedade da GEO-SLOPE INTERNATIONAL, Ltd. Neste capítulo, pretende-se perceber um pouco melhor como os programas usados (SEEP/W e SLOPE/W) funcionam e como se pode tirar partido destes para analisar correctamente as condições de água no solo expostas anteriormente.

4.2 SLOPE/W E SEEP/W

Pretende-se avaliar o efeito da presença de água nos solos na estabilidade de encostas, como resultado tanto das precipitações como da descida e subida de água em albufeiras de barragens. A inexistência de software e computadores tornaria esta tarefa, hoje em dia, não muito complicada, numa missão herculeana. Seria necessário efectuar duas análises: uma referente ao efeito nos níveis freáticos dos problemas identificados e outra que englobasse o efeito que o potencial abaixamento desses níveis freáticos teriam na estabilidade dos taludes ou encostas. Este trabalho, quando feito manualmente, é moroso e complexo. Como resultado do avanço galopante da tecnologia, hoje em dia, é possível interligar duas análises distintas, recorrendo ao software certo. Ao invés de efectuar duas análises

distintas com dois programas independentes, é possível usar e transpor resultados de análises prévias para que se possa caracterizar o comportamento de encostas face à presença de água.

A correcta interacção dos programas SEEP/W e SLOPE/W permite uma simulação com um grau de aceitação e correcção suficiente para que dela se possam retirar conclusões seguras. De modo a fazê-lo, um estudo do modo de funcionamento dos programas em si é indispensável. O mau manuseamento de software pode originar resultados enganosos e conclusões erróneas, o que pode ser grave, tendo em conta a rapidez com que tais softwares funcionam. De modo a que tal não aconteça, uma exposição acerca dos fundamentos teóricos que sustentam e fazem os programas funcionar será aqui feita, abrangendo apenas os nichos de estudo abordados neste trabalho, estando mais informação e especificidades presentes em [16][17].

O modo como os programas interagem e se completam não é de difícil explicação. O GEO-STUDIO permite que o utilizador escolha que análises se pretendem fazer, simplesmente por meio da escolha dos programas a 'activar'. A escolha de dois programas não significa, contudo, que os programas funcionem simultaneamente. Os programas continuam a funcionar autonomamente, podendo-se fazer análises usando apenas um programa. Uma das vantagens reside na possibilidade de usar o mesmo modelo em ambos os programas. É também possível usar, de modo expedito, os resultados dados por um programa no outro. Assim, o método utilizado consiste em proceder às análises que envolvam infiltrações de água no solo, recorrendo ao SEEP/W, recorrendo posteriormente ao SLOPE/W para perceber que efeitos estas têm na estabilidade das encostas em causa.

4.3 O MÉTODO DAS FATIAS E O SLOPE/W

O SLOPE/W é um programa concebido para proceder a análises de estabilidade de maciços terrosos, recorrendo ao método das fatias. Em taludes mais ou menos homogéneos, as roturas verificam-se ao longo de superfícies de deslizamento que assumem formas aproximadas de arcos de circunferência [1]. Quando assim é, recorre-se àquele que é considerado o mais antigo método de análise numérica usada em geotecnia: a divisão da massa deslizante em fatias verticais.

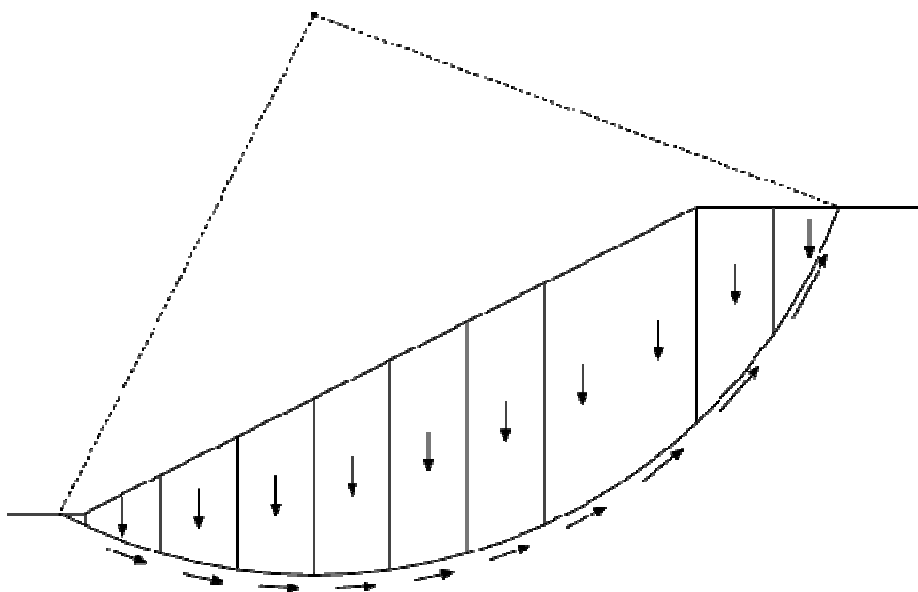


Fig. 4. 1 – Método das Fatias.

A filosofia deste método consiste em dividir a massa deslizante escolhida em fatias de base circular, identificando nelas as forças actuantes na sua estabilização. Identificadas essas forças, a segurança é calculada através de um cálculo convencional do factor de segurança, obtido à custa de um quociente de momentos em relação ao centro do círculo (equação 4.1).

$$FS = \frac{M_R}{M_S} \quad (4.1)$$

Em que M_R é o momento das forças que se opõem ao deslizamento e M_S o momento das forças que tendem a provocá-lo.

A dificuldade na aplicação do problema consiste na determinação das forças normais na base de cada fatia. Uma vez que este é um problema estaticamente indeterminado, considerações têm de ser feitas, nomeadamente no que respeita às forças de interacção entre fatias [1]

Estando englobado numa análise de equilíbrio limite, para aplicar o método das fatias, para além de ser necessário arbitrar uma superfície de deslizamento, é também necessário calcular o equilíbrio através das equações da estática (equação 4.2).

$$\sum F_V = 0, \sum F_H = 0, \sum M = 0 \quad (4.2)$$

Da análise das equações, conclui-se que o método é indeterminado, sendo necessário aplicar diferentes considerações consoante a versão a aplicar para tornar o método estaticamente determinado. O método das fatias, primeiramente apresentado por Fellenius em 1936 evoluiu com o passar do tempo, tendo sofrido evoluções e, com o decorrer dos anos, diferentes versões do método apareceram. Mais recentes são as versões do método por parte de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price cujas diferenças residem no modo como lidam com as forças de interacção entre fatias. Fellenius admitiu que as forças de interacção entre cada fatia e as vazias têm a direcção paralela à base da fatia em causa. Sendo assim, as forças não aparecem num equilíbrio de forças na direcção normal à base da fatia, não sendo contabilizada para o cálculo do momento de forças resistentes. A versão simplificada de Bishop propõe que as forças de interacção sejam admitidas como sendo horizontais [1]. Ambas as versões do método tentam apenas responder à necessidade de calcular o factor de segurança com base nos momentos, não tendo em conta as outras equações da estática. Assim se explica que o método de Janbu, semelhante ao de Bishop origine resultados diferentes, uma vez que calcula o factor de segurança com base no equilíbrio de forças horizontais, não tendo em conta cálculos de momentos. O método, porventura, mais completo é o de Morgenstern-Prince, uma vez que inclui todas as forças de interacção das fatias e todas as equações da estática, levando a resultados mais ajustados. Obviamente, tal melhoria de resultados é obtida à custa de maior labor e nível de complexidade, pelo que o uso de métodos que excluem forças de interacção não foi colocado de parte, pois não só são mais simples, como também proporcionam resultados do lado da segurança.

O uso de qualquer destes métodos é feito para uma superfície de deslizamento de cada vez. Por cada superfície, um factor de segurança é obtido. À escolha de outras superfícies de deslizamento corresponde um factor de segurança diferente, seguindo o mesmo método. Surge, assim, como natural o uso de programas computacionais para o cálculo de factores de segurança em busca da superfície de deslizamento crítica devido ao carácter prático e célere. A escolha de qual das versões do método a

utilizar pode assentar em várias razões, estejam elas relacionadas com questões de segurança ou de rigor.

O método mais geral, por abranger uma maior variedade de casos, fazer uma menor quantidade de considerações e proporcionar resultados mais precisos, é o método de Morgenstern-Price, pelo que será brevemente explicado. Tal como os outros métodos, também este necessita de proceder a uma simplificação relacionada com as forças de interacção entre fatias para tornar o problema estaticamente determinado. De modo a resolver a indeterminação do problema, o método assume que a relação entre E e T (ver figura 4.2) é dada por uma função:

$$T = \lambda E f(x) \quad (4.3)$$

Em que:

- λ é a constante a ser determinada por processo iterativo;
- $f(x)$ é a função que precisa de ser especificada.

Refira-se que quando $f(x) = 0$, o método torna-se semelhante ao de Bishop e quando $f(x) = \text{constante}$, o método torna-se idêntico ao de Spencer [18].

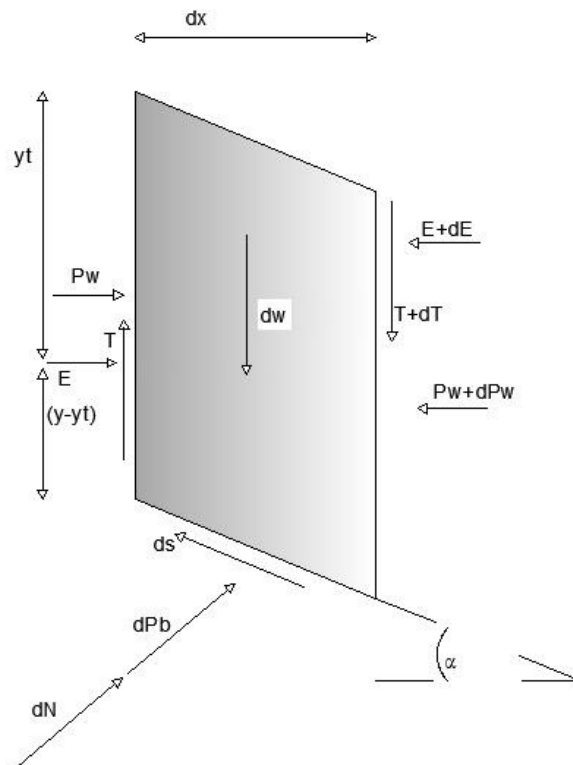


Fig. 4. 2– Esforços numa fatia: Método de Morgenstern-Price.

Em que:

- dW é o peso da fatia;
- P_w é a pressão neutra no contorno da fatia;
- dP_b é pressão neutra resultante na base da fatia;
- E e T são os esforços entre fatias que actuam entre $(y-y_i)$
- ds é a força resistente de corte.

4.3.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

As funções $f(x)$ usadas pelo SLOPE/W podem ser constantes, trapezoidal, arco de seno incompleta ou outra forma completa. Na análise escolheu-se a função de arco de seno incompleta por ser a função que menos influencia o factor de segurança (Morgenstern & Price (1965)). Esta análise computacional, utilizando o método de equilíbrio limite, satisfaz tanto o equilíbrio de forças como o de momentos. Isto origina o cálculo de dois factores de segurança, ideia originalmente proposta por Spencer em 1967 [19].

O método de equilíbrio limite utiliza as seguintes equações no cálculo do factor de segurança:

- O somatório das forças na direcção vertical de cada fatia é usado para determinar a força normal na base da fatia;
- O somatório das forças na direcção horizontal de cada fatia é usado para determinar a força de interacção, E . Esta equação é aplicada como se de um integral se tratasse: da esquerda para a direita;
- O somatório de momentos em relação a um ponto comum para todas as fatias. A equação pode ser manipulada para obter o factor de segurança dos momentos;
- O somatório das forças horizontais para todas as fatias, dando origem ao factor de segurança de forças.

A análise é, ainda assim, indeterminada pelo que são necessárias mais considerações no que respeita à direcção das forças de interacção das fatias. A direcção juntamente com a normal da força de interacção é usada para calcular a força de corte entre fatias. Os factores de segurança podem, então ser calculados com base num cálculo de momentos e de forças. Estes podem variar dependendo da percentagem (λ) da função usada no cálculo. O factor de segurança, que satisfaça tanto o equilíbrio de momentos como o de forças, é considerado como o factor de segurança convergente do método de equilíbrio limite.

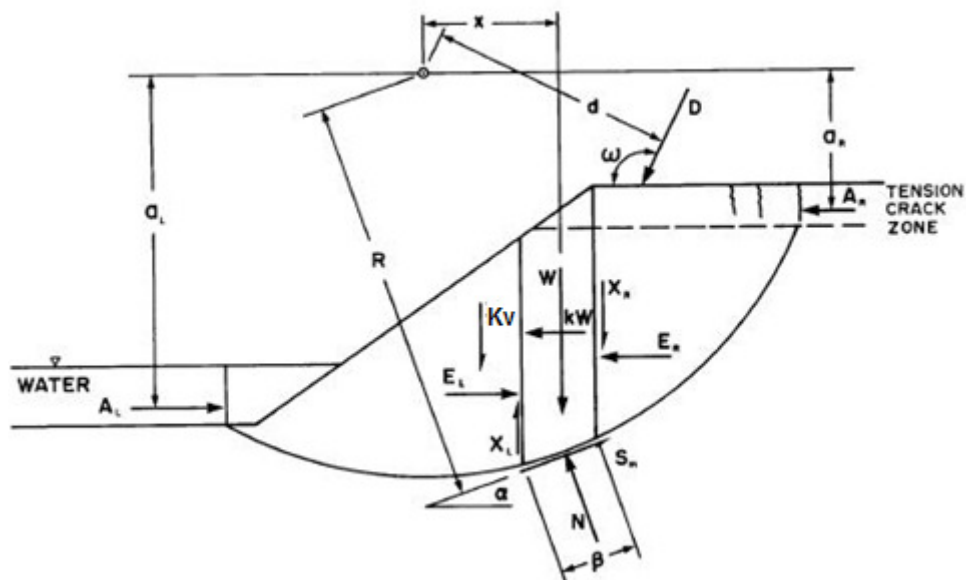


Fig. 4. 3 – Forças actuantes numa massa deslizante circular.

Em que:

- W é o peso total de uma fatia com comprimento b e altura h ;
- N é a força normal na base de cada fatia;
- S_m é a força de corte mobilizada na base de cada fatia;
- E é a força normal de interacção entre fatias. Os subscritos L e R referem-se à esquerda (do inglês 'left') e à direita (right) das fatias, respectivamente;
- X é a força vertical de interacção entre forças. Os subscritos seguem a mesma lógica que ' E ';
- D é uma força pontual exterior;
- kW é a força horizontal sísmica aplicada no centro de cada fatia;
- K_v é a força vertical sísmica aplicada no centro de cada fatia
- R é o raio para a superfície de escorregamento circular ou o braço do momento associado a S_m para uma superfície com qualquer forma;
- x é a distância medida na horizontal desde o centro de cada fatia até ao centro de rotação ou centro dos momentos;
- d é a distância medida na perpendicular desde a força pontual até ao centro de rotação ou centro dos momentos;
- a é a distância medida na perpendicular desde a resultante da força externa provocada pela água até ao centro de rotação ou de momentos. Os subscritos L e R seguem a lógica já aqui referida em ' E ' e ' X ', mas desta vez como esquerda e direita da encosta;
- A é a resultante das forças externas causadas pela água. L e R têm o mesmo significado que em ' a ';
- ω é o ângulo, medido no sentido contrário ao do sentido do movimento dos ponteiros do relógio, entre a horizontal e a força pontual D ;
- α é o ângulo entre a tangente do centro de cada base das fatias com a horizontal.

O factor de segurança calculado através do equilíbrio de momentos é dado por:

$$\sum Wx - \sum S_m R - \sum Nf + \sum kW e \pm \sum D d \pm \sum A a = 0 \quad (4.4)$$

Sendo S_m dado por:

$$S_m = \frac{s \beta}{F} = \frac{\beta(c' + \sigma_n) \tan \phi'}{F} \quad (4.5)$$

Sendo que:

- $\sigma_n = \frac{N}{\beta}$, representa a tensão normal na base de cada fatia;
- F representa o factor de segurança;
- β representa o comprimento da base de cada fatia.

Substituindo a fórmula de S_m dada por 4.5 na fórmula 4.4 e rearranjando-a, obtém-se o factor de segurança a partir do equilíbrio de momentos:

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum W_x - \sum N_f + \sum k W_e \pm \sum D_d \pm \sum A_a} \quad (4.6)$$

O factor de segurança calculado através do equilíbrio de forças através de uma expressão semelhante. Procedendo-se ao somatório das forças em todas as fatias na direcção horizontal:

$$\sum (E_L - E_R) - \sum (N \sin \alpha) + \sum (S_m \cos \alpha) - \sum (k W) \pm \sum (D \cos \omega) \pm \sum A = 0 \quad (4.7)$$

A parcela $\sum (E_L - E_R)$ representa as forças normais de interacção das fatias e deve ser nula, quando somada ao longo de toda a massa deslizante. De modo semelhante, ou seja, substituindo S_m (4.5) e rearranjando a fórmula inicial (4.7), obtém-se o factor de segurança relativamente ao equilíbrio de forças horizontais:

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha + \sum k W - \sum D \cos \omega \pm \sum A} \quad (4.8)$$

De modo sucinto, pode-se agrupar e entender quais os métodos que calculam o factor de segurança tendo em conta o equilíbrio de momentos e o equilíbrio de forças horizontais (tabela 4.1).

Tabela 4. 1 – Equações de estática usadas em cada método.

	Equilíbrio de Momentos	Equilíbrio de Forças Horizontais.
Método de Fellenius	Sim	Não
Método de Bishop Simplificado	Sim	Não
Método de Janbu Simplificado	Não	Sim
Método de Morgenstern-Price	Sim	Sim

4.4 MODELAÇÃO COMPUTACIONAL NO SEEP/W

A inclusão de forças de percolação numa análise de estabilidade pode complicá-la de sobremaneira. De modo a incluir o efeito de infiltrações de água resultantes de queda de águas da chuva, por exemplo, o software da GEOSLOPE utilizado permite simular o efeito de tais infiltrações e aplicar os resultados à análise de equilíbrio limite. Usando o SEEP/W, pode-se perceber quais os efeitos que a infiltrações da água no solo têm na estabilidade das massas deslizantes em causa. Ao conjugar correctamente os programas SEEP/W e SLOPE/W, pode-se obter resultados fiáveis no que respeita à influência que determinadas condições de água no solo têm na estabilidade de maciços terrosos.

As bases em que o SEEP/W se baseia para simular água no solo baseiam-se no facto de os fluxos de água no solo tanto saturado como não saturado seguirem a lei de Darcy [20] (equação 4.9).

$$q = k i \quad (4.9)$$

Em que q é o caudal específico, k o coeficiente de permeabilidade do solo e i o gradiente hidráulico. A lei de Darcy foi originalmente desenvolvida para solos saturados mas pesquisa mais recente revelou que também pode ser adaptada a solos não saturados. A diferença reside no facto de em fluxos em condições não saturadas, o coeficiente de permeabilidade deixar de ser uma constante, passando a variar com mudanças no teor em água e, indirectamente com mudanças nas pressões neutras. Daí que a lei de Darcy possa também ser escrita seguindo a equação 4.10, em que v é a velocidade ‘Darciana’ ou velocidade de percolação. A velocidade média real a que a água atravessa o solo é a velocidade linear, sendo esta igual a v dividida pela porosidade do solo. Num solo não saturado, é igual a v dividida pelo teor em água volumétrico do solo. O SEEP/W usa uma versão da lei da Darcy e apresenta apenas a velocidade de percolação ou Darciana.

$$v = k i \quad (4.10)$$

As equações diferenciais gerais que regem as infiltrações em duas dimensões podem ser expressas como se segue na expressão 4.11.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.11)$$

Em que

- H é a carga total;
- k_x é a permeabilidade ou condutividade hidráulica na direcção x ;
- k_y é a permeabilidade ou condutividade hidráulica na direcção y ;
- Q é a condição fronteira aplicada/condição de contorno de fluxo do problema.
- θ é o teor em água volumétrico;
- t é o tempo.

A equação indica que a diferença entre o fluxo que entra e sai de um elemento no tempo é igual à mudança na capacidade de retenção de água no solo. Especificamente, afirma que a soma das taxas de mudança dos fluxos nas direcções x e y mais a condição fronteira é igual à taxa de mudança do teor em água com o tempo. Em condições estáticas, o lado direito da equação é nulo, uma vez que o fluxo que entra e sai de um elemento é o mesmo em qualquer altura. Mudanças no teor em água estão dependentes de mudanças no estado de tensões e nas propriedades do solo. Os estados de tensão tanto para solos saturados como não saturados podem ambos ser descritos por duas variáveis: $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$, sendo σ a tensão total, u_a a pressão do ar e u_w a pressão neutra. O SEEP/W foi elaborado assumindo condições de tensões totais constantes, isto é, não carregamento ou descarregamento do maciço terroso. Tal significa que $(\sigma - u_a)$ se mantém constante e não influencia as mudanças no teor em água volumétrico. Sendo assim, tais mudanças dependem apenas de alterações nas condições da matriz de sucção $(u_a - u_w)$ e, uma vez que u_a é constante, u_w é único factor que o altera. Consequentemente, uma mudança no teor em água pode ser relacionada com mudanças nas pressões neutras pela expressão 4.12.

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \quad (4.12)$$

Em que m_w é o declive da curva de retenção de água no solo, representando a variação da humidade volumétrica para uma determinada mudança na sucção do solo.

A carga piezométrica, H presente na equação 4.11 é definida por:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (4.13)$$

Em que:

- u_w é a pressão neutra;
- γ_w é o peso volúmico da água;
- y é a cota.

O SEEP/W transforma a equação 4.11 rearranjando e substituindo as equações 4.12 e 4.13 para proceder aos cálculos. Reitera-se a convicção da necessidade de consulta de [16] para melhor perceber outros pormenores do modo como o software funciona.

Tratando-se este trabalho da análise de solos não saturados, existem factores que afectam de modo especial o comportamento destes. Como ficou patente nas considerações anteriores, a humidade volumétrica e condutividade hidráulica são fundamentais para uma análise de infiltrações de água no solo. O SEEP/W utiliza estes factores como base para o cálculo. É, então importante compreender a relações entre pressão neutra e quantidade volumétrica de água no solo (humidade volumétrica). O solo consiste num conjunto de partículas sólidas e vazios intersticiais. Os espaços ou vazios podem ser preenchidos com água ou ar, ou ainda com uma combinação de ambos. Num solo saturado, todos os vazios estão preenchidos por água. Num solo não saturado, a variação de água nos poros ocorrerá em função da matriz de sucção dos poros de água, definida como a diferença entre a pressão do ar e a pressão neutra. A curva de retenção de água no solo representa a porção ou volume de vazios, que se mantém com água à medida que o solo é drenado [21]. Os três principais factores que caracterizam esta curva são:

- Quantidade volumétrica de água residual;
- m_w que representa a inclinação da função para valores positivos e negativos de sucção;
- Valor de entrada da pressão do ar.

