

ANÁLISE NUMÉRICA HIDROGEOMECÂNICA DA ESTABILIDADE EM TALUDES ESCAVADOS CONSIDERANDO FASEAMENTO E DRENAGEM

LARA ISABEL MARTINS MAGALHÃES

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

Orientador: Professor Doutor António Joaquim Pereira Viana da
Fonseca

Co-Orientador: Doutor António Campos e Matos

Julho de 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ mec@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

✉ 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 em Engenharia Civil - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais,

O tempo é um mestre lento, mas infalível

Vergílio Ferreira

AGRADECIMENTOS

Concluir esta etapa representa muito mais do que alcançar um objetivo académico. É a soma de esforços, alegrias e, sobretudo, do apoio de pessoas que de uma forma ou de outra, fizeram parte deste caminho.

Aos meus pais, por me proporcionarem sempre o melhor e por colocarem, em todas as escolhas, o meu bem-estar em primeiro lugar. Agradeço por nunca deixarem faltar amor e apoio mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, Pedro e Nelson, e à Vera por serem uma constante na minha vida, pela presença silenciosa ou pelas palavras certas no momento certo.

Às minhas meninas, Alice e Olívia, por me lembrarem, o quanto é bom crescer, por me darem um novo olhar sobre o mundo e renovarem em mim a vontade de ser exemplo.

Ao meu Pedro, por ser o meu refúgio nos dias pesados e a minha força nos momentos de dúvida. Foste quem me levantou quando o animo fraquejou, quem acreditou em mim mesmo quando eu já não sabia se conseguia. Obrigada por me ensinares, todos os dias que ser feliz é também fazer alguém sentir-se suficiente, capaz e amada.

Ao senhor Agostinho, à dona Celeste, à Raquel e ao Rui, por celebrarem cada passo meu como se fosse vosso.

Ao Professor Doutor António Viana da Fonseca, pela orientação generosa, pelos ensinamentos valiosos e pela constante disponibilidade ao longo deste percurso.

Ao Engenheiro António Campos e Matos, por partilhar com tanto entusiasmo o gosto pela Geotecnia e pelo interesse genuíno no tema da minha dissertação.

Ao GEG, por me ter acolhido da melhor forma e à Engenheira Ana Ramos, pela orientação na modelação e pela generosidade em partilhar o seu conhecimento e tempo comigo.

A todos os Amigos que a casa em que me formo me deu, e sei que levarei para a vida, obrigada pelos sorrisos, pela partilha, pelos momentos de leveza e pelas memórias criadas ao longo destes anos.

A todos os que foram casa, nos gestos, nas palavras ou na presença, o meu sincero e sentido obrigada.

RESUMO

A estabilidade de taludes escavados constitui uma preocupação essencial em projetos de engenharia geotécnica, sobretudo em obras lineares como linhas ferroviárias, onde a escavação de encostas naturais ou cortes artificiais é frequentemente inevitável. A presença de água no interior do maciço, resultante de um possível nível freático a uma cota elevada e da infiltração da precipitação atmosférica, altera significativamente o regime de tensões no solo, especialmente em condições de saturação parcial, levando à redução da resistência ao corte e, conseqüentemente, ao aumento da suscetibilidade à instabilização.

A presente dissertação tem como objetivo analisar numericamente o comportamento hidromeccânico de taludes escavados sujeitos à ação da precipitação, considerando ainda o efeito de diferentes soluções de drenagem profunda e do faseamento construtivo. Para tal, recorreu-se ao software *Plaxis 2D*, com modelação acoplada de fluxo e deformação, baseada num perfil geotécnico real representativo de um troço da futura linha ferroviária de alta velocidade em Portugal, fornecido pela empresa GEG.

O trabalho desenvolvido envolveu a caracterização detalhada do talude em estudo, a definição de quatro camadas de solo com diferentes propriedades hidráulicas e geomecânicas, incluindo materiais graníticos, siltosos e arenosos, e a simulação de um total de cinco cenários principais. Estes incluíram combinações de escavação faseada, precipitação com diferentes intensidades e distribuições temporais, presença ou ausência de drenagem, e variações na coesão e permeabilidade dos materiais. Os sistemas de drenagem testados consistiram em drenos inclinados com diferentes profundidades e disposições espaciais.