O volume de água residual apresenta-se como o ponto-chave na caracterização deste parâmetro, pois representa o volume de água que, independentemente do aumento da sucção, não provoca incrementos significativos do volume de água no solo. Este valor, tal como os todos os outros presentes na definição da curva de retenção são bastante influenciados pelo tamanho das partículas individuais dos solos e a distribuição das partículas pelo solo. Diferenças significativas entre os variados tipos de solo de acordo com a sua granulometria: areia, silte e argila, podem ser observados na figura 4.4.

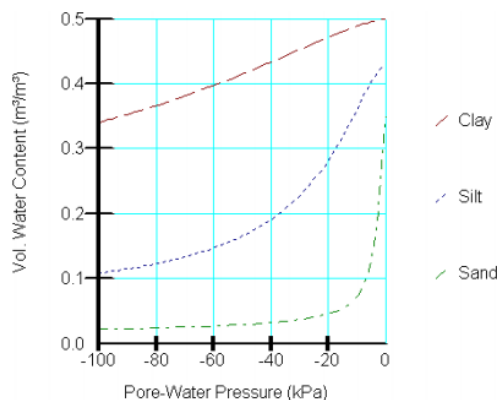


Fig. 4. 4 – Diferentes curvas de retenção: argila, silte e areia ('clay', 'silt' e 'sand').

As curvas de retenção de água nos solos podem ser obtidas quer através de estimativas tendo em conta a granulometria, quer através de soluções matemáticas. No desenvolvimento deste estudo, será utilizada para o cálculo de curvas de retenção curvas do SEEP/W. Refira-se que o software vem equipado com uma colectânea de funções que pretendem simular o comportamento de 24 solos diferentes. A informação referente a 17 deles inclui curvas granulométricas obtidas experimentalmente tal como curvas de teor em água. As curvas de condutividade hidráulica são obtidas por meio de curvas medidas de condutividade hidráulica saturada e de um dos métodos de estimativa incluídos no programa: Fredlund et al (1994), Green & Corey (1971) e Van Genuchten (1980). As restantes 7 funções não têm curvas granulométricas disponíveis, mas são descritas recorrendo a funções de teor em água retirada de literatura publicada. A condutividade hidráulica foi também estimada usando valores de condutividade hidráulica saturada. Em alguns casos, as funções foram ajustadas para criar uma função mais suave.

A condutividade hidráulica define-se como a capacidade de um solo em transportar ou conduzir água tanto em condições saturadas como não saturadas. Se o solo estiver saturado, todos os vazios são preenchidos por água. Devido à entrada de ar nos poros de maior dimensão, a capacidade de transportar água começa a decrescer progressivamente. Assim, a condutividade hidráulica desce. À medida que as pressões neutras se tornam cada vez mais negativas, um número substancial de poros enche-se de ar e a condutividade hidráulica decresce ainda mais. Assim se explica que a aptidão da água fluir pelo solo, depende da quantidade presente no mesmo, aspecto representado pela curva de retenção de água no solo ou humidade volumétrica. Obter a função condutividade hidráulica é um processo bastante trabalhoso. Todavia, pode ser imediatamente deduzida usando um de muitos métodos capazes de prever o seu comportamento. Estes métodos podem utilizar curvas granulométricas ou a curva de retenção e a condutividade hidráulica em condições saturadas. A utilização da relação entre a curva de retenção e a condutividade hidráulica em condições saturadas apresenta-se como a solução mais popular nos programas computacionais, apresentando o SEEP/W, algoritmos que permitem a dedução das curvas.

A definição de condições de fronteira numa análise transitória é fundamental para que a simulação seja adequada. É, assim, necessário considerar a ausência de fluxo na base do talude bem como definir as condições iniciais dos níveis freáticos. Na primeira situação a analisar, a simulação da condição fronteira associada à descida e subida da água dos rios é feita à custa de uma função hidráulica (H)

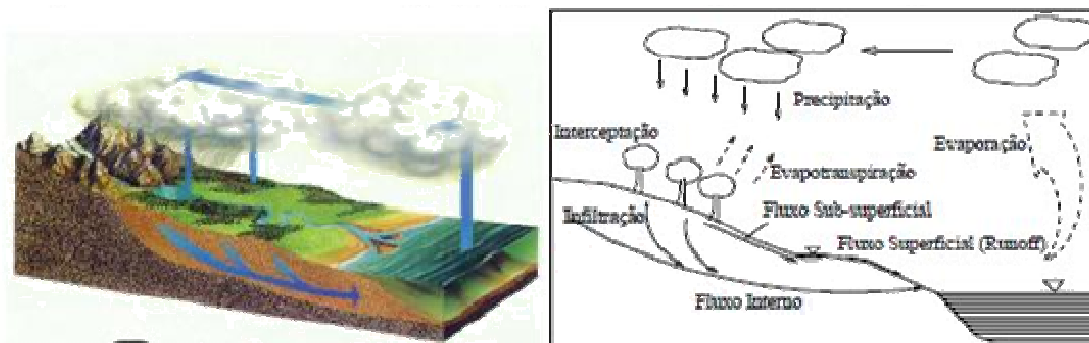
aplicada a todos os nós que simulam o leito do rio à superfície. No segundo caso, o ritmo de precipitação é modelado através de um fluxo de fronteira unitário (q), aplicado ao longo de todos os nós da superfície do solo, iniciando-se a infiltração vertical e a percolação horizontal. Durante o processo de resolução, o SEEP/W traduz o fluxo de fronteira (q) num fluxo nodal (Q) e calcula a pressão hidráulica em cada nó. De modo a evitar o acumular de água, isto é, o chamado efeito de 'ponding', que é pouco provável, dada a natureza das encostas a analisar, o software efectua uma verificação em que cada nó da superfície do solo tem gradiente hidráulico zero ou negativo. No caso de ser encontrado um nó com pressão neutra positiva, no fim do cálculo de cada etapa temporal a pressão nesse nó é assumida como igual à elevação da água. Neste caso, o fluxo de fronteira é modificado para pressão e o novo fluxo determinado, dado o facto de o SEEP/W apenas conseguir calcular a variação do fluxo ou pressão num determinado nó.

A análise efectuada pelo SEEP/W tem algumas limitações importantes. De salientar, o facto de assumir que a diferença de características da curva de retenção de água entre a fase seca e molhada não é significativa. Esta é uma suposição necessária, uma vez que o SEEP/W não é capaz de determinar em cada ciclo de tempo qual a área do talude que está em fase molhada ou seca, para em prática poder usar a curva correspondente. Este é o motivo de apenas ser possível definir uma curva no software.

A principal causa dos deslizamentos existentes no ADV é, sem dúvida, a pluviosidade. [32] A água que se infiltra como resultado da precipitação, faz reduzir a tensão mobilizada por meio do aumento das pressões neutras e resultante diminuição dos parâmetros resistentes do solo. Como consequência, o FS decresce para valores próximos ou inferiores à unidade, originando os fenómenos de deslizamentos. A chuva é um dos intervenientes do ciclo hidrológico. Um ciclo, por ora, ininterrupto, bem documentado e estudado mas nem por isso de menor complexidade. Parte deste ciclo, a precipitação reveste-se igualmente de alguma complexidade naquilo a que se propõe analisar neste trabalho. A água que cai das nuvens não é toda absorvida pelos solos.

4.4.1 O CICLO HIDROLÓGICO

Quando se trata de água nos solos, a precipitação é a primeira razão que ocorre à mente dos engenheiros e não só como a causadora de instabilidade. De facto, a precipitação engloba-se num ciclo que se assume ser perpétuo: o ciclo hidrológico. Pela análise deste ciclo, estudado ao longo de várias gerações e esquematizado na imagem seguinte, é possível perceber que a precipitação é apenas uma parte do ciclo. Assim, percebe-se que nem toda a água que cai proveniente da precipitação se infiltra nos solos. Parte é interceptada pela vegetação, parte cai nos rios e outra parte flui superficialmente (runoff).



Fíg. 4. 5 – Ciclo da água.

A análise da percentagem ou quantidade de água que, na verdade, se infiltra no solo como resultado da precipitação, não faz parte do âmbito deste trabalho. O estudo nesta área revelar-se-ia fastidioso e inútil face aos objectivos propostos, pelo que este estudo será, de certa forma, secundarizado. Todavia, a certeza que apenas uma percentagem da água precipitada se infiltra nos solos não pode, não deve e não é negligenciada neste trabalho. É, no entanto, certo que considerando que toda a água que cai é infiltrada, a pior situação é estudada, estando os resultados do lado da segurança.. Tendo por certo, pela expressão 4.14, que apenas a parcela I se infiltra no solo, o cuidado na análise e escolha dos valores de precipitação a usar terá de ser tido em conta para uma mais correcta modelação computacional da precipitação.

$$P = Q + E + I + W + \Delta W + \chi \quad (4.14)$$

Onde, P representa a precipitação total, Q o runoff, E a parcela perdida por evapotranspiração, ΔW a variação do nível do reservatório (rios, lagos e mares), I a variação de humidade do solo decorrente do processo de infiltração e χ perdas adicionais, que incluem interceptação pela vegetação e armazenamento parcial em depressões superficiais.

A infiltração é o processo pelo qual a água passa da superfície do solo para o interior deste. A velocidade de infiltração é influenciada por muitos factores, a vegetação a porosidade, condutividade hidráulica e teor de humidade do solo. De um local para outro podem-se verificar alterações nas propriedades do solo, mesmo para sítios muito próximos. Isto faz com que a infiltração seja um processo complexo que só pode ser traduzido por equações de uma forma aproximada. O avanço da frente de humedecimento ou frente molhada pode ser esquematizado como se segue. Na figura 4.6, representa-se a variação do teor de humidade volumétrico com a profundidade.

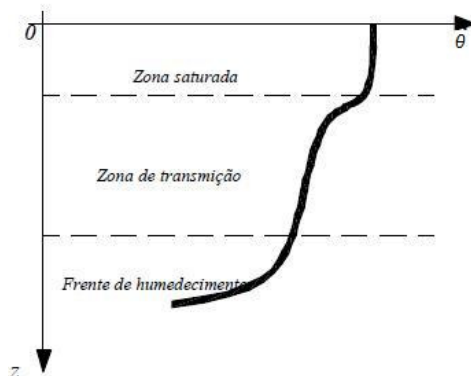


Fig. 4. 6 – Variação típica do teor de humidade com a profundidade.

O modo como é estimada a percentagem de água que se infiltra nos solos é feita recorrendo a modelos de infiltração como o de Green-Ampt, modelos esses que não serão demasiadamente tidos em conta neste trabalho devido ao facto de o grau de pormenorização passível de atingir não é o desejado. Salienta-se apenas que este método simplifica o processo de modelação das infiltrações. A figura 4.7 apresenta a curva de infiltrações acumuladas, estimadas pelo modelo de Green-Ampt. O declive praticamente constante denuncia que o modelo assume, aproximadamente, que as infiltrações instantâneas são constantes. Este facto é tido em conta mais adiante, no capítulo 5, na modelação da chuva.

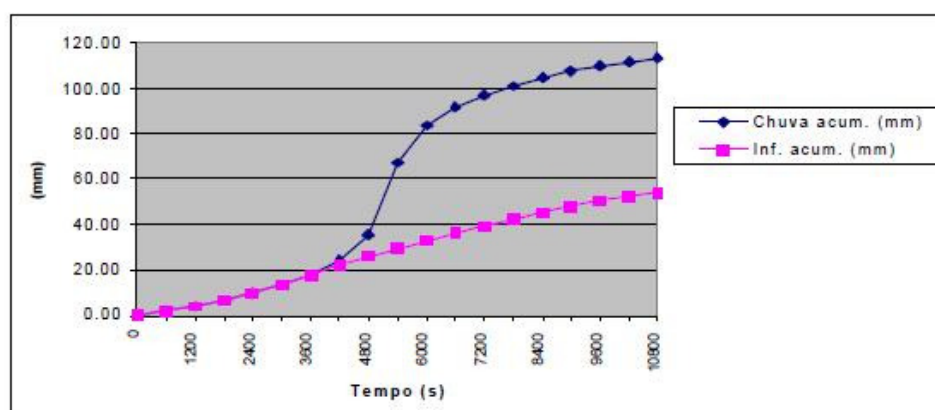


Fig. 4. 7 – Chuva Acumulada/Infiltração Acumulada pelo modelo de Green-Ampt.

De facto, a relativa falta de informação relativa às encostas do Douro, suas propriedades e variáveis associadas levou a que o estudo desta temática não tivesse como objectivo a resolução ou chegasse a conclusões demasiado profundas e/ou talvez precipitadas, mas antes a um abrir do caminho e da discussão nesta área. Como tal, bastantes suposições foram feitas, como se verá adiante. Entre elas, a de que toda a água que cai é potencialmente absorvida pelo terreno, ignorando-se os fenómenos de escorrência superficial, evaporação ou absorção de água por parte da vegetação. As restantes suposições e simplificações serão abordadas e explicadas com maior detalhe em capítulos subsequentes.

De modo a prever qual a quantidade de precipitação que cai em para uma determinada chuva, recorreu-se, neste trabalho ao uso de curvas de Intensidade Duração Frequência: curvas IDF. As curvas IDF nacionais são construídas com base em registos udométricos variados, apresentando uma excelente base estatística e adaptadas a diferentes tipos de eventos pluviométricos. Este factor foi essencial para o seu uso nos mais variados campos de engenharia civil, nomeadamente nos projectos de modelação hidráulica. A intensidade de precipitação é calculada pela equação seguinte:

$$I(mm/h) = a D_{min}^b \quad (4.15)$$

Em que D_{min} representa a duração mínima da chuvada e a e b são parâmetros definidos por regiões, por meio de técnicas estatísticas. Registe-se que o INAG (Instituto da Água) fornece registos de precipitações máximas anuais em todo o território. Porém, os dados disponibilizados ao público em geral não abrangem as precipitações intensas com durações inferiores ao dia, que são de grande interesse neste trabalho. É, aliás, bastante menor o número de posto udográficos que permitam o registo de precipitações inferiores ao dia do que os que fornecem registos de precipitações diárias máximas anuais. Em linhas gerais, pode-se afirmar que a rede udométrica nacional, dispondo de mais de 850 pontos de medição, mais de metade com séries de registos consideravelmente longas, possibilita a estimativa suficientemente rigorosa da precipitação diária máxima anual com dado período de retorno, T , em qualquer bacia hidrográfica do País. Contudo, quando se trata da análise de fenómenos que envolvam precipitações por intervalos de tempo inferior ao dia, tal não se verifica. Normalmente os acontecimentos pluviosos de curta duração (uma hora ou menos) podem ser descritos

pela respectiva intensidade média da precipitação, ou seja, pelo quociente entre a precipitação e a respectiva duração, o que não acontece com chuvas prolongadas, em que as diferentes intensidades de precipitação devem ser caracterizadas ao longo de intervalos intermédios. Deve-se ressaltar um aspecto importante referente à aplicação das curvas IDF. Tendo estas uma base estatística, poderão começar a perder alguma fiabilidade face às alterações climáticas profundas que se têm verificado nos últimos anos. Os fenómenos meteorológicos extremos têm ganho maior notoriedade e a recolha de dados e sua estimativa devem ser feitos de modo diferente do que até aqui tem sido adoptados de modo a se obter uma maior precisão e sejam cometidos o mínimo de erros possível na previsão destes fenómenos.

5

CASOS PRÁTICOS E ANÁLISES

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são expostos os casos analisados, tendo em conta os pressupostos e objectivos deste trabalho. As considerações feitas, dificuldades encontradas e resultados obtidos são, neste capítulo, expostos. Usando as ferramentas computacionais disponíveis e os dados existentes, propõe-se modelar as situações referidas, averiguando se estas têm potencial para provocar a instabilização de encostas.

5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.2.1 DESCIDA RÁPIDA DO NÍVEL DA ÁGUA DE UM RIO

Recorrendo a dados topográficos disponibilizados pelo GEG, modelou-se uma zona do rio Tâmega onde, previsivelmente haverá uma variação diária do nível da água de 9 metros em resultado da construção da barragem do Fridão. A zona em causa apresenta um declive bastante acentuado e uma altura de magnitude significativa (cerca de 130 metros). O declive visível nas margens é algo assimétrico, representando o vale profundo existente na região. Para que a análise não fosse deturpada devido à extensão da encosta, focou-se a análise numa área mais pequena, na ordem dos 50 metros de altura, de modo a facilitar a obtenção de resultados acerca da zona que mais importa analisar: junto do leito do rio. De salientar, é o facto das coordenadas rigorosas existentes em formato CAD que não puderam ser utilizadas com o rigor máximo, quedando-se tal rigor ao nível da unidade.

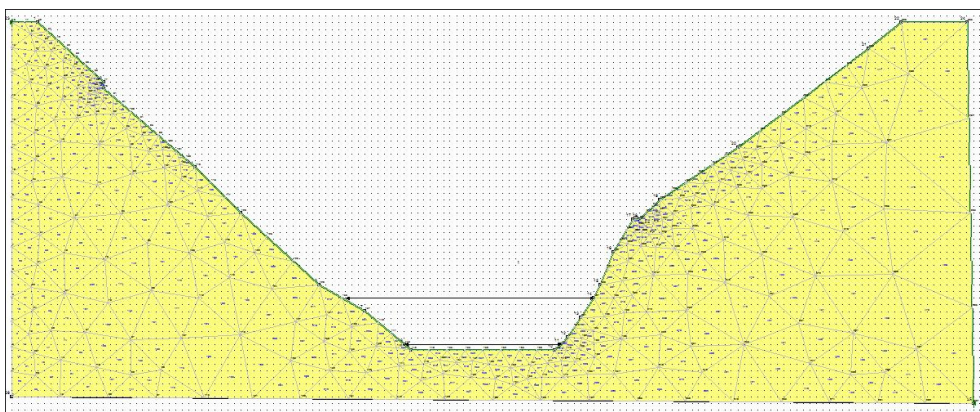


Fig. 5.1 – Perfil transversal e malha usada na análise.

A malha foi gerada automaticamente sendo definida por elementos finitos triangulares. Gerando automaticamente a malha, evitam-se possíveis erros de sobreposição de nós ou elementos susceptíveis de acontecer caso a malha seja definida manualmente. Constituída por 484 elementos triangulares, a malha é mais apertada nas zonas em que tal é mais necessário, isto é, junto à superfície e nas imediações do leito do rio, onde, previsivelmente se podem dar situações de instabilidade e escorregamentos.

De modo a analisar a situação equacionada, foram tomadas em consideração algumas suposições de forma a colmatar dados em falta ou incompletos. Assim, e face à informação existente, assumiu-se que o nível das águas estava inicialmente nos 10 metros, fazendo-o variar até ao nível de 1 metro por meio de um ciclo de esvaziamento. Estas considerações foram feitas cruzando o nível actual da altura de água no rio com as pretensões da EDP, disponíveis no site da mesma. Face à falta de dados rigorosos acerca do tipo de material que compõe as encostas em causa, considerações tiveram de ser feitas nomeadamente no que se refere às características de permeabilidade e resistência do solo. As necessárias funções escolhidas para caracterizar o maciço e fazer o software funcionar foram as ‘Silty Sand’, disponíveis nos gráficos seguintes e descritas pela tabela 5.1. Como referido no capítulo 3, foi assumido durante a análise que o material constituinte das encostas seria o solo residual xistento, e que este teria características próximas de um solo silto-argiloso. Daí a escolha das funções associadas ao material ‘silty sand’ visíveis na figura 5.2.

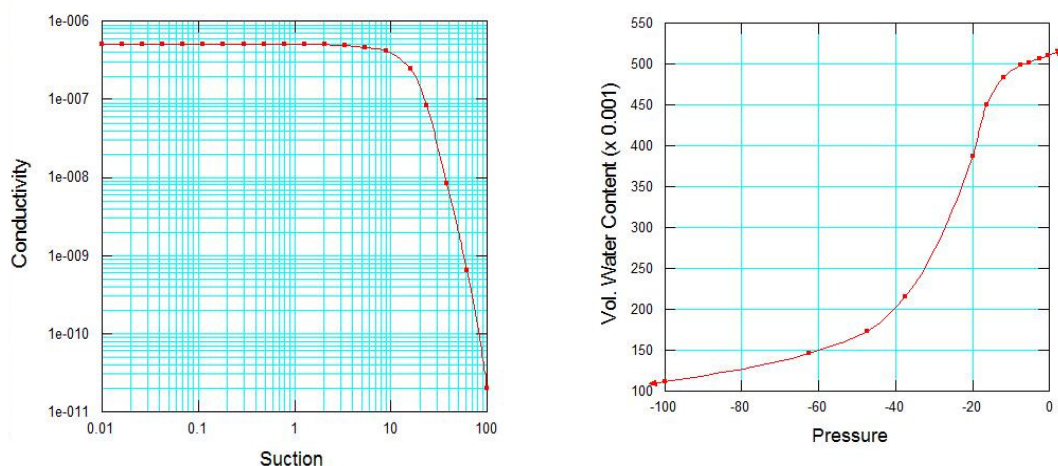


Fig. 5. 2 – Curvas de condutividade/permeabilidade hidráulica e teor em água usadas na análise de estabilidade.

Tabela 5. 1– Parâmetros da função utilizada.

#	K-sat (m/s)	Θ_s	AEV (kPa)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)
6	$5,00 \cdot 10^{-7}$	0,51	12	0,008	0,07

Condutividade hidráulica e teor em água foram associados ao material constituinte da encosta. Sendo esta constituída previsivelmente por solo residual xistento, assumiu-se também que a permeabilidade será igual tanto nas direcções horizontal como vertical. Esta assumption é puramente académica e, porventura, não se coadunará com a situação real. A análise incidiu também na variação do valor do parâmetro k , caracterizador da permeabilidade do material. Inicialmente fixado em $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, o parâmetro k , foi alterado, mudando-se a ordem de grandeza do mesmo. É de assinalar um erro cometido nesta fase. Ao definir a região em causa e suas propriedades, a análise está forçosamente a

assumir que o maciço é homogêneo. Ora, tratando-se de uma encosta natural, tal probabilidade é baixa. E reduz-se mais ainda quando a informação disponível aponta para a existência no interior do maciço de blocos rochosos que aumentam a resistência e alteram as condições de permeabilidade. Assim, para efeitos da análise, considerou-se um solo menos resistente do que aquele que existe na realidade, o que por si só origina resultados um pouco desfasados daqueles que efectivamente se registariam com uma modelação mais consentânea com a realidade.

A descida do nível da água foi simulada recorrendo à atribuição de um valor de carga piezométrica de 10 metros no início na situação inicial e de 1 metro passadas 6 horas. A restauração do nível inicial da água foi feita assumindo que esta se dá ao fim de 24 horas completando deste modo o ciclo esperado para um dia. Este ciclo foi também modificado e foram testadas opções com tempos de esvaziamento mais curtos: 4, 2, 1 e 0,5 horas.

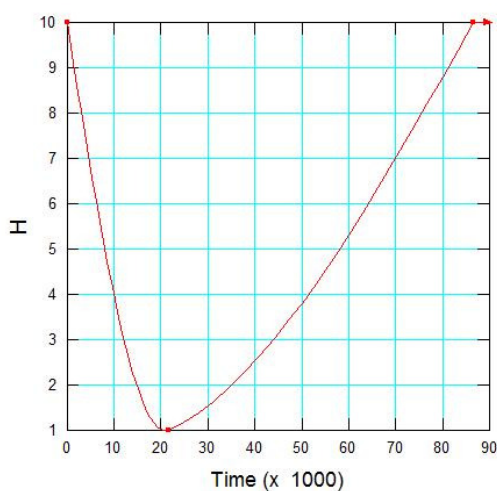


Fig. 5. 3 – Simulação do abaixamento do nível de água em 6 horas.

Introduzidos todos os dados referidos anteriormente e graças à versatilidade do software utilizado, é possível obter os valores do factor de segurança ao longo do abaixamento rápido do nível de água da albufeira de jusante, recorrendo à conjugação entre o software SEEP/W e SLOPE/W, que se baseia na aplicação do método das fatias. Para que o software efectue os cálculos, dados sobre a constituição dos maciços que compõem as encostas terão forçosamente de ser introduzidos. Foram usados dados que, não sendo reais por falta de informações geológicas, serão os que melhor se aproximam do material presumivelmente constituinte das encostas no local. Na tabela 5.2, encontram-se os dados utilizados para caracterizar o solo constituinte da encosta, utilizado no software de análise de estabilidade, SPLOPE/W.

Tabela 5. 2– Dados utilizados para a análise de estabilidade das encostas.

Características do Solo da Encosta	
Peso Volúmico.	20 kN/m ³
Coesão	30 kPa
Ângulo Atrito	32°

Uma vez que o rio escavou a paisagem formando um ‘V’, a análise pode ser feita para ambas as margens, obtendo-se duas curvas que reflectem a evolução do factor de segurança ao longo do dia, de 15 em 15 minutos, face ao esvaziamento e enchimento da albufeira. Uma vez que o perfil transversal analisado possui uma das margens com declive mais acentuado (a margem direita) optou-se por analisá-la com mais detalhe. Face a tantos parâmetros em falta e confrontado com várias hipóteses de variação dos inputs, escolhas tiveram de ser feitas para prosseguir com a análise. Parâmetros como a inclinação da vertente, tempo de esvaziamento e enchimento, duração do ciclo de esvaziamento e enchimento da albufeira, ângulo de atrito, coesão ou permeabilidade podem ser alterados, procedendo-se à análise do efeito no factor de segurança ao longo do tempo. Se a somar a tudo isso se juntar o facto do rigor da análise em estado transitório feita pelo SEEP/W depender também do número de ‘intervalos temporais’ em que se deve e tem de dividir o tempo total da análise, então o problema complica-se um tanto. De modo a tornar a análise feita pelo SEEP/W e SLOPE/W mais precisa, os intervalos temporais adoptados foram, como referido, de 15 minutos. Isto significa que, para analisar um dia, 96 intervalos temporais foram gerados, funcionando cada um deles como uma espécie de fotografia do comportamento do sistema ao longo do dia.

Para se proceder ao cálculo dos factores de segurança utilizando o SLOPE/W, foi utilizado o método ‘grid and radius’ em que se esquematiza uma malha de centros e outra de raios para que inúmeras superfícies de deslizamento sejam criadas e o factor de segurança de cada uma calculada. A malha de centros utilizada foi 21x21 e o número de incrementos na malha de raios foi 12. Desta forma, foram criadas 5292 superfícies de deslizamento que foram analisadas pelo programa em cada intervalo temporal. A recolha de dados foi algo morosa. Um aperfeiçoamento do processo não foi plenamente conseguido, o que significa que os dados podem, em alguns casos, por força de algum erro no processo, não ter a precisão máxima.

5.2.1.1 Caso 1

Devido à extensão das tabelas obtidas, estas estão disponíveis, na totalidade, em anexo. Assim, os resultados expostos neste capítulo são principalmente exibidos em forma de gráficos. A totalidade dos gráficos recolhidos encontra-se, juntamente com as tabelas, em anexo. No primeiro dos gráficos (figura 5.4), mostra-se a evolução do factor de segurança ao longo de um dia, para um tempo de esvaziamento de 6 horas. É de salientar a escala vertical utilizada, extremamente curta (entre 0,8 e 1,1), devido ao facto do factor de segurança se alterar pouco ao longo do dia.

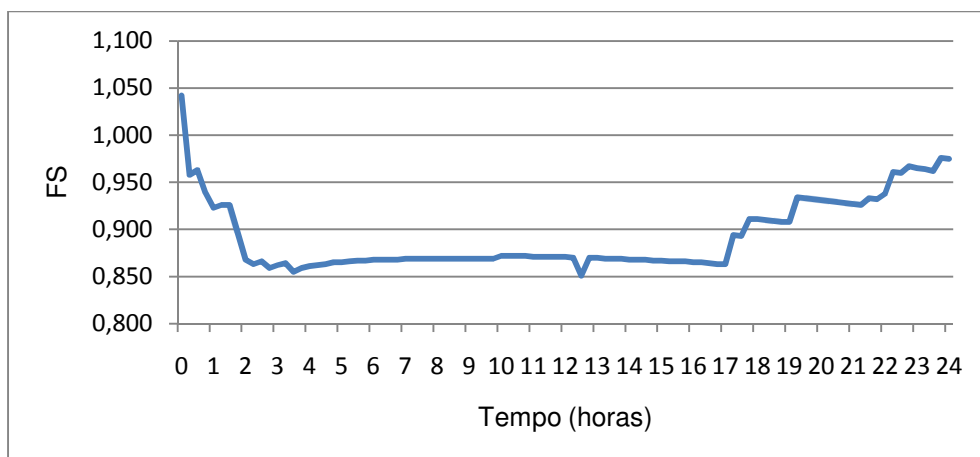


Fig. 5. 4 – Evolução do FS ao longo de um dia para um esvaziamento de 6 Horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

A construção de gráficos de evolução do factor de segurança é, como salientado anteriormente, um processo algo moroso. Acrescente-se, então, que os tempos de esvaziamento foram alterados e diminuídos. Uma análise preliminar foi feita para tempos de abaixamento do nível das águas de 4, 2, 1 e 0,5 horas, mantendo os restantes inputs inalterados. Estas análises foram feitas com o intuito de se constatar de que forma a diminuição do tempo de esvaziamento influencia a evolução do factor de segurança. Fixando-se a permeabilidade inicial de $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, constata-se que a diferença não é de grande monta. As diferenças existentes ao longo do tempo são reduzidas, denotando-se apenas um ligeiro aumento do factor de segurança várias horas após o fim do ciclo de esvaziamento. Certo é a tendência para que a recuperação do factor de segurança se faça tanto mais cedo quanto menor for o valor do tempo de esvaziamento. A pouca variação nos valores do factor de segurança foi uma constante ao longo da análise e os resultados exibidos neste capítulo são uma amostra disso mesmo. Mais tabelas e gráficos estão disponíveis em anexo, atestando precisamente este cenário. Na fase do trabalho e face aos resultados obtidos, pôs-se a questão de que a baixa permeabilidade do maciço podia estar na origem da pouca 'sensibilidade' na variação do factor de segurança. Esta ideia foi confirmada com o aumentar do valor do coeficiente de permeabilidade para ordens de grandeza superior. Ao diminuir o coeficiente de permeabilidade para valores na ordem 10^{-10} , verificaram-se resultados semelhantes aos exibidos neste capítulo.

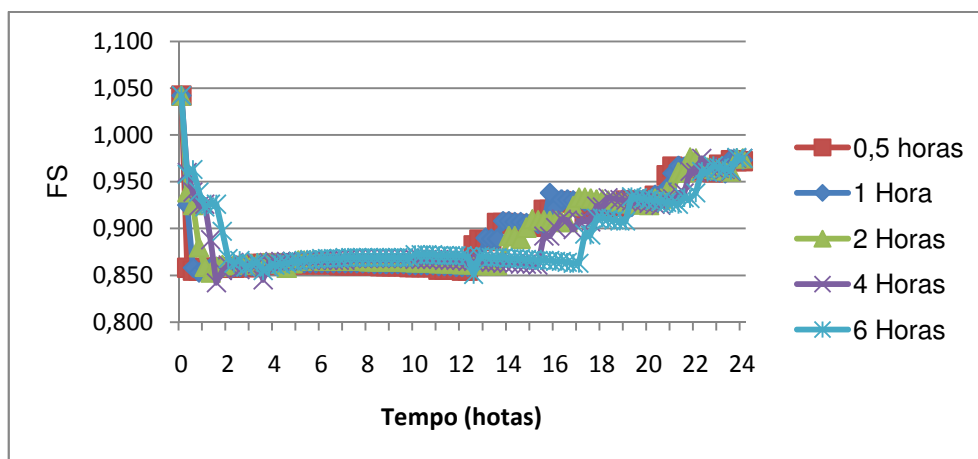


Fig. 5. 5 – Comparação da evolução do factor de segurança para um $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s e vários tempos de esvaziamento.

A pouca sensibilidade do factor de segurança está então, aparentemente, relacionada com o valor da permeabilidade. Tratando-se de um período de análise tão curto (24 horas) e de um tempo de abaixamento de 6 horas, as condições da encosta não têm tempo para ser significativamente afectadas. A variação do nível freático é, de resto, quase imperceptível para um tempo de abaixamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s (figura 5.6). Esta imperceptibilidade verifica-se também ao analisar a evolução do teor em água ao longo das 24 horas nos pontos onde o nível freático oscila. Os pontos da malha mais distantes não são afectados pela descida e subida do nível freático, à semelhança do que acontece com o ponto 193 (figura 5.6).

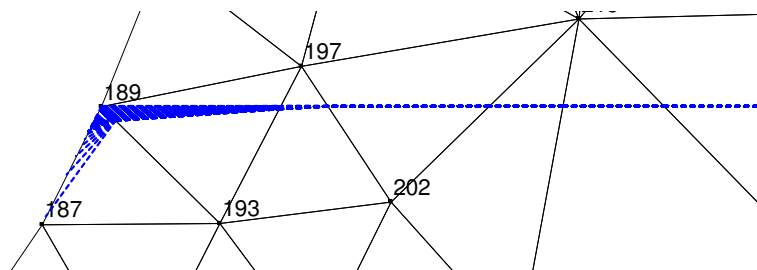


Fig. 5. 6 – Alteração do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

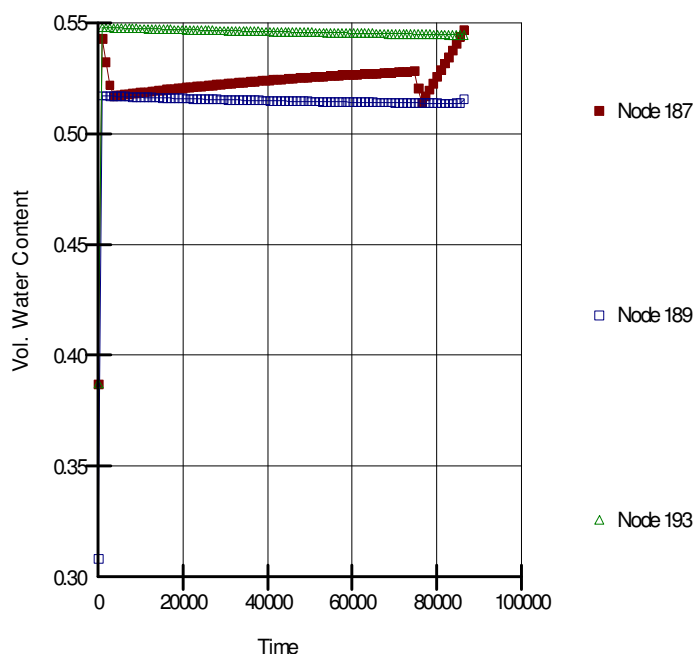


Fig. 5. 7 – Evolução da percentagem do teor em água em 3 dos pontos constantes da figura 5.6.

De modo a verificar se o teor em água influencia a evolução do factor de segurança, procedeu-se à mudança do coeficiente de permeabilidade. Ao ser aumentada a sua ordem de grandeza, o nível freático é mais sensível ao ciclo de esvaziamento/enchimento, tal como o teor em água do solo. Assim, vários aumentos de magnitude do coeficiente k foram feitos sucessivamente. A magnitude de k foi sendo aumentada até $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, tendo sido a mesma análise de evolução dos factores de segurança feita para $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Verifica-se, como seria de esperar, que as situações em que foi usado um coeficiente de permeabilidade intermédio (entre $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s e $5 \cdot 10^{-4}$ m/s), os cenários apresentaram-se como sendo, também eles, intermédios. Isto significa, por exemplo, que o abaixamento do nível freático foi maior que o visível na figura 5.6 mas menor do que o abaixamento patente na figura 5.8.

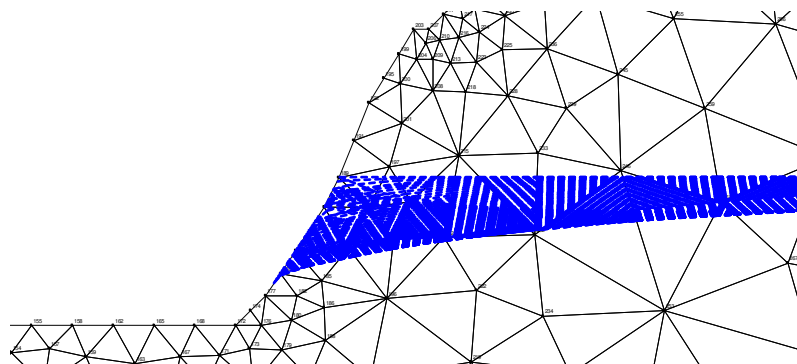


Fig. 5. 8 – Alteração do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

É bem notório que há uma ocasião em que o abaixamento do nível freático é maior e bem mais demarcado do que com a permeabilidade inicial. Neste caso, o nível freático desce quase até ao nível mínimo do rio de 1 metro. Optou-se então por analisar uma permeabilidade mais reduzida, na ordem dos $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, uma vez que não é esperado que o material constituinte da encosta tenha tanta permeabilidade, ao nível de uma areia média. A oscilação do nível freático perante esta permeabilidade não é tão vincada, mas permite uma análise mais focalizada da variação do teor em água na da malha. Elaborou-se então um gráfico semelhante ao da figura 5.7 materializado na figura 5.11.

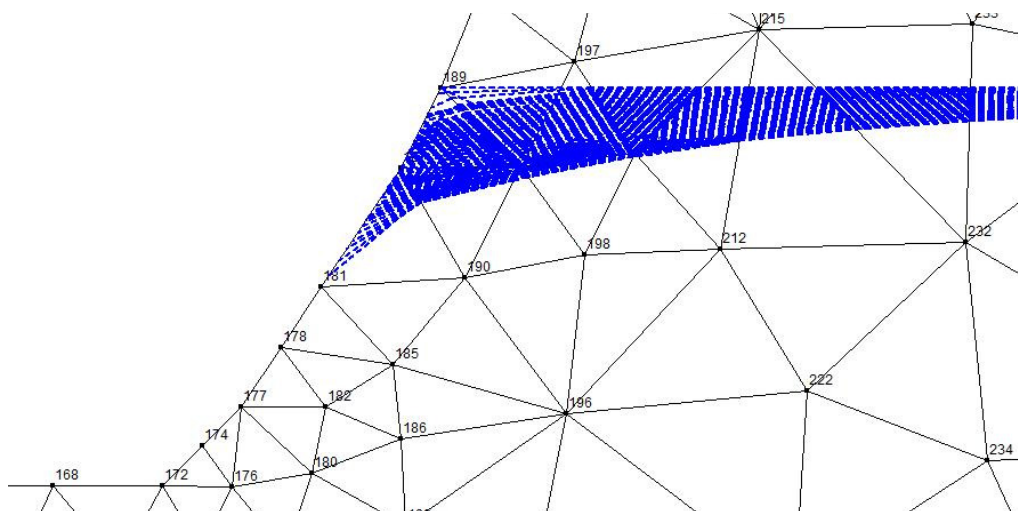


Fig. 5. 9 – Variação do nível freático, para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Constata-se, então, que os valores do teor em água acompanham a variação do nível freático, que vai descendo progressivamente ao longo do dia atingindo o mínimo ao intervalo 57, o equivalente a 14h15. A partir desse instante, o nível freático inicia o processo de subida. É de salientar, como se comprova pela figura 5.10, que face à elevada permeabilidade do terreno considerado, o nível freático não recupera totalmente a posição inicial. A linha tracejada mais elevada da figura 5.10 representa o nível freático no início do ciclo, a linha intermédia no fim do ciclo e a inferior é o nível freático mais baixo atingido em todo o ciclo. Este facto significa que o nível freático não tem tempo para recuperar totalmente a sua posição inicial ao fim das 24 horas. Assim, se um novo ciclo fosse iniciado após o término do dia, o nível freático estaria situado numa posição diferente da inicial.

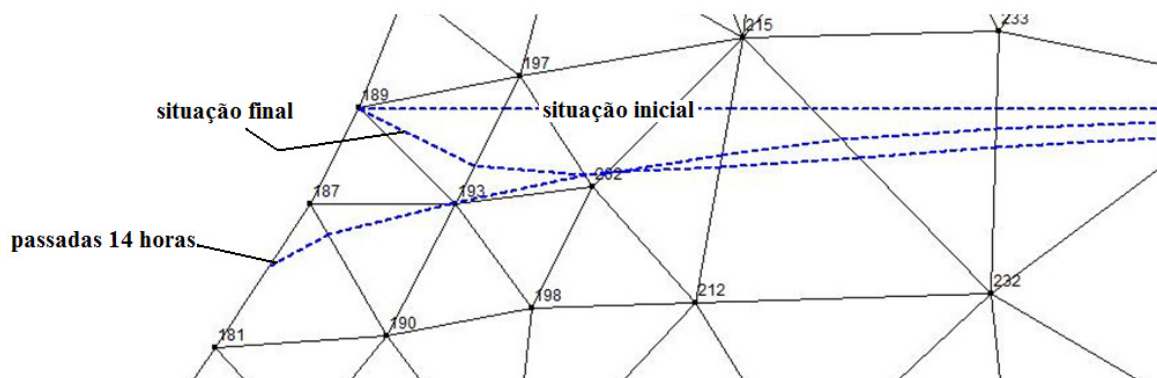


Fig. 5. 10 – Nível freático em três tempos diferentes.

Nesta fase, procurou-se estabelecer relações entre a descida do nível freático e a variação do factor de segurança. Por conseguinte, procedeu-se à análise da variação do teor em água ao longo do dia em alguns pontos da malha. Repare-se que a maioria dos pontos cuja variação é menor, são visíveis na figura 5.9 como estando abaixo da zona em que o nível freático oscila. Já os pontos com elevada quebra da percentagem de teor em água estão dentro da ‘zona de influência’ do nível freático, isto é entre o nível freático mínimo e o inicial. Esta diminuição parece acompanhar o factor de segurança.

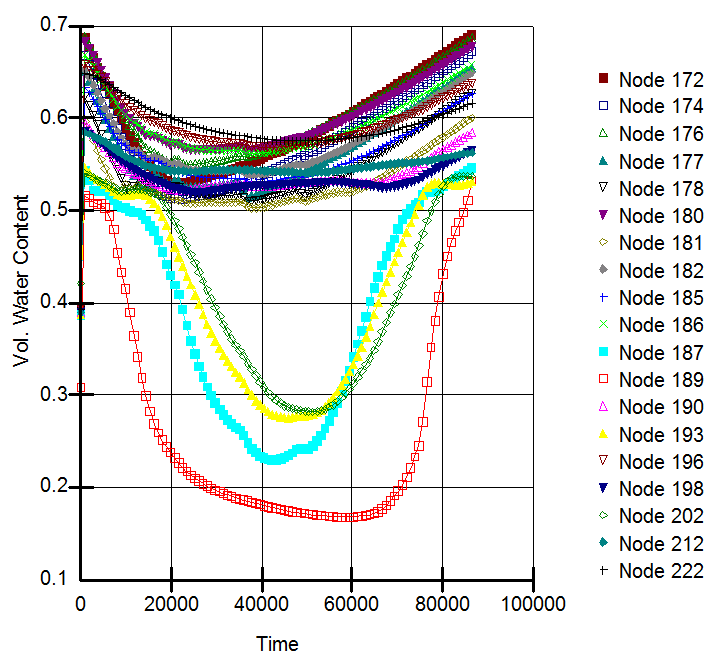


Fig. 5. 11 – Variação da percentagem do teor em água em vários pontos da malha.

A maioria dos pontos (figura 5.11) regista uma ligeira queda no valor percentual do teor em água. Esta queda do teor em água, diminui o peso da massa deslizante, o que deveria implicar um aumento do factor de segurança. No entanto, não é essa a situação que se verifica. Aparenta então que a diminuição do teor em água não é em magnitude suficiente para alterar a segurança da encosta, não passando por aí a razão para a flutuação dos valores do factor de segurança.

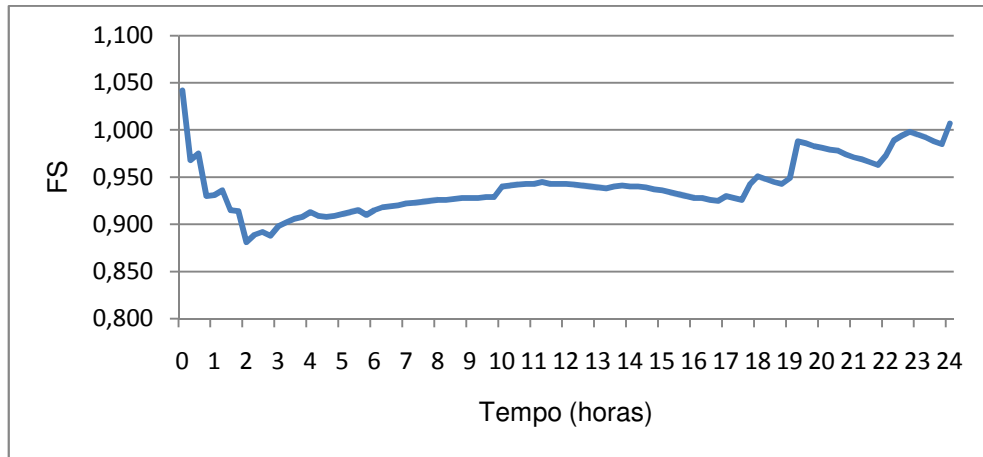


Fig. 5. 12 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

A figura 5.13 tenta estabelecer uma relação entre o factor de segurança mínimo com o nível freático. Quando o nível freático está situado numa posição elevada, como é o caso de 2 horas após o início do ciclo (figura 5.13, à direita), o factor de segurança é o mais baixo registado. Quando o nível freático atinge o nível mais baixo (figura 5.13, à esquerda), o factor de segurança atinge um valor maior. Esta situação confirma o que foi dito anteriormente. Confirma-se que o factor de segurança diminui quando o nível freático é superior, mas sendo ainda perceptível o porquê. Assim, retiraram-se mais dados das análises para tentar explicar esta situação. Sendo a água o responsável pela mudança dos valores do factor de segurança, ponderou-se e tentou-se avaliar qual a influência que as pressões neutras têm na segurança da encosta, neste caso.