As análises permitiram acompanhar, ao longo do tempo, a evolução da poropressão, da sucção e do fator de segurança em cada cenário modelado, através de condições de fronteira realistas e de fluxos transientes, reproduzindo fenómenos de infiltração típicos de climas atlânticos. O estudo oferece uma visão abrangente sobre o impacto dos processos de percolação e da intervenção técnica no desempenho de taludes escavados, contribuindo para fundamentar decisões de projeto e apoiar soluções de engenharia mais seguras e eficazes.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes; Modelação numérica; Solos não saturados; Precipitação; Drenagem profunda;

ABSTRACT

The stability of excavated slopes is a critical concern in geotechnical engineering projects, particularly in linear infrastructures such as railway lines, where the excavation of natural slopes or artificial cuts is often unavoidable. The presence of water within the soil mass, resulting from atmospheric precipitation infiltration, significantly alters the internal stress regime, especially under partially saturated conditions. This leads to a reduction in shear strength and, consequently, an increased susceptibility to slope instability.

This dissertation aims to numerically analyse the hydrogeomechanical behaviour of excavated slopes subjected to precipitation, also considering the effects of deep drainage solutions and construction staging. The study was conducted using the *Plaxis 2D* software through coupled flow-deformation modelling, based on a real geotechnical profile representative of a section of the future high-speed railway line in Portugal, provided by the company GEG.

The work included a detailed geotechnical characterisation of the slope, the definition of four soil layers with distinct hydraulic and geomechanical properties, including granitic, silty and sandy materials and the simulation of five different scenarios. These scenarios combined staged excavation, precipitation events with varying intensities and temporal distributions, presence or absence of drainage, and changes in soil cohesion and permeability. The drainage systems tested consisted of inclined drains with varying depths and spatial configurations.

The analysis allowed for a time-dependent evaluation of pore water pressure, suction, and safety factor in each simulated scenario, using realistic boundary conditions and transient flow regimes to represent infiltration phenomena typical of Atlantic climates. This study provides a comprehensive understanding of the influence of percolation processes and engineering interventions on the performance of excavated slopes, contributing to better-informed design decisions and the development of safer and more effective geotechnical solutions.

KEYWORDS: Slope stability; Numerical modelling; Unsaturated soils; Precipitation; Deep drainage.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1.Introdução.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2.Estado de arte	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	6
2.2.1. ESTABILIDADE DE TALUDES.....	6
2.2.2. INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E IMPACTOS NA ESTABILIDADE	6
2.2.3. SOLUÇÕES DE DRENAGEM.....	7
2.2.4. PERFIS-TIPO E CAMADAS CONSTRUTIVAS EM PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS.....	7
2.3. REVISÃO DE ESTUDOS ANTERIORES	8
2.3.1. ESTABILIDADE DE TALUDES SOBRE A AÇÃO DA CHUVA	8
2.3.2. SISTEMAS DE DRENAGEM APLICADOS À ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES.....	8
2.3.3. APLICAÇÕES DE MODELAÇÃO NUMÉRICA	9
2.4. FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO NUMÉRICA	9
2.4.1. CAPACIDADE PARA MODELAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA	9
2.4.2. AVALIAÇÃO DO SOFTWARE <i>PLAXIS 2D</i> NA MODELAÇÃO GEOTÉCNICA	10
2.4.2.1. Vantagens do <i>Plaxis 2D</i>	10
2.4.2.2. Limitações do <i>Plaxis 2D</i>	11
2.5. SÍNTESE CRÍTICA E LACUNAS IDENTIFICADAS.....	11
3.Comportamento dos solos não saturados e implicações na estabilidade de taludes.....	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. CONCEITO DE SUCCÃO NOS SOLOS	14
3.3. CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (SWCC)	15
3.3.1. MODELO DE VAN GENUCHTEN.....	16
3.3.2. GRAU DE SATURAÇÃO E COMPORTAMENTO HIDRÁULICO	17