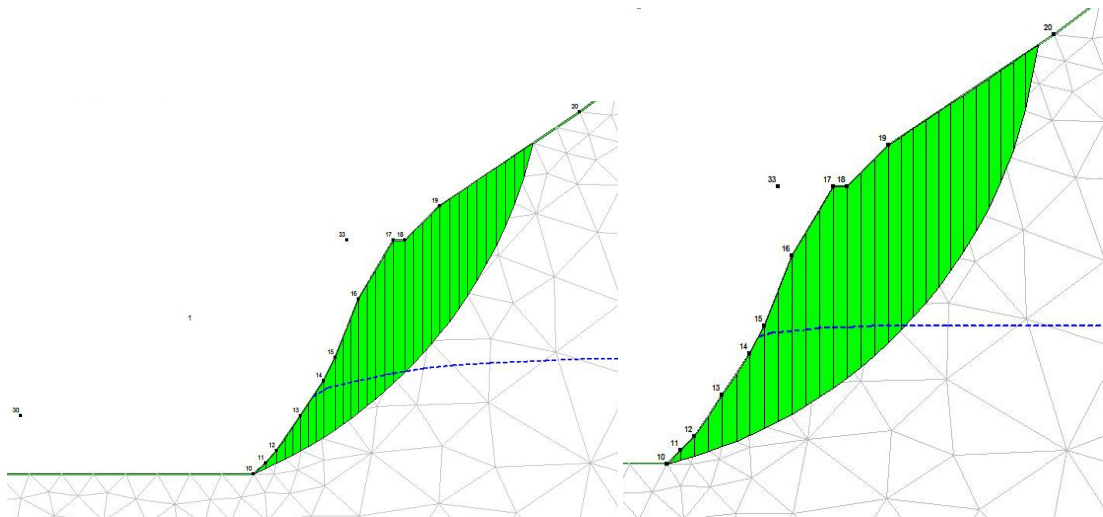


Fig. 5. 13 – Comparação do nível freático mínimo (esquerda) e factor de segurança mínimo (direita).

Dados interessantes são passíveis de ser retirados da análise efectuada pelo SLOPE/W. É possível, por exemplo, avaliar o valor da pressão neutra ao longo da superfície de deslizamento. O programa permite comparar os valores de pressão neutra em cada fatia. Esta análise seria por ventura precisa caso as superfícies de deslizamento fossem semelhantes ao longo do tempo. Ora, a verdade é que, neste caso, as superfícies de deslizamento não são sempre iguais ao longo do tempo. Disso é exemplo as cunhas de deslizamento visíveis na figura 5.13. Significa isto que fazer uma comparação entre fatias

da superfície de deslizamento em momentos diferentes não é o modo mais correcto para perceber a influência que a pressão neutra tem no factor de segurança. As fatias acima do nível do nível freático têm valores de pressão neutra nula. Assim, o problema da comparação entre fatias em intervalos temporais distintos consiste no facto do número de fatias que ficam abaixo do nível freático não serem sempre as mesmas. Significa isto que comparar a fatia #1 num determinado momento com a fatia #1 noutro momento distinto, pode originar erros, bastando para isso que a superfície de deslizamento crítica seja diferente. Desse modo, a comparação entre fatias, neste caso, é falaciosa e induz em erro. Uma forma mais correcta de avaliar a influência da pressão neutra ao longo da superfície de deslizamento é procedendo ao somatório das pressões ao longo de toda a superfície. Comparar a variação das pressões neutras ao longo de toda a superfície crítica é a hipótese que foi seguida. Procedeu-se à recolha dos valores do somatório das pressões neutras de 2 em 2 horas. Nas figuras 5.14 e 5.15 (em que 2 horas equivalem a 8 intervalos temporais) apresentam-se os gráficos resultantes. A primeira figura apresenta o gráfico da variação dos valores das pressões neutras, enquanto a segunda reúne os valores usados para construir o gráfico presente na figura 5.12.

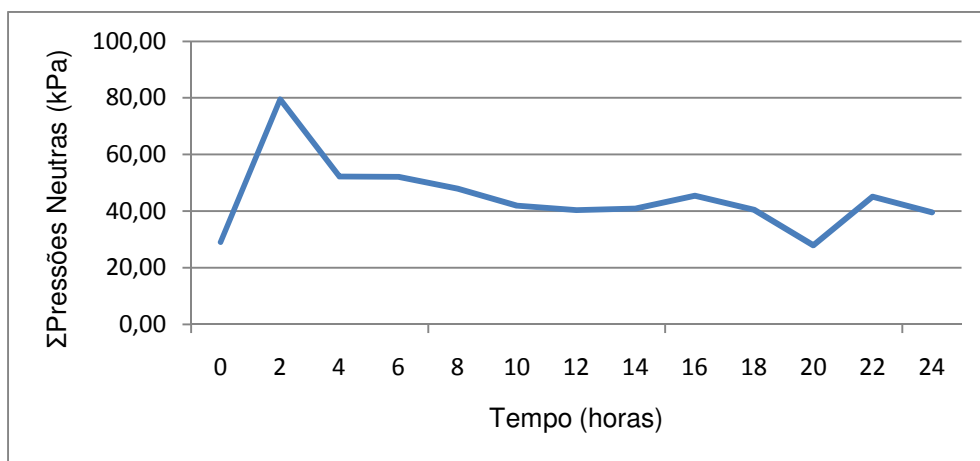


Fig. 5. 14 – Evolução das pressões neutras para um tempo de esvaziamento de 6 horas com $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

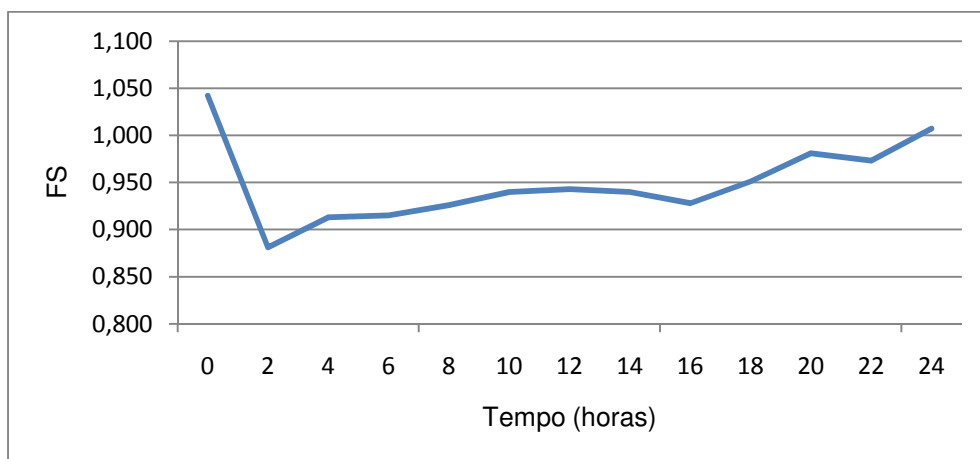


Fig. 5. 15 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas com $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Parece inequívoca a relação entre as pressões neutras e a evolução do factor de segurança. Em termos qualitativos, quando o valor da pressão neutra sobe, há uma descida do valor do factor de segurança e

vice-versa. Ao aumentar o valor da pressão neutra na base das fatias, o factor de segurança desce como resultado do papel destabilizador que possui. A pressão neutra na base da superfície de deslizamento abaixo do nível freático parece ter maior influência na afectação do factor de segurança do que a modificação do teor em água nos pontos acima referidos. A evolução de ambos os gráficos é quase simétrica pelo que a ilação retirada acaba por ser quase inevitável: o factor de segurança varia de modo inverso com a variação das pressões neutras na superfície de deslizamento.

5.2.1.2 Caso 2

Outra análise efectuada foi uma situação virtual, não prevista para o caso da barragem do Fridão. Simulou-se a situação em que, em vez de 10 metros, a altura da água no início do ciclo seria 21 metros, descendo até à mesma cota mínima anterior: 1 metro. Simulou-se a situação usando um $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, o que não provocou grandes oscilações no nível freático. Assim, optou-se por analisar o comportamento da encosta modelada para uma permeabilidade significativamente maior, usando um coeficiente de permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Simulou-se um ciclo de esvaziamento e enchimento semelhante ao inicial, levando 6 horas para que o nível da água descresse e 18 para fazer o nível da água subir de novo. De modo a que a tarefa de recolher os factores de segurança não se tornasse demasiado épica, escolheu-se aumentar o tamanho dos intervalos temporais, aumentando-os de 15 para 30 minutos. Aumentou-se, também, o tamanho do ciclo. Uma vez que a situação já não assenta num caso real, aumentou-se o tamanho do ciclo para ver o que acontece após as 24 horas. Um ciclo semelhante ao da figura 5.16 foi, desta forma, utilizado.

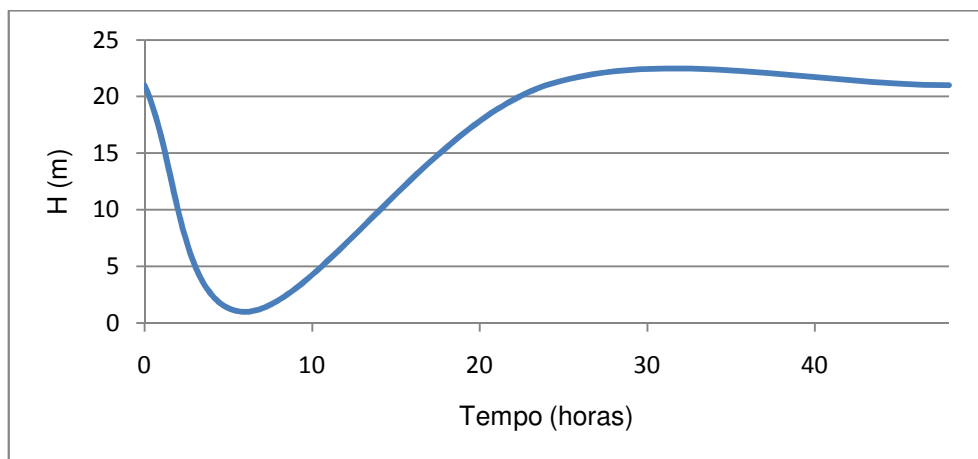


Fig. 5. 16 – Ciclo de esvaziamento usado para simular o caso 2.

Os resultados quanto ao factor de segurança são os apresentados no gráfico da figura 5.17. Há também uma queda no valor do factor de segurança, uma recuperação que se inicia horas após a altura em que o nível da água é mínimo e uma estabilização do factor de segurança após a retorno à situação inicial. Salienta-se o facto de a variação do factor de segurança ser, neste caso superior à anterior. O factor de segurança permanece mais ou menos constante após as 30 horas.

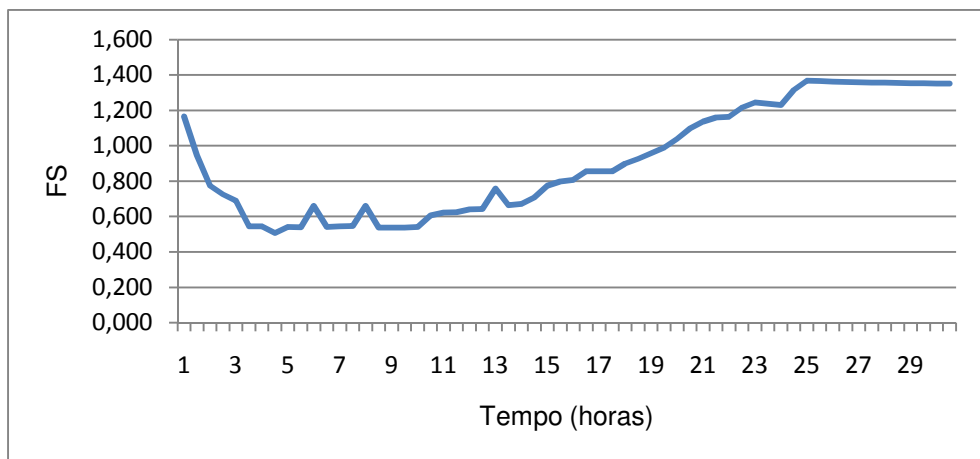


Fig. 5. 17 – Evolução do factor de segurança com permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

De modo similar ao que foi feito anteriormente, também se recolheram informações acerca do teor em água ao longo do tempo do ciclo nos pontos em que o nível freático desce de facto e nas suas imediações. Tanto o gráfico como a zona analisada são visíveis na figura 5.18. Visível é também a esquematização do nível de água inicial e final, materializado por meio de linhas horizontais à esquerda da encosta. Nota-se então que o teor em água demora mais do que as 24 horas para recuperar os níveis de teor em água iniciais, tal como acontece de resto com o factor de segurança, embora em ambos os casos de modo não muito vincado.

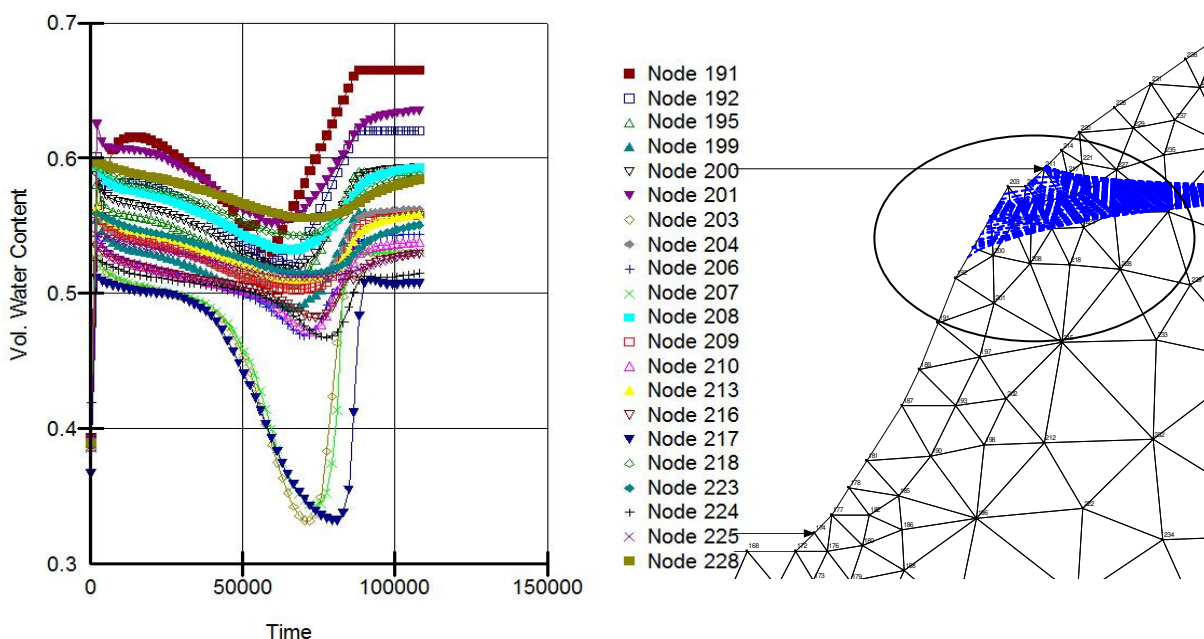


Fig. 5. 18 – Evolução do teor em água (à esquerda) dos pontos dentro da zona assinalada à direita.

A comparação entre a evolução do factor de segurança, na figura 5.19 e o somatório das pressões neutras, na figura 5.20, foi também efectuada. Uma relação semelhante à do caso anterior existe também neste caso, sendo a única excepção o intervalo 48, em que o aumento do somatório do factor de segurança não acarreta uma descida do factor de segurança. Esta anomalia está provavelmente

associada ao facto de a superfície de deslizamento crítica neste intervalo ser muito maior do que nos outros considerados. Assim, o somatório das pressões neutras sendo grande, não tem tanta influência no factor de segurança. Fica a ideia de que o factor de segurança segue a curva ascendente dos intervalos adjacentes, pois, proporcionalmente, as pressões neutras não têm capacidade para afectar a segurança. De facto, sendo o único ponto que não segue a tendência geral, a explicação parece corroborar a ideia.

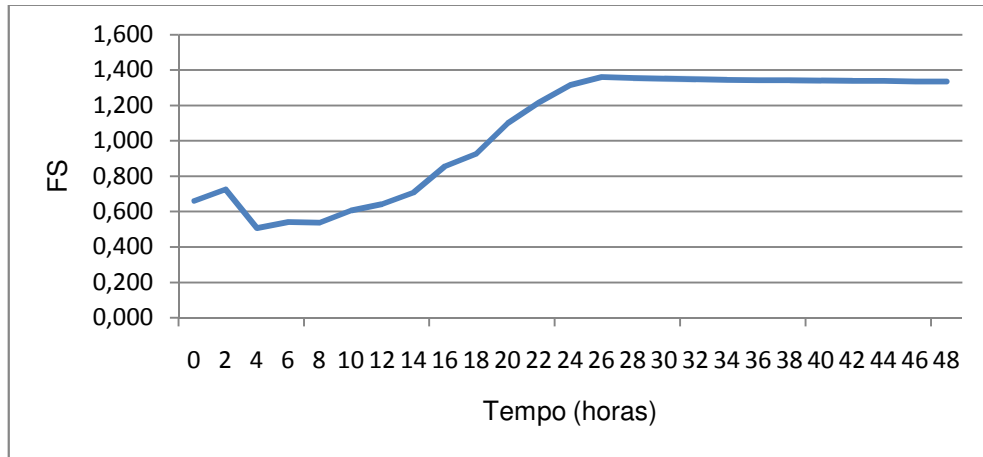


Fig. 5. 19 – Evolução do factor de segurança.

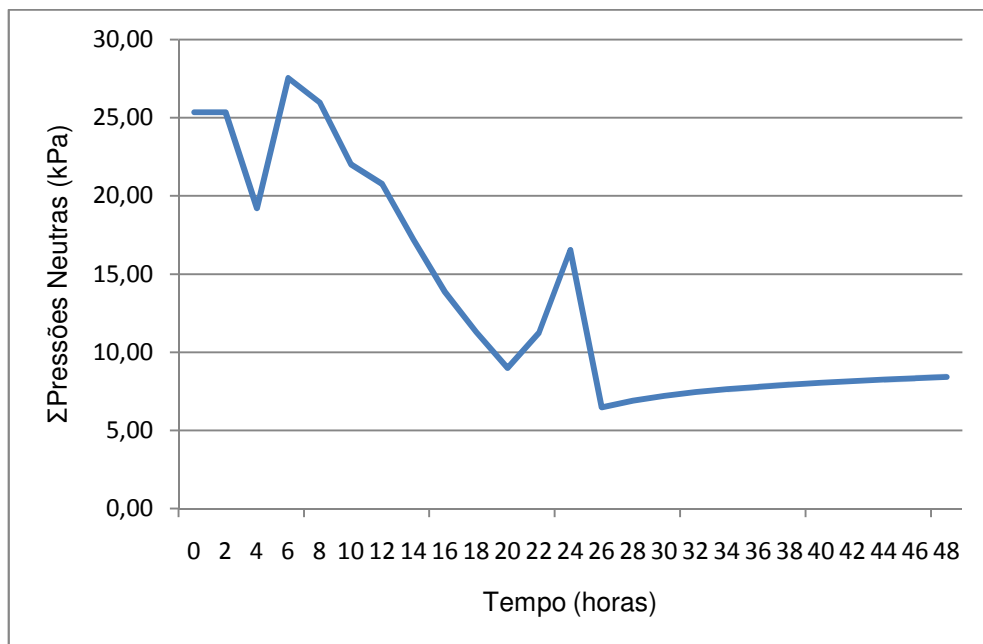


Fig. 5. 20 – Evolução do somatório das pressões neutras ao longo da superfície crítica de deslizamento.

5.3 ALTO DOURO VINHATEIRO

A modelação de um caso típico de escorregamentos numa encosta do ADV é uma tarefa algo delicada face à escassez actual da informação disponível sobre este tema. A falta de dados pluviométricos, características do solo das encostas, dificuldades de modelação e outros factores complicaram o estudo deste caso. Contudo, o interesse em analisar as situações de instabilidade e a necessidade em perceber as particularidades existentes naquela zona, forçou a, pelo menos, uma tentativa. A falta de elementos topográficos, ensaios *in situ* e dados pluviométricos precisos da zona pretendida afastaram, de algum modo, a simulação da realidade. Assim, os dados usados, embora não sendo reais, pretendem dotar a modelação de alguma verosimilhança, tendo como objectivo, o despertar do interesse deste tema para que futuramente sejam realizados estudos com dados mais aceitáveis.

Face à situação actual, uma breve pesquisa permitiu perceber que, principalmente por motivos económicos, há encostas moldadas em patamares. Como referido no capítulo 3, esta é a técnica que causa maiores problemas aos agricultores devido aos deslizamentos que tendencialmente provoca. Sendo, no entanto, lucrativa, esta prática não perdeu força e continua a ser utilizada. Embora esta prática esteja regulamentada (PIOT-ADV), a sua abrangência cinge-se a casos presentes e futuros, não tendo efeitos retroactivos. Deste modo, a possibilidade de existirem patamares em encostas com mais de 50% de inclinação é real e pode-se comprová-lo com visitas a algumas quintas da região. É o caso de uma encosta moldada em patamares que se pretende analisar. A encosta é moldada, como explicado anteriormente, remexendo-se o solo superficial e usando-o para formar os patamares. Um dos poucos dados existentes, resultado de ensaios *in situ* que constantes de um estudo preliminar feito para o GEG, atesta que a profundidade da camada de solo remexido anda em torno dos 2,5 metros. Abaixo desta camada, encontra-se o solo original, presumivelmente de origem xistosa. Dados reais sobre este solo não existem, pelo que algumas suposições, foram feitas. Parâmetros como a curva de retenção de água no solo ou permeabilidade não estavam, à data disponíveis, pelo que a escolha destes, para que uma análise fosse efectuada, foi feita sem grandes bases científicas.

5.3.1 CONDIÇÃO FRONTEIRA

Dados pluviométricos exactos são também dados em falta. O carácter único e irregular abordado e explicado no capítulo 3 aliado à falta de postos topográficos na zona em causa não permitiu o uso de valores reais relativos à zona em causa no processo de estimativa das infiltrações no solo. Assim, abdicou-se da ideia original que consistia em comparar o efeito que os diferentes tipos de chuva têm na alteração de teor em água e pressões neutras do solo. A ausência de tantos dados excluiu um aprofundamento do estudo a realizar, ficando-se por uma abordagem superficial. Não obstante, o estudo realizou-se quase em forma de protótipo, sendo o objectivo primordial o estudo futuro desta temática em detrimento da obtenção de resultados conclusivos à data de elaboração deste trabalho. Assim, optou-se por estudar um fenómeno extremo registado no ADV: chuva muito intensa num intervalo de tempo muito reduzido. Este fenómeno foi estimado com base em parâmetros de curvas IDF e em [12]. Em casos normais, as curvas IDF seriam suficientes. Porém, face à inexistência de postos na zona a analisar que registem chuvadas intensas, houve a necessidade de cruzar a informação das curvas com os relatos de notícias de fenómenos extremos, uma vez que a aplicação do critério ‘proximidade’, pelo menos em termos climáticos, não parece ser o mais adequado ou sequer suficiente, como foi anteriormente devidamente desenvolvido. Cruzou-se a informação do registo de uma chuvada intensa com duração de cerca de 30 minutos com intensidade de precipitação em torno dos 60mm/h com os dados das curvas IDF para um período de retorno de 1000 anos. Os valores de a e

b necessários para calcular a intensidade de precipitação foram os retirados de [22] e substituídos na equação 4.15.

Os valores de a e b usados para a construção das curvas IDF visíveis na figura 5.22 estão presentes na tabela seguinte.

Tabela 5. 3 – Parâmetros a e b usados na equação 4.15 para obter curvas IDF.

	a	b
Casal Soeiro	1061,50	-0,641
Chaves	542,72	-0,610
Miranda do Douro	351,19	-0,404

O posto escolhido foi, deste modo, o de Chaves com um valor de 68,16 mm/h. Curioso é notar que analisando as posições dos polígonos de Thiessen, verifica-se que o posto escolhido é aquele cujo polígono abrange precisamente a zona do ADV (figura 5.21).

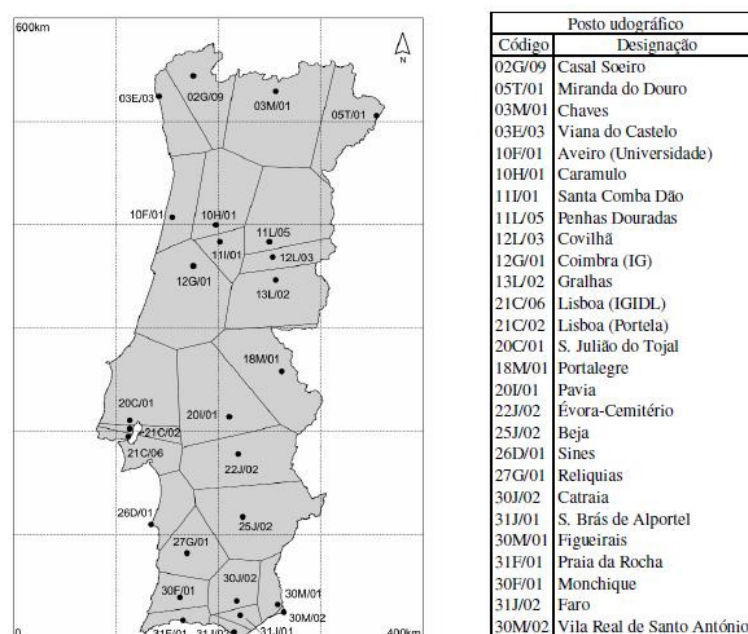


Fig. 5. 21 – Polígonos de Thiessen de 27 postos udográficos.

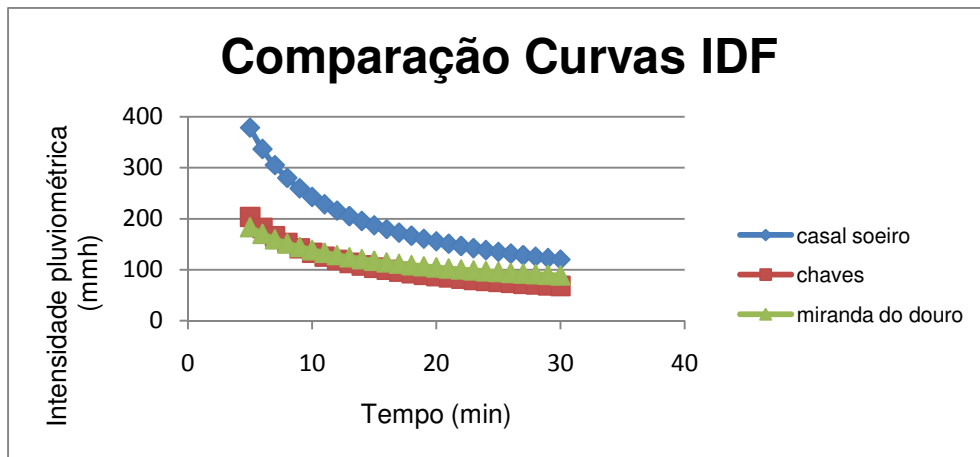


Fig. 5. 22 – Curvas IDF dos três postos considerados. O período de retorno admitido foi 1000 anos.

Pela imagem gráfica, constata-se de que o posto de Chaves é o que mais se aproxima do valor tomado como referência de 60 mm/h mencionado. Esse facto é plenamente comprovado pelos valores da tabela 5.4. Assumiu-se, assim, que o posto udográfico que melhor se adapta à região em causa é o de Chaves e foram os valores desse mesmo posto que foram empregados para simular o fenómeno da precipitação no software.

Tabela 5. 4 – Valores da intensidade de precipitação para uma chuvada de 30 minutos. Tempo de retorno de 1000 anos.

Posto Udográfico	Intensidade (mm/h)
Casal Soeiro	119,97
Chaves	68,16
Miranda do Douro	88,88

Com base neste valor, foi então ultrapassado um obstáculo no caminho para a modelação da precipitação numa encosta de cultivo de vinha. O valor da intensidade foi depois convertido para unidades SI para que pudesse ser inserido no software a condição fronteira respectiva. Criou-se uma função de caudal unitário (q) em que a infiltração da chuva se dá durante 30 minutos, parando em seguida. Esta opção foi tomada porque os acontecimentos curtos de precipitação com menos de 1 hora, podem ser descritos pela intensidade média, não havendo tanto interesse em caracterizar os sub-intervalos de tempo, como acontece quando se aborda chuvadas longas [23]. Deste modo, foi introduzida uma condição fronteira de infiltração semelhante à representada pela figura 5.5

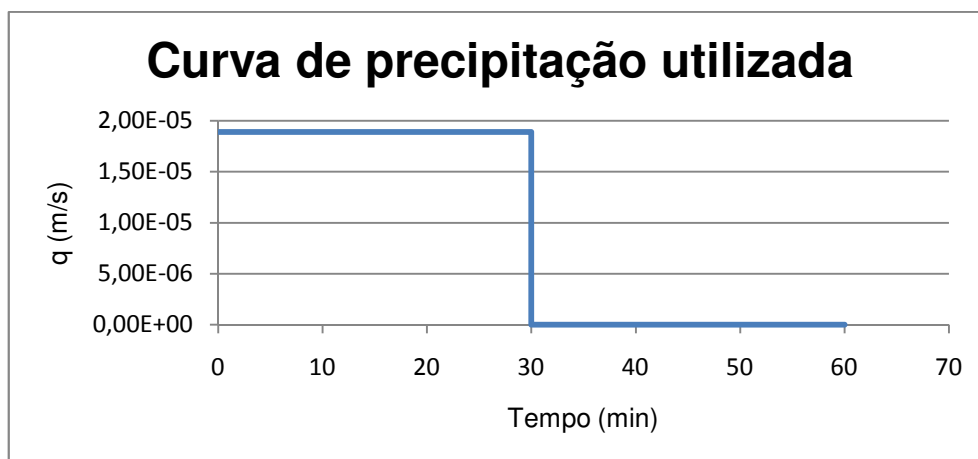


Fig. 5. 23 – Curva de precipitação usada no SEEP/W como condição fronteira.

5.3.2 Modelar a encosta

Como dito, o caso escolhido para uma tentativa de análise foi o de uma encosta moldada em patamares agrícolas que excedam o limite legal imposto actualmente. Actualmente, a lei permite que em encostas com declives entre 40% e 50% sejam construídos pequenos patamares. A encosta analisada tem um declive que está fora e acima deste intervalo. Há, provavelmente, encostas moldadas nestes termos com declives na ordem dos 70%, mas não será um caso tão extremo que será analisado. Optou-se por analisar uma encosta com declive de 61,(1)% de declive, o equivalente a 55°. A representação da encosta foi feita tendo em conta certos aspectos. Em primeiro lugar, a largura dos patamares foi representada de modo que fosse o mais estreita possível e que tivesse espaço suficiente para deixar passar um tractor. Estes factores são os mais tidos em conta pelos produtores aquando da construção dos patamares. Outro dado tido em conta na modelação foi a profundidade de solo remexido. Este valor anda em torno, de acordo com os dados recolhidos, dos 2,5 metros. A figura 5.6 mostra um extracto da encosta em que os patamares apresentados têm largura de 2 metros e a espessura do solo remexido (a verde) é de pelo menos 2,5 metros. Tal espessura mínima é atingida nos pontos interiores dos patamares em que a distância medida na vertical até ao maciço de solo original é de cerca de 2,5 metros (à excepção do patamar inferior, em que esta é de 2 metros). De resto, a modelação da encosta assenta em 3 patamares e numa altura de cerca de 14 metros. Este valor para a altura relativamente baixo, fica a dever-se à pouca necessidade de modelar uma encosta demasiado grande face às dificuldades apresentadas anteriormente, pois o benefício daí retirado seria escasso. O obstáculo seguinte prende-se com a escolha das funções de permeabilidade e curva de retenção a usar.

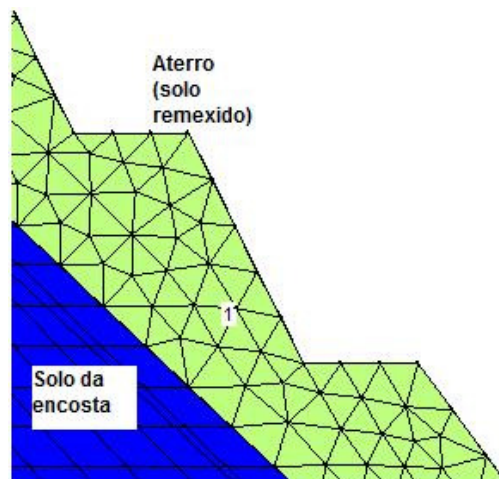


Fig. 5. 24 – Modelação da encosta em patamares de 2 metros de largura e cerca de 2,5 m de espessura mínima.

Perante a actual dificuldade em encontrar dados para realizar uma análise profunda sobre este tema, escolheu-se apenas efectuar uma análise usando o software SEEP/W. A ideia original seria proceder a um estudo semelhante ao feito com a encosta dos primeiros casos analisados neste trabalho. Contudo, face à carência de dados, os resultados que saíam de tal análise seriam irrealistas e não seria possível realizar um tratamento conveniente dos dados. Resulta, porém a convicção que esta modelação é suficiente para suscitar futuros estudos interessantes e substanciais desta temática. Desde que haja um incremento ao nível do número de dados disponíveis, é possível ir mais longe nesta área e realizar estudos mais profundos. Refinamentos e melhorias são obviamente possíveis e aconselháveis, face ao interesse de que este tema se reveste. Um futuro estudo acerca da afectação do factor de segurança que a precipitação provoca nas encostas alteradas parece bastante oportuna e útil. A complexidade e abrangência deste assunto impedem uma análise mais aprofundada neste trabalho. Consequentemente, optou-se por efectuar uma breve análise dos efeitos da precipitação nos valores de teor em água e obter uma ideia geral do comportamento da encosta face a um fenómeno extremo como é o caso de chuvas intensas. Não se simulou um nível freático inicial neste estudo. Este facto pode não acontecer na realidade, sendo possível a existência de lençóis freáticos nas encostas do ADV. Com as sondagens feitas até hoje, não foi detectada ainda presença de água. Não há, mais uma vez, informações abundantes quanto a esta matéria. Assim, a análise quedou-se por um modelo conceptual em que o nível freático não foi considerado.

Modelada a encosta, simulou-se a precipitação através da função presente na figura 5.23. O software utilizado, à semelhança do que foi feito no caso de estudo anterior, simula uma injeção de caudal à superfície. Neste trabalho, simulou-se a infiltração de água apenas no solo da encosta. Face à maior permeabilidade que se concedeu ao aterro em comparação com o solo da encosta (ver tabela 5.5), a injeção de caudal não provoca grandes alterações nas condições da encosta. Este facto foi constatado com base em análises preliminares efectuadas com o software.

Face à falta de dados sobre a encosta, correu-se o programa algumas vezes, assumindo que os materiais que a constituem são antagónicos ao nível das curvas de retenção e condutividade hidráulica. Modelou-se um caso simples em que o material remexido é composto de material diferente do da encosta. Sabendo-se que tal não é verdade, pois o solo remexido provém do mesmo material que o da encosta, é certo que este solo terá propriedades diferentes como resultado do processo de formação dos patamares. A primeira situação simulada foi a hipótese de o solo remexido ser dotado de uma

permeabilidade superior ao do solo da encosta. Esta situação foi materializada por meio das seguintes assumções, presentes na tabela seguinte.

Tabela 5. 5 – Dados utilizados situação 1.

	Função do SEEP/W utilizada	k-sat (m/s)	Θ_s	AEV (kPa)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)
Aterro (solo remexido)	#5 – Sandy Silt - Coarse Tailings. (Silte Arenoso – partículas grosseiras)	4.8×10^{-7}	0.45	10	0.001	0.09
Solo encosta	#16 – Clay Silt (Argila Siltosa)	2.5×10^{-8}	0.38	10	<0.001	0.01

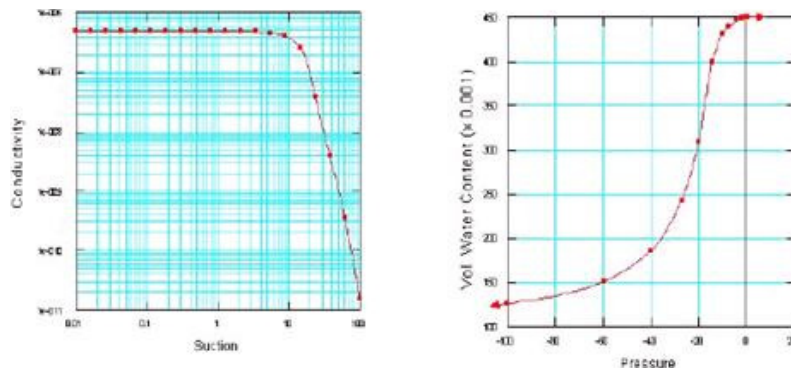


Fig. 5. 25 – Gráficos das funções de permeabilidade e teor em água da função #5, usadas no solo remexido.

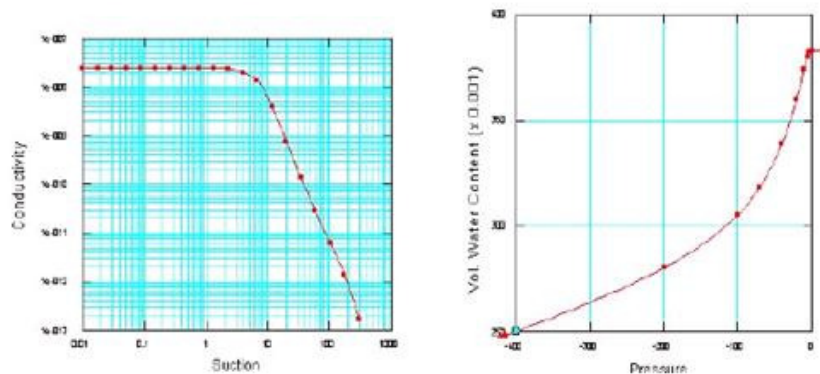


Fig. 5. 26 – Gráficos das funções de permeabilidade e teor em água da função #16, usadas no solo da encosta.

Introduzidas as propriedades dos dois solos, a situação inicial resultante para o caso 1 é a visível na figura 5.27. É notória a diferença nos valores do teor em água no solo remexido. A fronteira simulada entre solo remexido e não remexido é coincidente com a mudança nos valores do teor em água. Há um aumento claro do teor em água desde o solo remexido, assumido neste caso como sendo mais permeável, até ao solo não remexido.

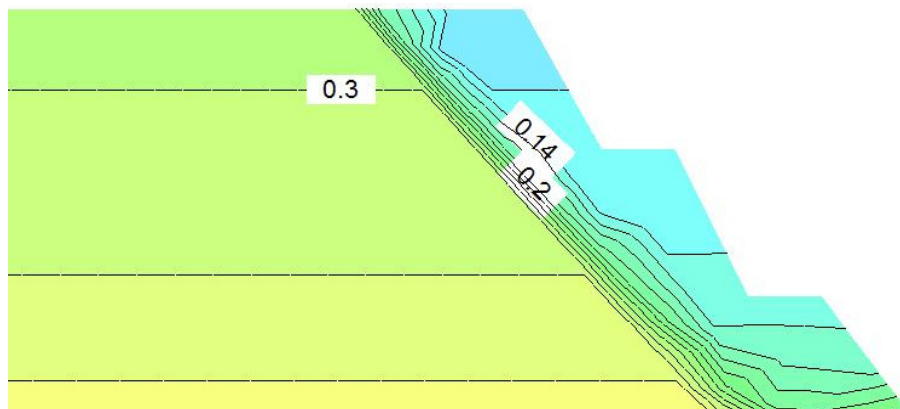


Fig. 5. 27 – Situação inicial.

A fronteira mantém-se ao longo e no fim da chuvada simulada (figura 5.28 e 5.29). Presumivelmente, a água que se infiltra é em valor igual ao do coeficiente de permeabilidade de saturação, pelo que a infiltração se dá de modo algo lento, não implicando grandes alterações no teor em água a nível global.

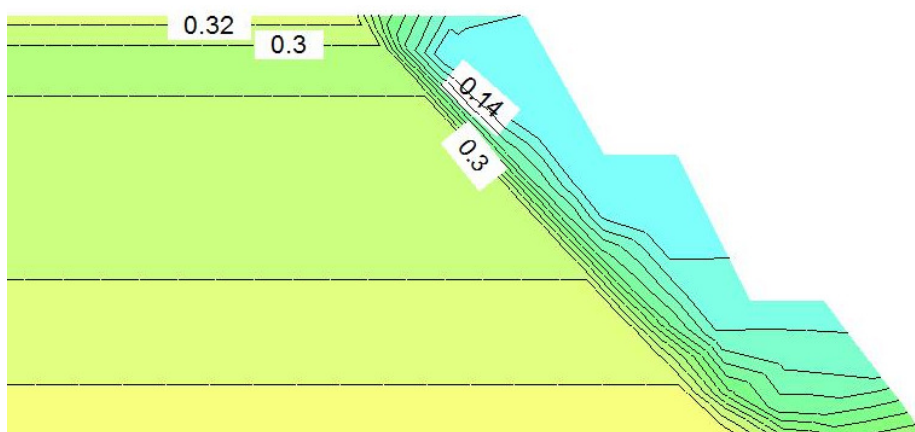


Fig. 5. 28 – A meio da chuvada.

É, porém, visível que na zona superior da encosta simulada, há infiltração de água que faz mudar o teor em água. Esta mudança é feita gradualmente e faz o solo da encosta atingir praticamente a saturação, que é de cerca de 38%.

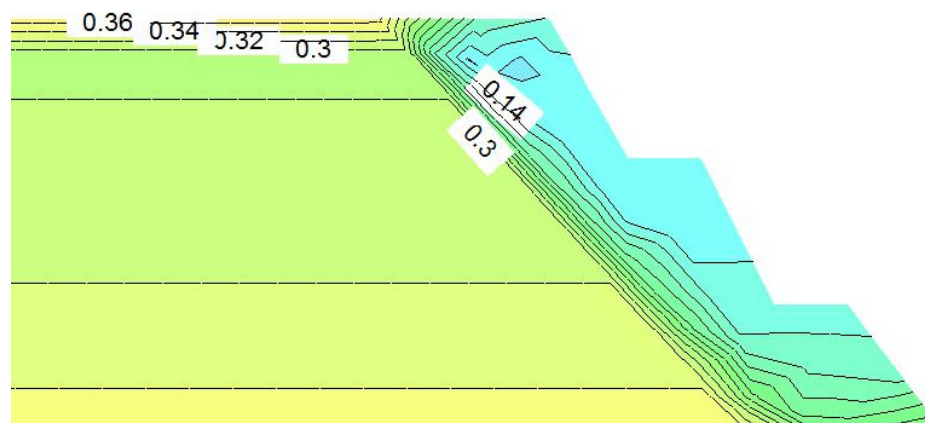


Fig. 5. 29 – No fim da chuvada.

5.4 CONCLUSÕES

No caso de estudo inicial, relativo ao aproveitamento hidroelétrico do Fridão, salientam-se factores que condicionam a análise e interpretação dos resultados. Este cuidado deve ser tido de modo a precaver eventuais conclusões erróneas. Deve-se prestar particular atenção às limitações a que esteve sujeito o estudo para melhor perceber as conclusões retiradas. Em primeiro lugar, há que referir as condicionantes ao nível dos dados que serviram de base ao estudo. As características da encosta modelada ainda não são plenamente conhecidas. Assim, as características de permeabilidade e teor em água tiveram de ser estimadas com base em estudos preliminares. A falta de sondagens provocou ainda a ausência de dados relativos a características mecânicas com o peso volúmico ou coesão. Há ainda a assinalar a não existência de dados referentes ao lençol freático que, previsivelmente existirá no interior da encosta. A ausência deste dado levou à consideração de um nível freático horizontal, o que deverá não corresponder à realidade e ter desvirtuado um pouco os resultados. É previsível que o nível freático se encontre a uma determinada e desconhecida profundidade da superfície e talvez existam bolsas de água interiores, muito difíceis de identificar e modelar. Assumiu-se que toda a encosta seria composta por um mesmo material. A homogeneidade de uma encosta de grandes dimensões é de todo improvável e foi assumida por razões de simplicidade e pragmatismo. Assumiu-se também que $k_x = k_y$, isto é, que a permeabilidade horizontal é igual à vertical. Estes factores poderão ter levado a que os inputs dos programas não tenham sido os mais adequados. Outra situação não salvaguardada neste estudo foi a afectação dos parâmetros resistentes devido à variação do teor em água. O teor em água tem a capacidade de reduzir a coesão de solos, especialmente em solos muito coesivos, como as argilas. Tendo-se optado por um solo que, em essência não é uma argila, embora tendo características que o aproximem de tal, não se considerou este facto. Esta previsível afectação (diminuição) da coesão implicaria talvez que a estabilidade calculada no SLOPE/W fosse diferente. O valor do factor de segurança seria talvez alterado. Para isso, seria necessário estabelecer uma relação entre o teor em água e a coesão do solo. Feita tal relação, seria, em princípio, definir camadas de solo menos coesiva que outras. Estas camadas com menor coesão seriam então mais susceptíveis de serem afectadas pelas oscilações do nível freático e de provocarem variações no factor de segurança.