3.3.3. RELAÇÃO ENTRE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E RESISTÊNCIA AO CORTE.....	18
3.3.4. APLICAÇÃO PRÁTICA EM MODELAÇÃO	19
3.4. EFEITOS DA SUCÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES	19
3.4.1. MECANISMOS DE INFILTRAÇÃO E AS SUAS CONSEQUÊNCIAS	19
3.4.2. ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS NÃO SATURADOS	20
3.4.3. IMPORTÂNCIA DA MODELAÇÃO DA INFILTRAÇÃO	20
4. Caso de Estudo	23
4.1. INTRODUÇÃO	23
4.2. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO	23
4.2.1. APLICAÇÃO AO PRESENTE CASO.....	23
4.2.2. MODELO DE COMPORTAMENTO DO SOLO	24
4.2.3. ANÁLISE ACOPLADA DE FLUXO	24
4.2.4. MODELO DE FLUXO NÃO SATURADO, CONDIÇÕES HIDRÁULICAS E SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO	24
4.2.5. CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA	26
4.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA NO <i>PLAXIS 2D</i>	26
4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL-TIPO.....	26
4.3.1.1. Geometria do perfil-tipo	26
4.3.1.2. Simplificação da geometria para a modelação	27
4.3.2. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS, CONDIÇÕES DE CONTORNO E NÍVEL FREÁTICO	27
4.3.2.1. Malha de elementos finitos.....	27
4.3.2.2. Condições de contorno e nível freático	28
4.3.3. SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE DRENAGEM	30
4.3.4. FASEAMENTO CONSTRUTIVO.....	31
4.4. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	35
4.4.1. INTRODUÇÃO	35
4.4.2. PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO MACIÇO	35
4.4.3. PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	38
4.4.3.1. Curvas de sucção	38
4.4.3.2. Permeabilidade.....	45
4.4.3.3. Relação entre permeabilidade relativa e permeabilidade	46
4.5. RESUMO DO PLANO DE SIMULAÇÕES.....	47
4.5.1. CENÁRIO BASE.....	48
4.5.2. CENÁRIO 1-AVALIAÇÃO DO EFEITO DA GEOMETRIA DA DRENAGEM.....	48

4.5.3. CENÁRIO 2-VARIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO	49
4.5.3.1. Cenário 2.1-Infiltração mensal	49
4.5.3.2. Cenário 2.2-Infiltração máxima diária	51
4.5.4. CENÁRIO 3-AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA	51
4.5.4.1. Cenário 3.1-Avaliação da influência a da permeabilidade.....	51
4.5.4.2. Cenário 3.2-Avaliação da influência da coesão	51
5.Análise de resultados	55
5.1. INTRODUÇÃO	55
5.2. ANÁLISE DA POROPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO	57
5.2.1. EVOLUÇÃO DA POROPRESSÃO AO LONGO DO FASEAMENTO DA ESCAVAÇÃO	58
5.2.1.1. Condição base	58
5.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAGEM.....	59
5.2.2.1. Drenos de três metros sem infiltração	59
5.2.2.2. Drenos de 6m sem infiltração	60
5.2.2.3. Drenos de três metros com infiltração moderada	61
5.2.2.4. Drenos de seis metros com infiltração moderada.....	62
5.2.3. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO.....	64
5.2.3.1. Precipitação mensal de janeiro de 2025 em Viana do Castelo	64
5.2.3.2. Drenos de três metros com precipitação mensal variável	64
5.2.3.3. Drenos de seis metros com precipitação mensal variável.....	66
5.2.3.4. Precipitação máxima diária já registada em Viana do Castelo.....	67
5.2.3.5. Drenos de três metros com precipitação máxima diária.....	67
5.2.3.6. Drenos de seis metros com precipitação máxima diária	68
5.2.4. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DRENAGEM SUJEITOS A DIFERENTES INFILTRAÇÕES.....	69
5.2.5. INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE E COESÃO NA DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO	70
5.2.5.1. Permeabilidade	70
5.2.5.2. Faseamento da escavação com e sem infiltração	70
5.2.5.3. Drenos de três metros sem infiltração	71
5.2.5.4. Drenos de seis metros sem infiltração	72
5.2.5.5. Drenos de três metros com infiltração moderada	73
5.2.5.6. Drenos de seis metros com infiltração moderada.....	75
5.2.5.7. Coesão	76