Feita a listagem dos factores que poderão ter afectado a análise, resta dissecar um pouco os resultados. Parece evidente pela análise feita, que a segurança global da encosta não é alterada significativamente. Embora os valores do factor de segurança desçam abaixo da unidade, isso não parece ser suficiente para argumentar que a segurança está em causa. De facto, o factor de segurança inicial é, por si só, bastante baixo e próximo da unidade, como resultado da escolha de um solo com características

próximas de um solo residual, implicando uma menor resistência e segurança globais. Assim, em termos relativos, a queda do factor de segurança é reduzida. Verifica-se que a permeabilidade afecta a variação do factor de segurança, não o influenciando em demasia. Já o mesmo não se passa com o teor em água. Nas zonas em que o nível freático oscila, o teor em água é afectado, como seria de esperar pela permeabilidade. A descida do nível freático é acompanhada pela queda do teor em água. Esta queda verifica-se com mais intensidade nas zonas mais próximas do nível freático inicial e nas simulações feitas com solos de permeabilidade maior. Para permeabilidades na ordem dos 10^{-7} m/s, a descida da água da albufeira não implica grandes mudanças no teor em água, pois não há tempo para tal. O tempo necessário para que a água desça e volte a subir é menor do que o tempo necessário para o nível freático descer e afectar as condições de teor em água das zonas do solo mais próximas do nível freático inicial. Esta situação verifica-se para todos os tempos de esvaziamento considerados. Na análise de estabilidade, verifica-se que o somatório das pressões neutras acompanha em sentido inverso a evolução do factor de segurança. Este facto, também verificável para todos os tempos de esvaziamento analisados, aparenta ter mais influência do que as mudanças no teor em água. A descida do teor em água numa zona específica e reduzida (a zona afectada pela descida do nível freático) deveria aumentar a segurança devido à diminuição do peso da massa deslizante. O facto dessa redução se dar numa zona bastante localizada parece não ser suficiente para mudar a evolução do factor de segurança. Esta evolução anda a par com o inverso do somatório das pressões neutras na cunha de deslizamento. Quanto maior a pressão neutra, menor o factor de segurança.

O caso em que se inspirou a modelação deste caso apresenta características diferentes. Tais características acarretam uma modelação mais complexa. Esta modelação só poderá ser conseguida à custa de dados provenientes de sondagens e ensaios que permitam que as propriedades das encostas sejam idealizadas com maior rigor. Com estes dados, estudos académicos, e não só, podem-se desenvolver nesta área. O aprofundamento de estudos nesta área afigura-se como importante, face à novidade introduzida por este tipo de aproveitamento. Outras patologias podem também ser estudadas para que se avalie o risco que se associa a estas infra-estruturas. Com o aprofundamento do conhecimento nesta área, será possível prever situações de potencial risco e formular sistemas que permitam assegurar a segurança das encostas, como por exemplo, adopção de medidas de protecção de taludes e encostas que minimizem estes potenciais problemas

Neste capítulo, procurou-se, também, mostrar um problema actual e importante na região do Douro e apresentar um modelo de análise que permita formular soluções para a estabilização das encostas. Com os dados disponíveis actualmente não é possível, por enquanto, chegar ao referido objectivo. Para tal, há que definir o tipo de pluviosidade padrão a utilizar, específica daquela zona, o modo como as resistências se reduzem em função do teor em humidade, o modelo de penetração e percolação da água da chuva. Enquanto tais dados não estão disponíveis, procurou-se dar início ao trabalho nesta área. Esta área tem um potencial de expansão elevado. Este factor, encorajador para estudos futuros, limita o presente trabalho. Também neste caso, alguns obstáculos tiveram de ser ultrapassados. Os dados pluviométricos usados tiveram como base dados recolhidos em relatos de acontecimentos pluviométricos intensos e em parâmetros de curvas IDF de postos udográficos que não estão situados na zona em estudo. Este facto não é impeditivo da simulação de uma chuvada forte num intervalo de tempo curto, como o aqui modelado. Já de maior dificuldade é a definição e caracterização do solo constituinte da encosta e solo agrícola remexido. Ainda assim, foi feita uma tentativa de modelação, introduzindo diferenças em ambos ao nível da permeabilidade. A maior permeabilidade do solo agrícola remexido face ao solo da encosta deixa antever dificuldades de estabilidade no interface entre solos distintos, isto é, na zona de separação entre o solo original e o remexido. Não se tendo chegado a

essa fase do estudo, deverá ser abordado, futuramente, em estudos nesta áreas a avaliação do risco que a modelação de encostas em patamares tem na estabilidade das mesmas. Tendo por base um maior número de dados sobre as características geológicas das encostas, será possível aferir que eventos pluviométricos terão mais influência na instabilização das encostas.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1

Este trabalho focaliza temas novos e situações actuais e a emergência recente dos temas aqui abordados confere a este documento um cariz precursor na área. Mais do que concluir ou finalizar, este trabalho pretende ser um pequeno contributo para o desenvolvimento de metodologias que possam a vir a ser implementadas no terreno para responder às necessidades de assegurar a estabilidade de encostas. Ao compreender melhor o modo como as encostas são afectadas por estes fenómenos, será possível estabelecer e implementar métodos que permitam perceber quanto e de que modo as encostas são afectadas.

Começa-se por estabelecer primeiro uma distinção entre os casos aqui retratados, que apesar de serem inspirados em casos reais, não correspondem a casos efectivos. É importante a percepção de que o uso de dados reais é fundamental para a correcta de modelação de situações autênticas. A falta de sondagens proporciona um desfasamento que é inadmissível, caso se queira usar os resultados e aplicá-los a encostas reais. Para efeitos de investigação, a utilização de parâmetros médios ou retirados de literatura revela-se como suficiente para retirar algumas conclusões. Certo é que, actualmente, apesar das ferramentas computacionais disponíveis, há fenómenos de difícil modelação. Tome-se por exemplo o caso aqui abordado da precipitação. A precipitação é um fenómeno que é modelado pelo SEEP/W, utilizado neste trabalho, como uma simples injeção de caudal na superfície do solo. O modo como este software modela a precipitação é demasiado simplista face à complexidade do fenómeno em causa. A queda da água no solo não implica, como dito anteriormente neste trabalho, que esta se infiltre toda no solo. Fenómenos como o escoamento superficial (runoff), evaporação ou a intercepção de água por parte da vegetação são ignorados pelo software. Este impedimento leva a que estudos mais aprofundados possam ser feitos numa área que não se antevê que seja atribuída à engenharia civil. Torna-se necessário, caso se queira refinar a simulação da chuva usando o software referido, proceder a análises mais extensas das condições de infiltração de água no solo. A recolha de dados é crucial para uma melhor simulação. De facto, este 'subtema' inserido dentro dos temas maiores aqui abordados daria, certamente, para o desenvolvimento de trabalhos que pudessem, posteriormente, ser usados para a caracterização e definição das infiltrações resultantes de diferentes tipos de precipitações em vários locais do território nacional. Com tais dados, uma melhor simulação de precipitações será possível.

No caso do Alto Douro, a ausência de postos udográficos impossibilita a recolha de dados mais precisos sobre as precipitações. A zona do ADV caracteriza-se pela existência de microclimas muito localizados, que ocultam e dificultam a recolha de dados rigorosos sobre fenómenos de precipitação, principalmente os extremos. Uma maior cobertura do território nesta zona é indispensável para uma

correcta avaliação dos fenómenos pluviométricos das consequências e eles associados. O uso das curvas intensidade-duração-frequência afigura-se como uma opção válida para a projecção de fenómenos pluviométricos. Contudo, uma vez que assentam em bases estatísticas, revelam-se insuficientes para o caso do ADV. É preciso uma recolha mais extensa de dados para que os parâmetros de curvas IDF na zona do Alto Douro sejam calculados. Esta recolha permitiria também uma criação de uma base de dados que poderia ser complementada com outras. A existência de uma base de dados com o registo de acidentes seria de bastante utilidade. A complicada, mas necessária, compilação de registos de movimentos de vertentes e quedas de muros permitiria o cruzamento com dados pluviométricos. Este cruzamento possibilita a hipótese de perceber quais os fenómenos que mais influenciam os acidentes verificados no ADV.

No caso dos aproveitamentos hidroeléctricos, estudou-se um caso académico e fictício em que o aproveitamento a construir no Fridão compatibiliza as energias eólicas e hídrica. O avançar do processo de construção irá revelar-se favorável à obtenção de mais dados resultantes de sondagens e estudos. Com tais dados, será possível estudar as oscilações do nível da água da albufeira de jusante que se irão verificar, não como resultado da bombagem com recurso à energia eólica como foi assumido de forma errónea ao longo deste trabalho, mas devido às condições particulares do local que impõem a existência de uma barragem de jusante para controlar caudais.

Referências Bibliográficas

- [1] Manuel de Matos Fernandes. Mecânica dos Solos II volume, 2006
- [2] Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hídrico - Anexo 5: Aproveitamento Hidroelétrico do Fridão (Rio Tâmega).
- [3] Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hídrico - Declaração Ambiental
- [4] Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hídrico – Memória
- [5] Rede Eléctrica Nacional. A Energia Eólica em Portugal - 2009
- [6] <http://a-ciencia-nao-e-neutra.blogspot.com>
- [7] http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/complementariedade_hidroeolica_pe.php
- [8] <http://whc.unesco.org/en/list/1046>
- [9] Fernando Sousa. Alto Douro. Da demarcação Pombalina à Classificação de Património Mundial
- [10] Sousa, M., Cardoso, M., Queirós, J., Castro, R., Guimaraens, D. & Magalhães, A.. Douro Património Mundial – Preservação e Formas de Armação do Terreno Numa Paisagem Evolutiva e Viva
- [11] António de Sousa Pedrosa, Márcio Ribeiro Martim & Fantina Tedim Pedrosa. Processos de Erosão Acelerada. Região Demarcada do Douro, um património em Risco, 2004.
- [12] António de Sousa Pedrosa e Márcio Ribeiro Martim. Precipitações Extremas na Região Demarcada do Douro: Consequências Geo-Ambientais, 2004.
- [13] Carlos Pereira, Centro de Estudos Vitivinícolas do Douro/Núcleo de Vitivinicultura. Reestruturar a Vinha na Região Demarcada do Douro, 2009.
- [14] Conceição Andrade Martins. A Filoxera na Viticultura Nacional.
- [15] CCDR-N: Comissão de Coordenação de Desenvolvimento Regional – Norte. Alto Douro Vinhateiro. Paisagem Cultural, Evolutiva e Viva.
- [16] John Krahn. Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology, 2004.
- [17] John Krahn. Stability Modeling with SLOPE/W – An Engineering Methodology, 2004.
- [18] Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estruturas e Fundações. Estabilidade de Taludes, 2008.
- [19] João Vicente Fallabela Fabrício. Análises Probabilísticas de Taludes de Contenções, 2006.
- [20] Manuel de Matos Fernandes. Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais. Volume I, 2006.
- [21] <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoIrrigadoNoroesteMG/irrigacao.htm>
- [22] Cláudia Cristina Leal Brandão Pereira. Análise de Precipitações Intensas, 1995.
- [23] Cláudia Brandão & Rui Rodrigues. Precipitações Intensas em Portugal para Períodos de Retorno até 1000 anos, 1998.

Anexos

A.1

	$k=5*10^{-4}$	$k=5*10^{-5}$	$k=5*10^{-6}$	$k=5*10^{-7}$	$k=5*10^{-8}$	$k=5*10^{-9}$	$k=5*10^{-10}$
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
Tempo (horas)	FS	FS	FS	FS	FS]	FS	FS
0,00	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042
0,25	0,892	0,859	0,862	0,858	0,856	0,856	0,856
0,50	0,910	0,881	0,864	0,855	0,854	0,854	0,854
0,75	0,915	0,886	0,867	0,855	0,854	0,854	0,854
1,00	0,920	0,889	0,869	0,858	0,854	0,854	0,854
1,25	0,931	0,892	0,870	0,858	0,854	0,853	0,853
1,50	0,940	0,887	0,872	0,858	0,853	0,853	0,853
1,75	0,947	0,892	0,873	0,858	0,853	0,864	0,864
2,00	0,946	0,894	0,873	0,858	0,853	0,856	0,856
2,25	0,951	0,896	0,862	0,858	0,864	0,863	0,863
2,50	0,954	0,898	0,871	0,859	0,863	0,863	0,863
2,75	0,957	0,899	0,875	0,859	0,863	0,863	0,863
3,00	0,959	0,901	0,875	0,859	0,863	0,863	0,862
3,25	0,975	0,895	0,882	0,862	0,854	0,854	0,854
3,50	0,979	0,899	0,882	0,862	0,854	0,853	0,853
3,75	0,981	0,902	0,883	0,862	0,854	0,864	0,864
4,00	0,982	0,907	0,884	0,862	0,853	0,864	0,864
4,25	0,982	0,909	0,884	0,862	0,853	0,863	0,863
4,50	0,982	0,910	0,884	0,862	0,864	0,863	0,863
4,75	0,981	0,911	0,885	0,862	0,864	0,863	0,863
5,00	0,981	0,912	0,885	0,862	0,863	0,862	0,862
5,25	0,980	0,902	0,885	0,862	0,863	0,862	0,862
5,50	0,979	0,902	0,885	0,862	0,863	0,861	0,861
5,75	0,978	0,903	0,885	0,862	0,862	0,861	0,861
6,00	0,976	0,903	0,885	0,862	0,862	0,861	0,861
6,25	0,975	0,904	0,885	0,862	0,861	0,860	0,860
6,50	0,973	0,904	0,885	0,862	0,861	0,860	0,860
6,75	0,972	0,916	0,885	0,861	0,861	0,859	0,859
7,00	0,970	0,916	0,885	0,861	0,860	0,859	0,859
7,25	0,973	0,908	0,886	0,861	0,860	0,859	0,859
7,50	0,973	0,910	0,885	0,861	0,860	0,858	0,858
7,75	0,971	0,911	0,886	0,861	0,859	0,858	0,858
8,00	0,969	0,912	0,887	0,861	0,859	0,856	0,855
8,25	0,967	0,912	0,887	0,861	0,859	0,866	0,866
8,50	0,965	0,912	0,887	0,860	0,858	0,866	0,866

8,75	0,963	0,912	0,887	0,860	0,858	0,865	0,865
9,00	0,960	0,911	0,887	0,860	0,856	0,865	0,865
9,25	0,958	0,911	0,887	0,860	0,866	0,865	0,864
9,50	0,963	0,910	0,887	0,860	0,866	0,864	0,864
9,75	0,960	0,921	0,886	0,859	0,865	0,864	0,864
10,00	0,958	0,920	0,886	0,859	0,865	0,859	0,863
10,25	0,955	0,919	0,886	0,859	0,865	0,863	0,839
10,50	0,953	0,918	0,886	0,859	0,864	0,870	0,870
10,75	0,950	0,917	0,885	0,859	0,864	0,871	0,871
11,00	0,947	0,914	0,885	0,856	0,863	0,880	0,880
11,25	0,946	0,915	0,885	0,856	0,872	0,859	0,879
11,50	0,944	0,915	0,885	0,856	0,880	0,868	0,868
11,75	0,941	0,914	0,885	0,856	0,880	0,868	0,868
12,00	0,938	0,913	0,884	0,855	0,880	0,867	0,867
12,25	0,946	0,912	0,884	0,855	0,893	0,867	0,867
12,50	0,942	0,911	0,884	0,882	0,868	0,866	0,866
12,75	0,939	0,910	0,884	0,888	0,868	0,866	0,895
13,00	0,936	0,908	0,883	0,887	0,899	0,887	0,887
13,25	0,933	0,907	0,893	0,887	0,889	0,897	0,897
13,50	0,967	0,956	0,919	0,906	0,898	0,896	0,896
13,75	0,974	0,955	0,918	0,906	0,897	0,896	0,896
14,00	0,971	0,953	0,918	0,905	0,897	0,895	0,895
14,25	0,969	0,952	0,917	0,905	0,896	0,905	0,905
14,50	0,967	0,952	0,917	0,904	0,906	0,915	0,894
14,75	0,964	0,950	0,916	0,904	0,915	0,924	0,923
15,00	0,969	0,949	0,915	0,902	0,924	0,923	0,923
15,25	0,967	0,947	0,914	0,903	0,926	0,925	0,925
15,50	0,964	0,946	0,914	0,920	0,925	0,894	0,924
15,75	0,963	0,951	0,911	0,920	0,924	0,924	0,924
16,00	0,985	0,967	0,940	0,929	0,925	0,924	0,924
16,25	0,991	0,965	0,941	0,929	0,900	0,926	0,926
16,50	0,987	0,963	0,940	0,928	0,923	0,926	0,926
16,75	0,985	0,973	0,939	0,928	0,927	0,925	0,925
17,00	0,982	0,971	0,938	0,927	0,926	0,925	0,925
17,25	0,979	0,970	0,938	0,917	0,926	0,924	0,924
17,50	0,976	0,968	0,937	0,926	0,925	0,924	0,924
17,75	0,973	0,964	0,944	0,925	0,925	0,923	0,923
18,00	0,970	0,963	0,943	0,924	0,924	0,923	0,923
18,25	0,967	0,961	0,944	0,924	0,924	0,922	0,922
18,50	0,976	0,959	0,942	0,923	0,923	0,922	0,922
18,75	0,973	0,957	0,941	0,923	0,923	0,922	0,921
19,00	0,968	0,955	0,940	0,930	0,922	0,921	0,921
19,25	0,964	0,953	0,939	0,930	0,922	0,934	0,934
19,50	0,961	0,963	0,938	0,929	0,934	0,939	0,939
19,75	0,957	0,961	0,937	0,929	0,939	0,939	0,939
20,00	0,966	0,959	0,936	0,928	0,939	0,938	0,938
20,25	0,963	0,957	0,935	0,935	0,946	0,954	0,961
20,50	0,986	0,973	0,945	0,934	0,961	0,964	0,964
20,75	0,988	0,985	0,965	0,957	0,964	0,963	0,963
21,00	0,986	0,983	0,981	0,966	0,963	0,963	0,963

21,25	0,992	0,981	0,980	0,965	0,963	0,962	0,962
21,50	0,998	0,996	0,979	0,964	0,961	0,961	0,961
21,75	0,995	0,994	0,978	0,963	0,960	0,960	0,960
22,00	0,993	0,993	0,977	0,963	0,959	0,959	0,959
22,25	0,990	0,991	0,976	0,962	0,968	0,967	0,967
22,50	0,988	0,989	0,975	0,961	0,959	0,958	0,958
22,75	0,985	0,987	0,974	0,960	0,958	0,966	0,966
23,00	0,983	0,985	0,973	0,968	0,965	0,965	0,965
23,25	0,980	0,983	0,972	0,967	0,970	0,970	0,970
23,50	0,978	0,981	0,978	0,973	0,970	1,015	1,015
23,75	1,023	0,998	0,983	0,972	0,994	1,049	1,049
24,00	1,053	1,023	1,023	0,972	1,023	1,023	1,023

Tabela A. 1 – Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de ½ hora e diferentes permeabilidades. ($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-10}$ m/s).

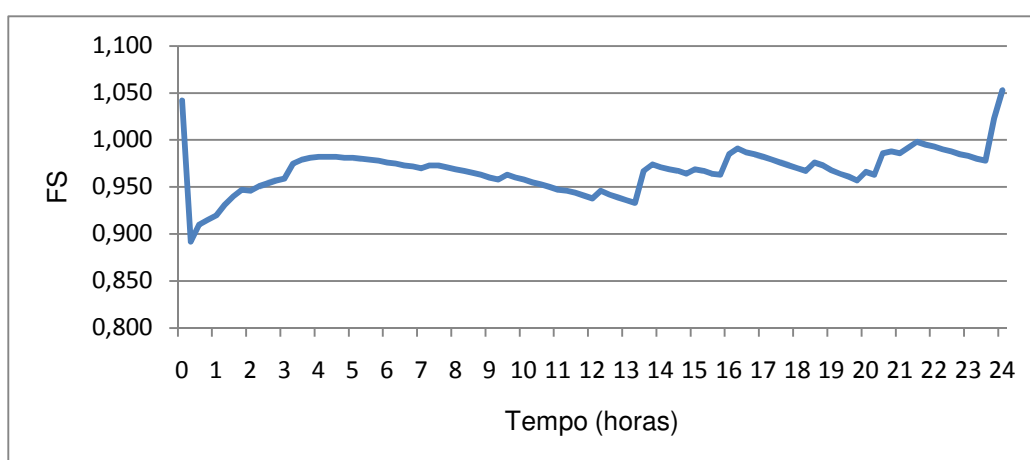


Fig. A. 1– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de ½ hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

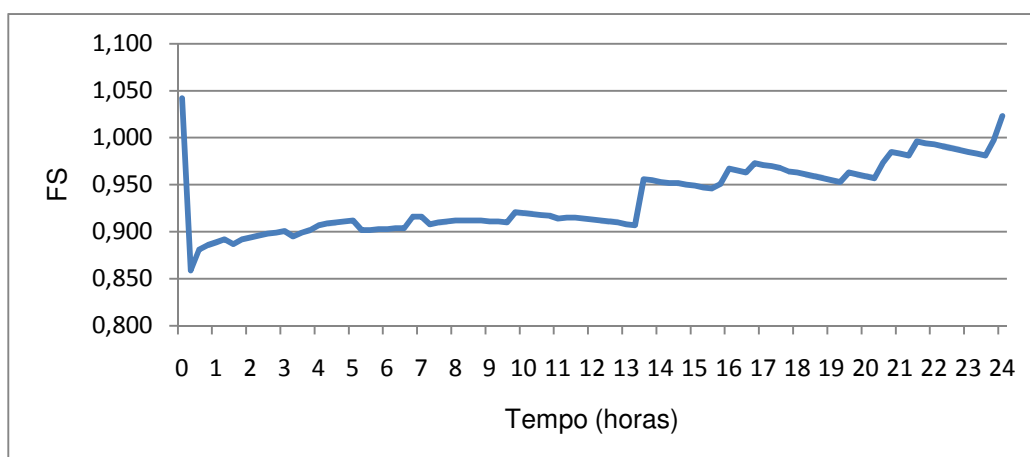


Fig. A. 2– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de ½ hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

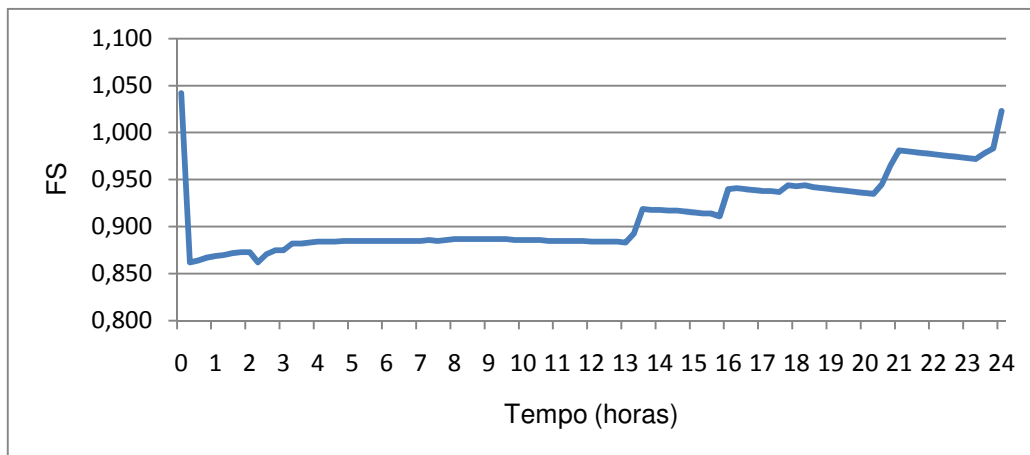


Fig. A. 3– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

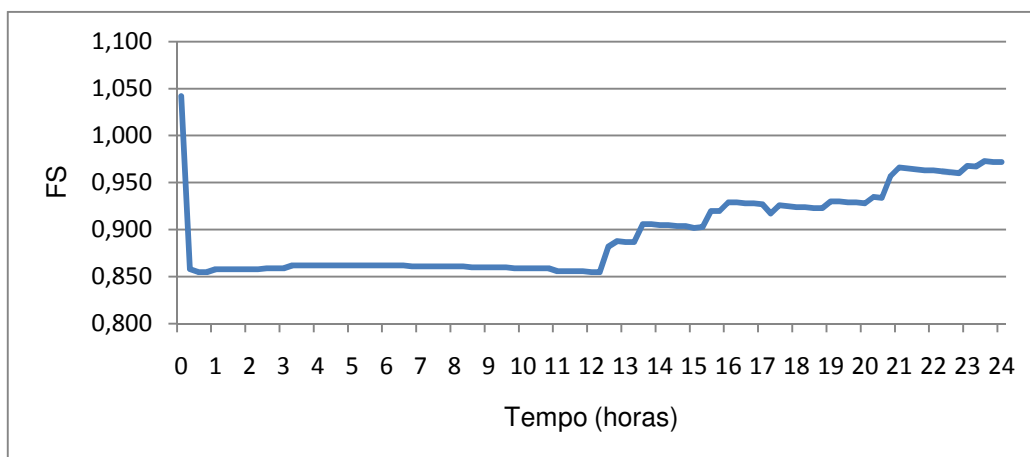


Fig. A. 4– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

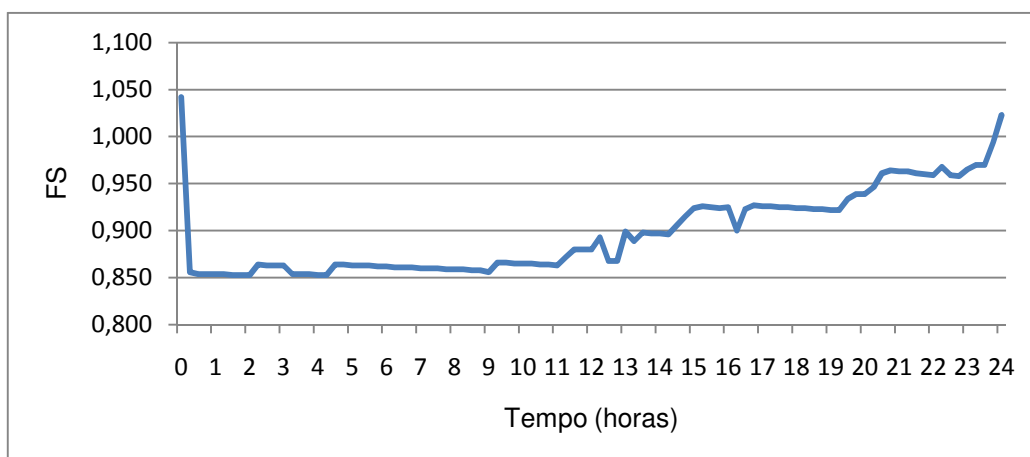


Fig. A. 5– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

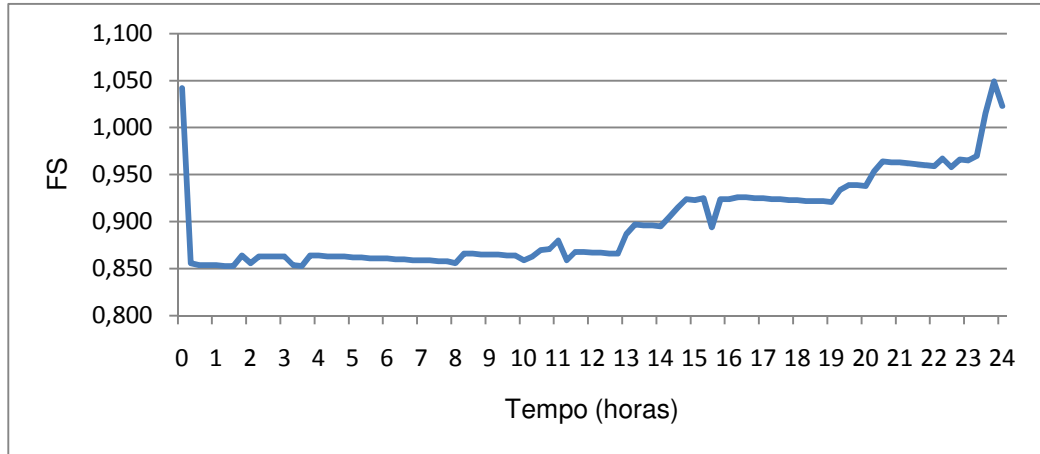


Fig. A. 6– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s.

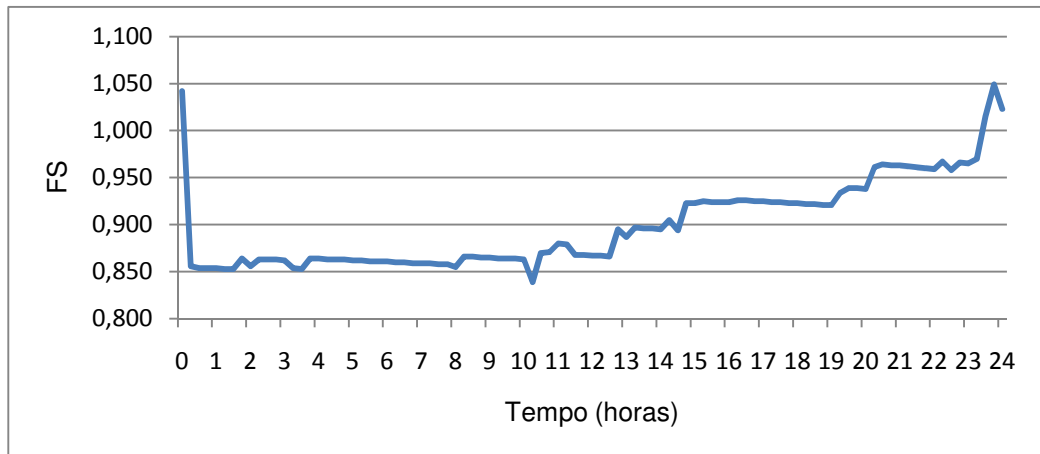


Fig. A. 7– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-10}$ m/s.

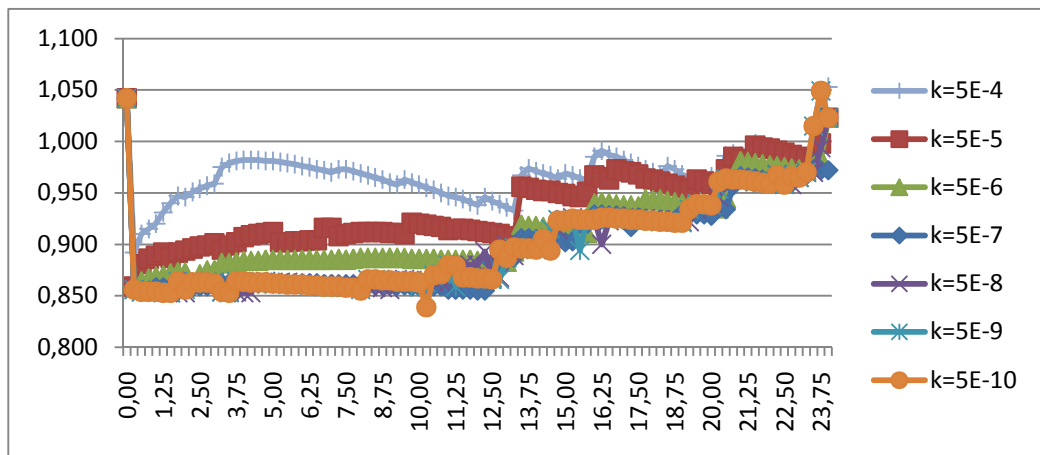
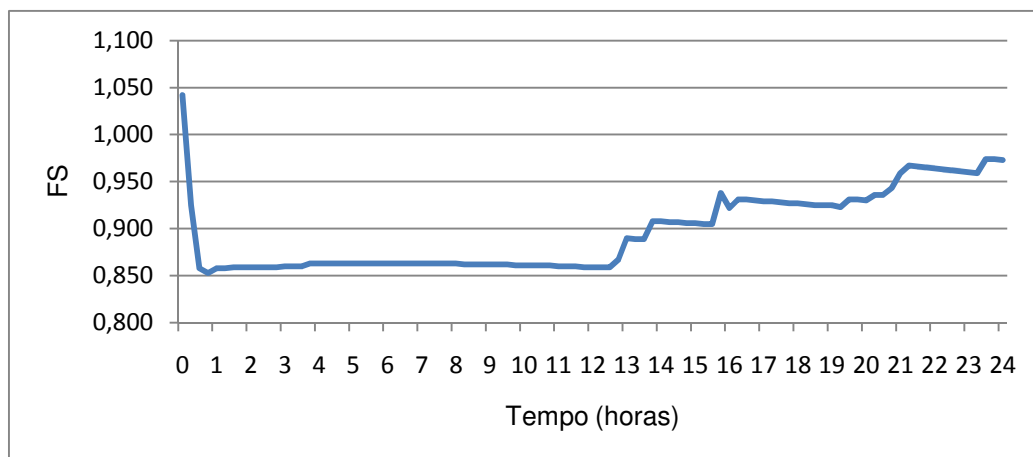


Fig. A. 8 – Comparação dos diferentes gráficos de evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1/2 hora e diferentes permeabilidades ($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-10}$ m/s).

Tempo (horas)	FS
0,00	1,042
0,25	0,925
0,50	0,858
0,75	0,853
1,00	0,858
1,25	0,858
1,50	0,859
1,75	0,859
2,00	0,859
2,25	0,859
2,50	0,859
2,75	0,859
3,00	0,860
3,25	0,860
3,50	0,860
3,75	0,863
4,00	0,863
4,25	0,863
4,50	0,863
4,75	0,863
5,00	0,863
5,25	0,863
5,50	0,863
5,75	0,863
6,00	0,863
6,25	0,863
6,50	0,863
6,75	0,863
7,00	0,863
7,25	0,863
7,50	0,863
7,75	0,863
8,00	0,863
8,25	0,862
8,50	0,862
8,75	0,862
9,00	0,862
9,25	0,862
9,50	0,862
9,75	0,861
10,00	0,861
10,25	0,861
10,50	0,861
10,75	0,861
11,00	0,860
11,25	0,860
11,50	0,860
11,75	0,859

12,00	0,859
12,25	0,859
12,50	0,859
12,75	0,867
13,00	0,890
13,25	0,889
13,50	0,889
13,75	0,908
14,00	0,908
14,25	0,907
14,50	0,907
14,75	0,906
15,00	0,906
15,25	0,905
15,50	0,905
15,75	0,938
16,00	0,922
16,25	0,931
16,50	0,931
16,75	0,930
17,00	0,929
17,25	0,929
17,50	0,928
17,75	0,927
18,00	0,927
18,25	0,926
18,50	0,925
18,75	0,925
19,00	0,925
19,25	0,923
19,50	0,931
19,75	0,931
20,00	0,930
20,25	0,936
20,50	0,936
20,75	0,943
21,00	0,959
21,25	0,967
21,50	0,966
21,75	0,965
22,00	0,964
22,25	0,963
22,50	0,962
22,75	0,961
23,00	0,960
23,25	0,959
23,50	0,974
23,75	0,974
24,00	0,973

Tabela A. 2 - Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de 1 hora e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s

Fig. A. 9 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 1 hora e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

	$k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s
Tempo (horas)	FS	FS	FS	FS	FS
0,00	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042
0,25	0,936	0,940	0,939	0,939	0,939
0,50	0,917	0,927	0,925	0,925	0,925
0,75	0,874	0,859	0,880	0,879	0,869
1,00	0,871	0,860	0,859	0,858	0,858
1,25	0,891	0,869	0,853	0,863	0,863
1,50	0,892	0,874	0,859	0,858	0,854
1,75	0,894	0,877	0,861	0,858	0,856
2,00	0,896	0,880	0,862	0,858	0,858
2,25	0,897	0,881	0,862	0,858	0,858
2,50	0,898	0,882	0,862	0,858	0,856
2,75	0,899	0,870	0,862	0,858	0,855
3,00	0,900	0,880	0,862	0,856	0,855
3,25	0,901	0,885	0,863	0,855	0,855
3,50	0,903	0,885	0,863	0,855	0,854
3,75	0,904	0,885	0,863	0,855	0,854
4,00	0,905	0,886	0,863	0,855	0,854
4,25	0,906	0,886	0,863	0,855	0,854
4,50	0,907	0,886	0,858	0,854	0,853
4,75	0,908	0,886	0,863	0,854	0,853
5,00	0,917	0,887	0,866	0,855	0,854
5,25	0,920	0,887	0,866	0,854	0,853
5,50	0,922	0,887	0,866	0,854	0,864
5,75	0,923	0,888	0,866	0,854	0,864
6,00	0,924	0,888	0,866	0,853	0,863
6,25	0,925	0,888	0,866	0,853	0,863
6,50	0,926	0,888	0,866	0,864	0,863
6,75	0,926	0,888	0,866	0,864	0,862
7,00	0,927	0,888	0,866	0,863	0,862
7,25	0,927	0,888	0,866	0,863	0,861
7,50	0,927	0,887	0,866	0,863	0,861
7,75	0,927	0,887	0,866	0,862	0,861

8,00	0,926	0,887	0,865	0,862	0,860
8,25	0,926	0,887	0,865	0,862	0,860
8,50	0,926	0,884	0,865	0,861	0,859
8,75	0,925	0,884	0,865	0,861	0,859
9,00	0,928	0,884	0,865	0,860	0,859
9,25	0,930	0,887	0,865	0,860	0,858
9,50	0,930	0,887	0,865	0,860	0,858
9,75	0,931	0,887	0,864	0,859	0,855
10,00	0,930	0,887	0,864	0,859	0,866
10,25	0,930	0,885	0,864	0,859	0,866
10,50	0,929	0,884	0,864	0,858	0,865
10,75	0,929	0,884	0,864	0,858	0,865
11,00	0,928	0,884	0,863	0,856	0,864
11,25	0,927	0,883	0,863	0,866	0,864
11,50	0,925	0,883	0,863	0,866	0,864
11,75	0,924	0,892	0,863	0,843	0,863
12,00	0,923	0,891	0,862	0,865	0,870
12,25	0,922	0,891	0,862	0,865	0,871
12,50	0,920	0,890	0,862	0,864	0,880
12,75	0,920	0,890	0,862	0,864	0,879
13,00	0,927	0,890	0,861	0,881	0,868
13,25	0,926	0,889	0,861	0,881	0,868
13,50	0,925	0,889	0,861	0,881	0,867
13,75	0,924	0,889	0,869	0,859	0,866
14,00	0,923	0,888	0,892	0,868	0,866
14,25	0,922	0,888	0,892	0,899	0,887
14,50	0,920	0,898	0,889	0,899	0,897
14,75	0,948	0,924	0,901	0,898	0,896
15,00	0,946	0,923	0,910	0,898	0,896
15,25	0,945	0,922	0,909	0,897	0,895
15,50	0,943	0,921	0,909	0,897	0,905
15,75	0,941	0,920	0,908	0,906	0,898
16,00	0,948	0,920	0,908	0,916	0,923
16,25	0,946	0,919	0,907	0,927	0,925
16,50	0,944	0,918	0,907	0,926	0,924
16,75	0,943	0,935	0,924	0,925	0,924
17,00	0,984	0,947	0,933	0,924	0,924
17,25	0,984	0,947	0,933	0,924	0,923
17,50	0,981	0,944	0,932	0,924	0,926
17,75	0,981	0,943	0,931	0,927	0,925
18,00	0,978	0,942	0,931	0,926	0,925
18,25	0,976	0,941	0,930	0,926	0,924
18,50	0,974	0,940	0,929	0,925	0,924
18,75	0,973	0,939	0,929	0,925	0,923
19,00	0,971	0,938	0,928	0,924	0,922
19,25	0,969	0,944	0,927	0,924	0,922
19,50	0,968	0,943	0,926	0,923	0,921
19,75	0,966	0,943	0,926	0,929	0,921
20,00	0,964	0,944	0,925	0,929	0,939
20,25	0,961	0,941	0,932	0,940	0,939

20,50	0,959	0,940	0,932	0,939	0,938
20,75	0,957	0,938	0,939	0,947	0,961
21,00	0,975	0,937	0,938	0,965	0,964
21,25	0,986	0,968	0,960	0,956	0,963
21,50	0,984	0,975	0,960	0,963	0,962
21,75	0,997	0,974	0,976	0,962	0,961
22,00	0,995	0,980	0,975	0,961	0,960
22,25	0,993	0,979	0,966	0,960	0,959
22,50	0,991	0,977	0,965	0,968	0,967
22,75	0,988	0,977	0,964	0,967	0,958
23,00	0,986	0,975	0,963	0,966	0,966
23,25	0,984	0,974	0,962	0,965	0,965
23,50	0,982	0,980	0,961	0,970	0,994
23,75	0,994	0,973	0,975	0,981	1,015
24,00	1,023	1,023	0,975	1,023	1,023

Tabela A. 3 – Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e diferentes permeabilidades. ($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s).

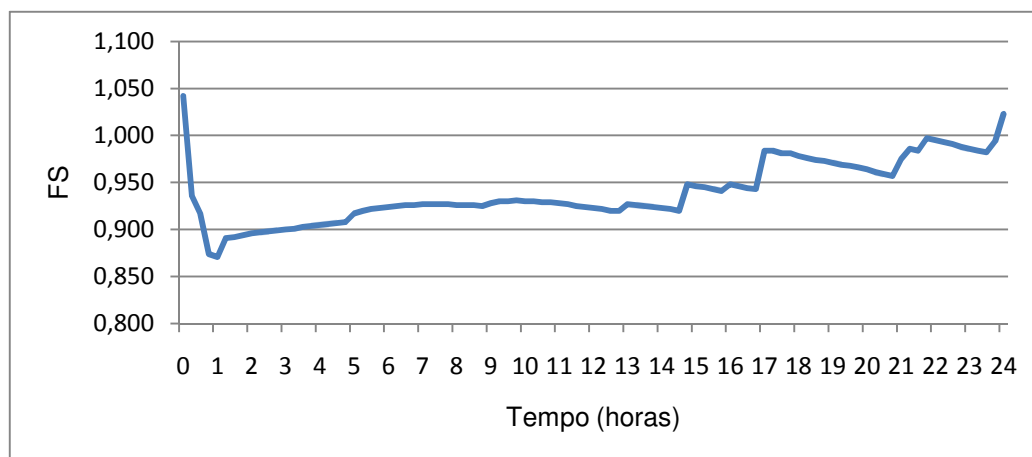


Fig. A. 10 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

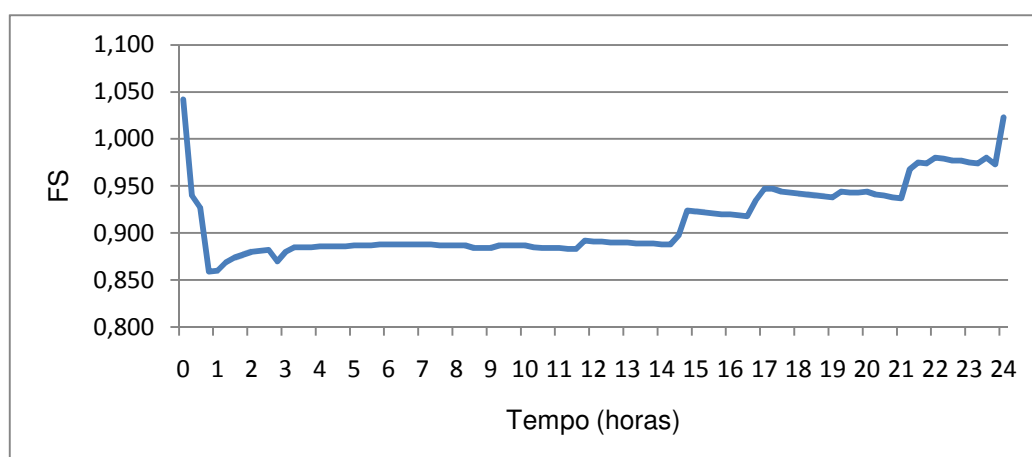


Fig. A. 11 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

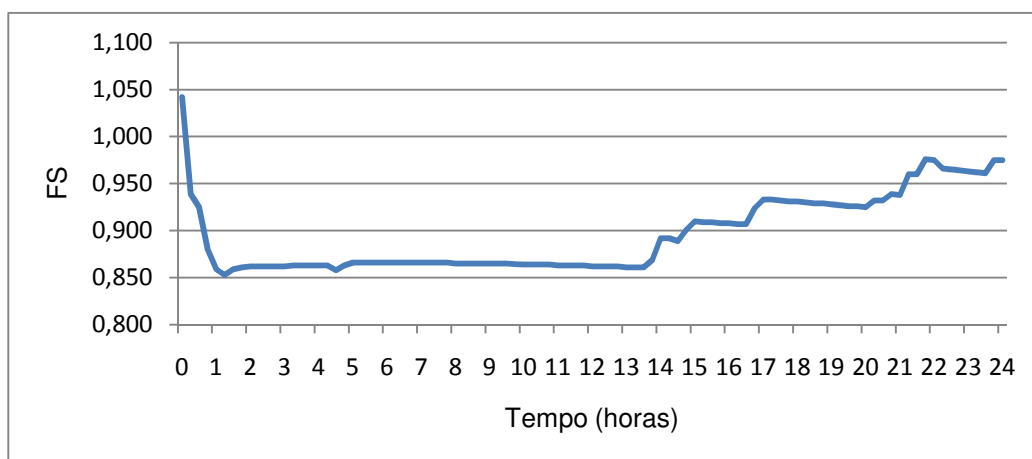


Fig. A. 12 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

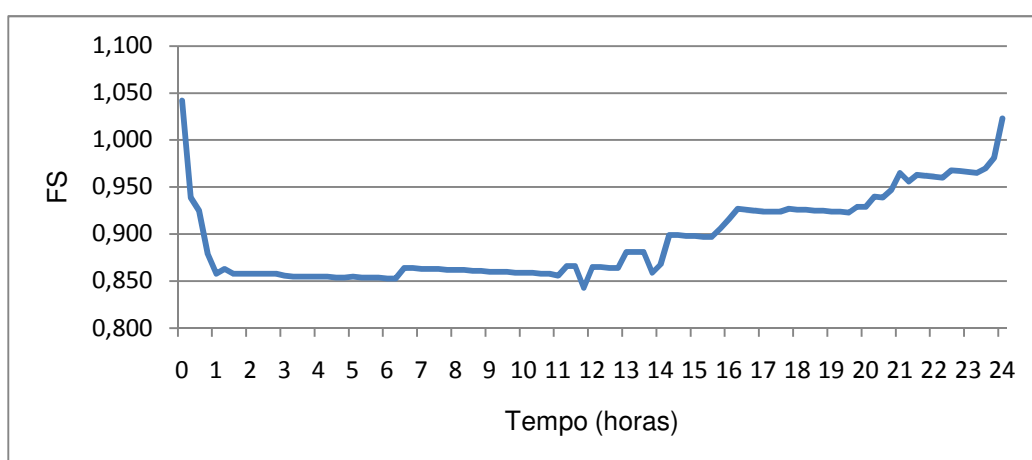


Fig. A. 13– Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

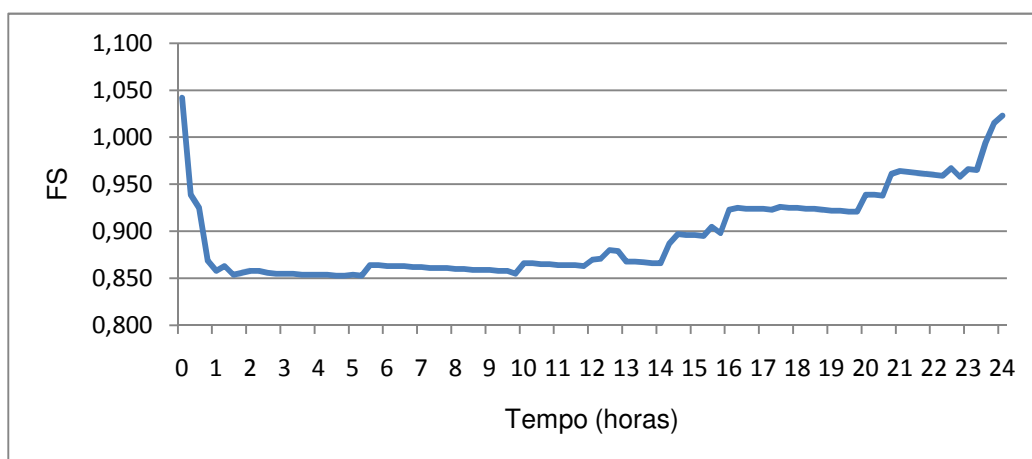


Fig. A. 14 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s.