5.2.5.8. Faseamento da escavação com e sem infiltração	76
5.2.5.9. Drenos de três metros sem infiltração.....	77
5.2.5.10. Drenos de seis metros sem infiltração	78
5.2.5.11. Drenos de três metros com infiltração moderada	79
5.2.5.12. Drenos de seis metros com infiltração moderada	80
5.2.6. DISCUSSÃO CRÍTICA	81
5.3. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA SUCÇÃO COM A PROFUNDIDADE DE ESCAVAÇÃO.....	82
5.3.1. COMPORTAMENTO DA SUCÇÃO EM CONDIÇÕES SECAS E COM INFILTRAÇÃO	82
5.3.2. INFLUÊNCIA DOS DRENOS NA CONSERVAÇÃO DA SUCÇÃO	84
5.3.3. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA SUCÇÃO	85
5.3.4. EFEITOS DA DIMINUIÇÃO DA PERMEABILIDADE E COESÃO NA SUCÇÃO	87
5.3.4.1. Permeabilidade	87
5.3.4.2. Coesão	89
5.3.5. DISCUSSÃO CRÍTICA	91
5.4. EVOLUÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA AO LONGO DO TEMPO	91
5.4.1. ESCAVAÇÃO FASEADA COM E SEM INFILTRAÇÃO	91
5.4.2. INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM SEM PRECIPITAÇÃO	92
5.4.3. INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM COM PRECIPITAÇÃO	93
5.4.4. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO	95
5.4.4.1. Precipitação mensal	95
5.4.4.2. Precipitação máxima diária	97
5.4.5. EFEITOS DA PERMEABILIDADE E DA COESÃO NOS RESULTADOS	98
5.4.5.1. Permeabilidade	98
5.4.5.2. Coesão	100
5.4.6. DISCUSSÃO CRÍTICA	102
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	105
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	105
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	107
Bibliografia	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Perfil-tipo da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (fonte: GEG, adaptado)	8
Figura 3.1- Distinção das zonas da curva de sucção	15
Figura 3.2- Curvas de sucção para solos arenosos, siltosos e argilosos (Fredlund et al., 1994)	16
Figura 3.3- Distribuição da pressão de água nos poros (Gerscovich, 2009)	18
Figura 3.4- Processo de redução de estabilidade através da precipitação	20
Figura 4.1- Perfil-tipo cotado da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (GEG, adaptado)	26
Figura 4.2- Perfil-tipo simplificado da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (GEG, adaptado)	27
Figura 4.3- Malha de elementos finitos gerada (<i>Plaxis 2D</i>)	28
Figura 4.4- Condições de contorno aplicadas ao modelo	28
Figura 4.5- Implementação do nível freático no modelo	28
Figura 4.6- Posição do nível freático da primeira à sexta fase de escavação no <i>Plaxis 2D</i>	29
Figura 4.7- Simulação de precipitação na modelação	30
Figura 4.8- Simulação da drenagem (drenos) na modelação	31
Figura 4.9- Esquema de execução dos drenos	31
Figura 4.10- Fase inicial	33
Figura 4.11- Escavação inicial	33
Figura 4.12- Segunda escavação	33
Figura 4.13- Ativação do primeiro nível de drenos	33
Figura 4.14- Terceira escavação	33
Figura 4.15- Ativação do segundo nível de drenos	33
Figura 4.16- Quarta escavação	34
Figura 4.17- Quinta escavação	34
Figura 4.18- Ativação do terceiro nível de drenos	34
Figura 4.19- Escavação final	34
Figura 4.20- Ativação do quarto/quinto nível de drenos	34
Figura 4.21- Curva de sucção de Viana da Fonseca, 1996	39
Figura 4.22- Curvas obtidas por Gomes, 2008	42
Figura 4.23- Representação dos drenos de 3 metros em 4 níveis	48
Figura 4.24- Representação dos drenos de 3 metros em 5 níveis	48
Figura 4.25- Representação dos drenos de 6 metros em 4 níveis	49
Figura 4.26- Representação dos drenos de 6 metros em 5 níveis	49
Figura 5.1- Posição dos pontos em estudo na malha de elementos finitos gerada	57
Figura 5.2- Acumulação de água na base de escavação para o cenário de precipitação mensal sem drenagem	64
Figura 5.3- Representação do nível freático e do acumulo de água à superfície após um evento infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade	89
Figura 5.4- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação moderada	92
Figura 5.5- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação moderada com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	95
Figura 5.6- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação mensal com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	96
Figura 5.7- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação máxima diária com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	98