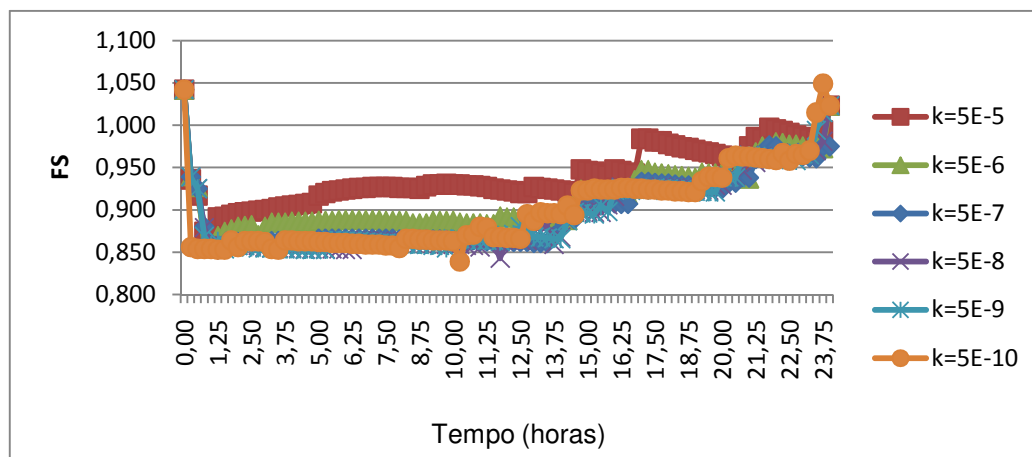


Fig. A. 15 – Comparação dos diferentes gráficos de evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 2 horas e diferentes permeabilidades ($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-10}$ m/s).

$k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s	
Tempo (horas)	FS
0,00	1,042
0,25	0,960
0,50	0,939
0,75	0,924
1,00	0,926
1,25	0,888
1,50	0,842
1,75	0,855
2,00	0,861
2,25	0,864
2,50	0,856
2,75	0,859
3,00	0,861
3,25	0,862
3,50	0,845
3,75	0,864
4,00	0,865
4,25	0,865
4,50	0,865
4,75	0,865
5,00	0,865
5,25	0,865
5,50	0,866
5,75	0,866
6,00	0,866
6,25	0,866
6,50	0,866
6,75	0,866
7,00	0,866
7,25	0,868

7,50	0,868
7,75	0,868
8,00	0,868
8,25	0,868
8,50	0,868
8,75	0,868
9,00	0,868
9,25	0,868
9,50	0,868
9,75	0,868
10,00	0,867
10,25	0,867
10,50	0,867
10,75	0,867
11,00	0,867
11,25	0,866
11,50	0,866
11,75	0,866
12,00	0,866
12,25	0,865
12,50	0,865
12,75	0,865
13,00	0,864
13,25	0,864
13,50	0,864
13,75	0,863
14,00	0,863
14,25	0,863
14,50	0,862
14,75	0,862
15,00	0,862
15,25	0,861
15,50	0,892
15,75	0,892
16,00	0,901
16,25	0,910
16,50	0,909
16,75	0,899
17,00	0,908
17,25	0,908
17,50	0,907
17,75	0,924
18,00	0,923
18,25	0,933
18,50	0,932
18,75	0,931
19,00	0,930
19,25	0,929
19,50	0,929
19,75	0,928

20,00	0,927
20,25	0,926
20,50	0,925
20,75	0,933
21,00	0,932
21,25	0,938
21,50	0,938
21,75	0,961
22,00	0,960
22,25	0,975
22,50	0,966
22,75	0,965
23,00	0,964
23,25	0,963
23,50	0,961
23,75	0,975
24,00	0,975

Tabela A. 4 - Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de 4 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

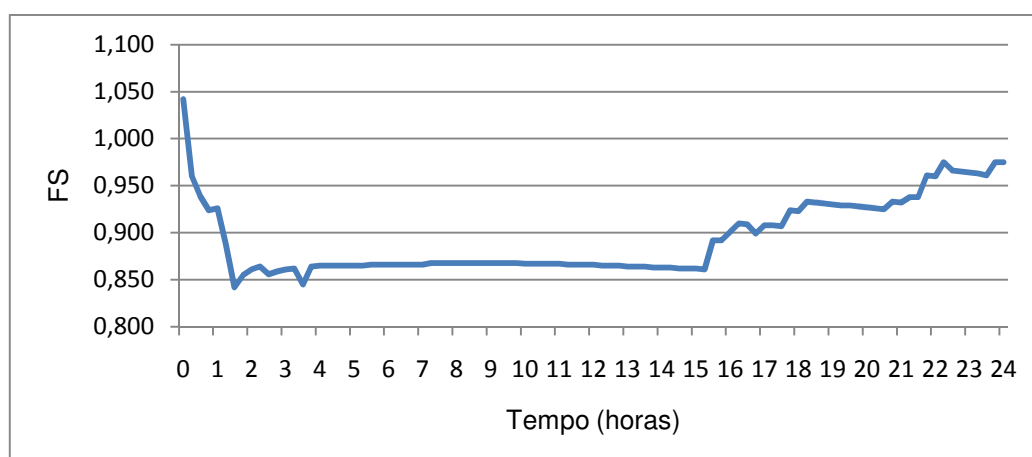


Fig. A. 16 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 4 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

	$k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s
Tempo (horas)	FS	FS	FS	FS
0,00	1,042	1,042	1,042	1,042
0,25	0,963	0,968	0,958	0,958
0,50	0,975	0,975	0,963	0,963
0,75	0,945	0,930	0,940	0,939
1,00	0,945	0,931	0,926	0,923
1,25	0,952	0,936	0,925	0,926
1,50	0,930	0,915	0,916	0,926
1,75	0,943	0,914	0,904	0,897
2,00	0,907	0,881	0,888	0,868
2,25	0,922	0,889	0,856	0,863
2,50	0,926	0,892	0,863	0,866
2,75	0,937	0,888	0,867	0,859
3,00	0,950	0,898	0,871	0,862

3,25	0,954	0,902	0,876	0,864
3,50	0,962	0,906	0,879	0,855
3,75	0,971	0,908	0,883	0,859
4,00	0,980	0,913	0,881	0,861
4,25	0,976	0,909	0,881	0,862
4,50	0,980	0,908	0,873	0,863
4,75	0,985	0,909	0,882	0,865
5,00	0,990	0,911	0,883	0,865
5,25	0,994	0,913	0,886	0,866
5,50	0,998	0,915	0,886	0,867
5,75	0,990	0,910	0,891	0,867
6,00	1,001	0,915	0,886	0,868
6,25	1,004	0,918	0,886	0,868
6,50	0,999	0,919	0,886	0,868
6,75	1,007	0,920	0,886	0,868
7,00	1,008	0,922	0,886	0,869
7,25	1,008	0,923	0,886	0,869
7,50	1,008	0,924	0,886	0,869
7,75	1,009	0,925	0,884	0,869
8,00	1,009	0,926	0,883	0,869
8,25	1,008	0,926	0,883	0,869
8,50	1,008	0,927	0,883	0,869
8,75	1,008	0,928	0,883	0,869
9,00	1,007	0,928	0,883	0,869
9,25	1,007	0,928	0,883	0,869
9,50	1,006	0,929	0,882	0,869
9,75	1,005	0,929	0,882	0,869
10,00	1,012	0,940	0,884	0,872
10,25	1,012	0,941	0,884	0,872
10,50	1,011	0,942	0,884	0,872
10,75	1,010	0,943	0,884	0,872
11,00	1,009	0,943	0,884	0,871
11,25	1,008	0,945	0,884	0,871
11,50	1,006	0,943	0,883	0,871
11,75	1,004	0,943	0,883	0,871
12,00	1,003	0,943	0,883	0,871
12,25	1,001	0,942	0,882	0,870
12,50	0,999	0,941	0,882	0,851
12,75	0,997	0,940	0,881	0,870
13,00	0,995	0,939	0,892	0,870
13,25	0,993	0,938	0,891	0,869
13,50	0,993	0,940	0,891	0,869
13,75	0,991	0,941	0,891	0,869
14,00	0,989	0,940	0,891	0,868
14,25	0,986	0,940	0,891	0,868
14,50	0,983	0,939	0,891	0,868
14,75	0,981	0,937	0,890	0,867
15,00	0,978	0,936	0,890	0,867
15,25	0,975	0,934	0,889	0,866
15,50	0,972	0,932	0,888	0,866

15,75	0,968	0,930	0,885	0,866
16,00	0,965	0,928	0,884	0,865
16,25	0,962	0,928	0,884	0,865
16,50	0,959	0,926	0,893	0,864
16,75	0,955	0,925	0,892	0,863
17,00	0,952	0,930	0,891	0,863
17,25	0,948	0,928	0,891	0,894
17,50	0,958	0,926	0,891	0,893
17,75	0,971	0,942	0,924	0,911
18,00	0,967	0,951	0,924	0,911
18,25	0,963	0,948	0,922	0,910
18,50	0,959	0,945	0,921	0,909
18,75	0,955	0,943	0,920	0,908
19,00	0,948	0,949	0,918	0,908
19,25	0,989	0,988	0,949	0,934
19,50	1,000	0,986	0,947	0,933
19,75	0,997	0,983	0,944	0,932
20,00	0,993	0,981	0,943	0,931
20,25	0,991	0,979	0,941	0,930
20,50	0,987	0,978	0,940	0,929
20,75	0,984	0,974	0,938	0,928
21,00	0,979	0,971	0,942	0,927
21,25	0,975	0,969	0,943	0,926
21,50	0,970	0,966	0,942	0,933
21,75	0,968	0,963	0,943	0,932
22,00	0,988	0,973	0,939	0,938
22,25	0,983	0,989	0,976	0,961
22,50	1,002	0,994	0,975	0,960
22,75	0,997	0,998	0,981	0,967
23,00	0,993	0,995	0,979	0,965
23,25	0,989	0,992	0,977	0,964
23,50	0,985	0,988	0,975	0,962
23,75	0,995	0,985	0,974	0,976
24,00	1,059	1,007	0,986	0,975

Tabela A. 5 - Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e diferentes permeabilidades.
($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s).

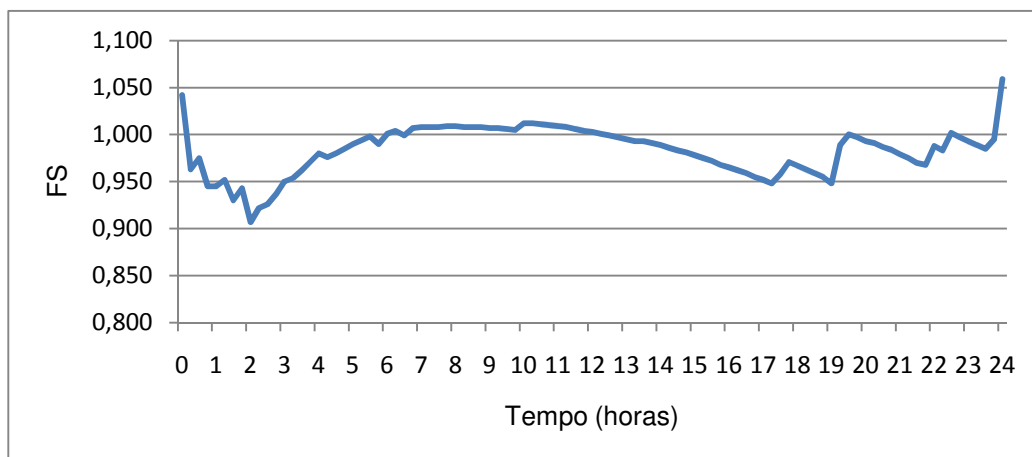


Fig. A. 17 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

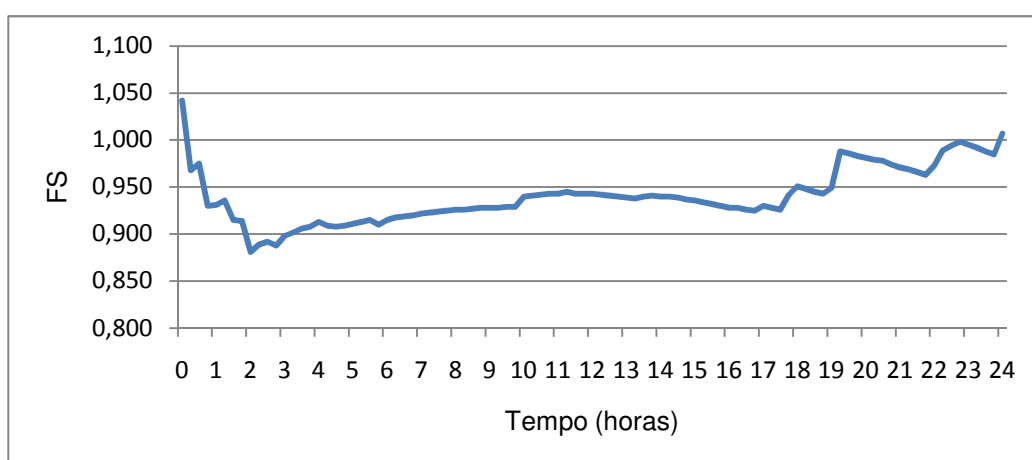


Fig. A. 18 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

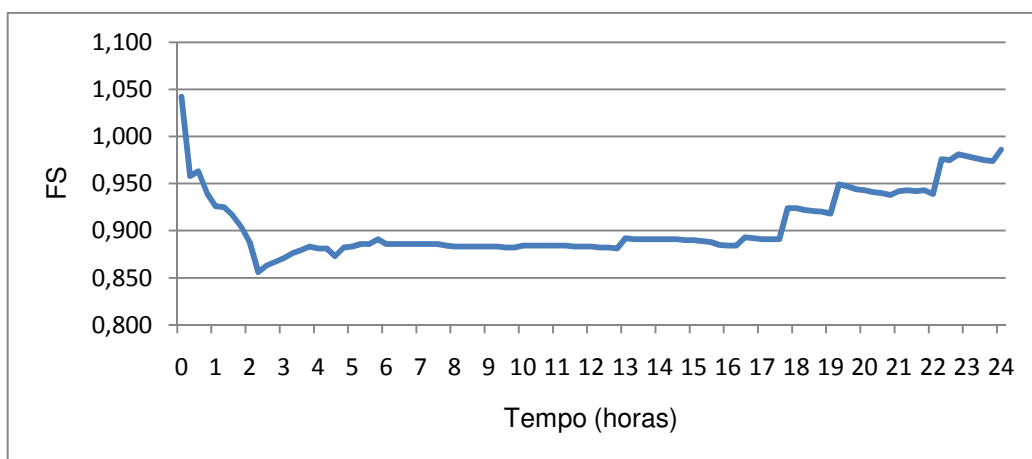


Fig. A. 19 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

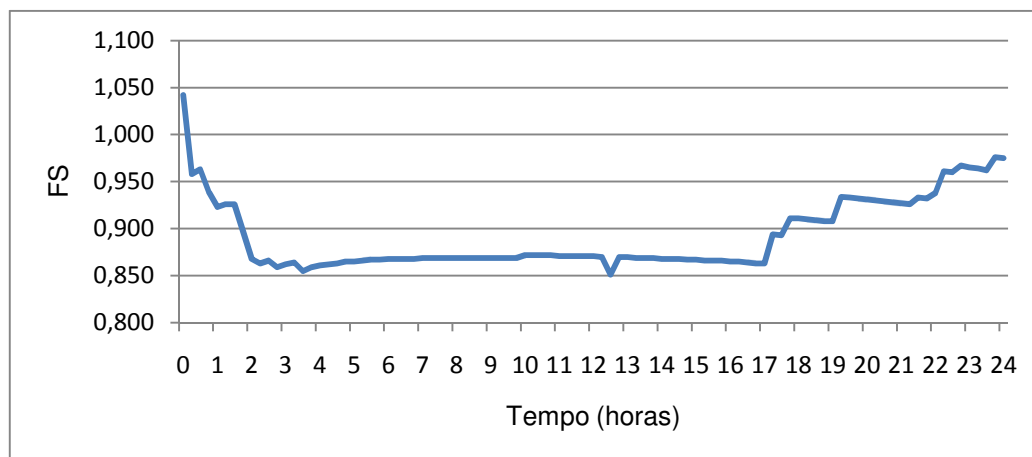


Fig. A. 20 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s.

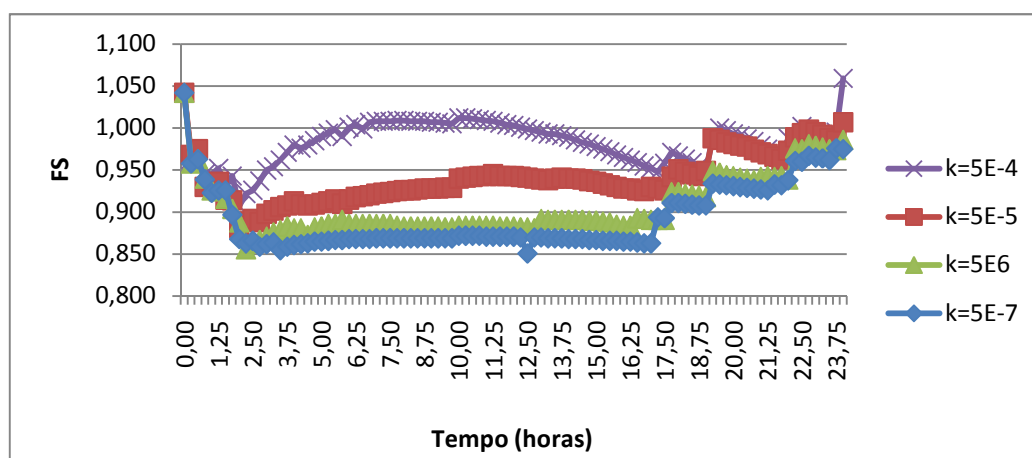


Fig. A. 21 – Evolução do factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas e diferentes permeabilidades ($k=5 \cdot 10^{-4}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-5}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Tempo (horas)	FS
0,00	0,661
0,50	1,166
1,00	0,946
1,50	0,774
2,00	0,726
2,50	0,689
3,00	0,544
3,50	0,544
4,00	0,506
4,50	0,541
5,00	0,540
5,50	0,660
6,00	0,541
6,50	0,544
7,00	0,546
7,50	0,660
8,00	0,538
8,50	0,538
9,00	0,538

9,50	0,542
10,00	0,607
10,50	0,622
11,00	0,625
11,50	0,640
12,00	0,643
12,50	0,759
13,00	0,664
13,50	0,671
14,00	0,707
14,50	0,775
15,00	0,798
15,50	0,807
16,00	0,855
16,50	0,855
17,00	0,855
17,50	0,900
18,00	0,927
18,50	0,958
19,00	0,989
19,50	1,039
20,00	1,098
20,50	1,137
21,00	1,159
21,50	1,163
22,00	1,216
22,50	1,244
23,00	1,238
23,50	1,230
24,00	1,315
24,50	1,368
25,00	1,365
25,50	1,363
26,00	1,361
26,50	1,359
27,00	1,357
27,50	1,356
28,00	1,355
28,50	1,354
29,00	1,353
29,50	1,352
30,00	1,351
30,50	1,350
31,00	1,349
31,50	1,348
32,00	1,348
32,50	1,347
33,00	1,346
33,50	1,346
34,00	1,345

34,50	1,345
35,00	1,344
35,50	1,344
36,00	1,343
36,50	1,343
37,00	1,342
37,50	1,342
38,00	1,342
38,50	1,341
39,00	1,341
39,50	1,340
40,00	1,340
40,50	1,340
41,00	1,339
41,50	1,339
42,00	1,339
42,50	1,338
43,00	1,338
43,50	1,338
44,00	1,338
44,50	1,337
45,00	1,337
45,50	1,337
46,00	1,336
46,50	1,336
47,00	1,336
47,50	1,336
48,00	1,335

Tabela A. 6 - Factores de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s para o mesmo perfil, com um nível de água inicial de 21 metros.

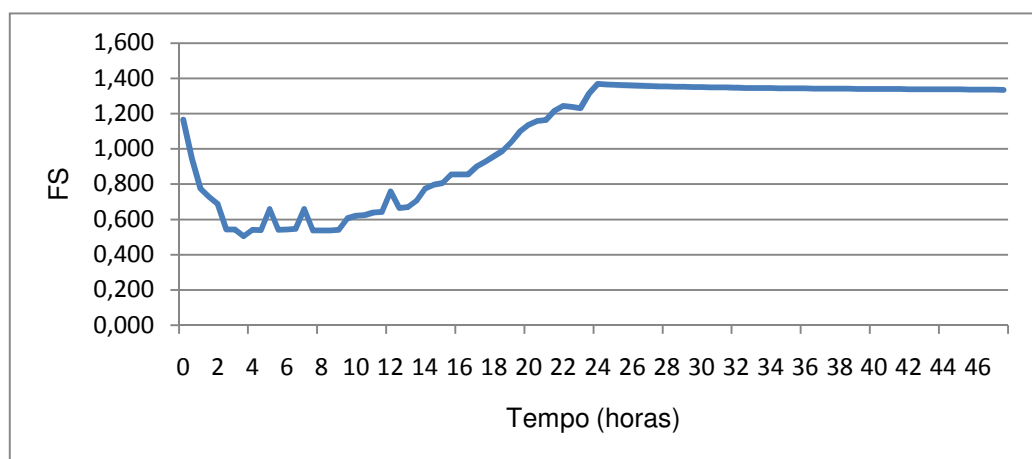


Fig. A. 21 – Evolução do Factor de segurança para um tempo de esvaziamento de 6 horas permeabilidade $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s para o mesmo perfil, com um nível de água inicial de 21 metros.