Figura 5.8- Superfície de falha do cenário com menor permeabilidade sujeito a precipitação moderada	100
Figura 5.9- Superfície de falha do cenário com menor permeabilidade sujeito a precipitação moderada com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1- Ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva de sucção de Viana da Fonseca, 1996.....	41
Gráfico 4.2- ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva média obtida por Gomes, 2008	43
Gráfico 4.3- ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva mínima de Gomes, 2008	44
Gráfico 5.1- Evolução da poropressão ao longo do tempo do faseamento da escavação	58
Gráfico 5.2- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração	59
Gráfico 5.3- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis	60
Gráfico 5.4- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis	60
Gráfico 5.5- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis	61
Gráfico 5.6- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	61
Gráfico 5.7- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada	62
Gráfico 5.8- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada	62
Gráfico 5.9- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada	63
Gráfico 5.10- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada	63
Gráfico 5.11- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração mensal variável	65
Gráfico 5.12- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração mensal variável	65
Gráfico 5.13- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração mensal variável	66
Gráfico 5.14- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração mensal variável	66
Gráfico 5.15- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e infiltração máxima diária	67
Gráfico 5.16- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração máxima diária	68
Gráfico 5.17- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária	68
Gráfico 5.18- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração máxima diária	69
Gráfico 5.19- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária	69
Gráfico 5.20- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação no cenário com menor permeabilidade	70
Gráfico 5.21- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada no cenário com menor permeabilidade	71
Gráfico 5.22- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis no cenário de menor permeabilidade	72

Gráfico 5.23- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis no cenário de menor permeabilidade	72
Gráfico 5.24- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis no cenário de menor permeabilidade	73
Gráfico 5.25- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis no cenário de menor permeabilidade	73
Gráfico 5.26- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade	74
Gráfico 5.27- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade	75
Gráfico 5.28- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade	75
Gráfico 5.29- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade	76
Gráfico 5.30- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação no cenário com menor coesão	77
Gráfico 5.31- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada no cenário com menor coesão	77
Gráfico 5.32- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis no cenário de menor coesão	78
Gráfico 5.33- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis no cenário de menor coesão	78
Gráfico 5.34- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis no cenário de menor coesão	79
Gráfico 5.35- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis no cenário de menor coesão	79
Gráfico 5.36- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão	80
Gráfico 5.37- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão	80
Gráfico 5.38- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão	81
Gráfico 5.39- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão	81
Gráfico 5.40- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação	83
Gráfico 5.41- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada	83
Gráfico 5.42- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis	84
Gráfico 5.43- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada	84
Gráfico 5.44- Evolução da sucção ao longo do tempo de simulação para o faseamento de escavação com drenos de 6m em 5 níveis e posterior infiltração mensal	85
Gráfico 5.45- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração máxima diária	86
Gráfico 5.46- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária	86

Gráfico 5.47-Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação no cenário de menor permeabilidade	87
Gráfico 5.48- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade	87
Gráfico 5.49- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis para o cenário de menor permeabilidade	88
Gráfico 5.50- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade	88
Gráfico 5.51- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação para o cenário de menor coesão	89
Gráfico 5.52-Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada para o cenário de menor coesão.....	89
Gráfico 5.53- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis para o cenário de menor coesão	90
Gráfico 5.54- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada para o cenário de menor coesão	90
Gráfico 5.55- Evolução do fator de segurança no tempo para a condição base com e sem infiltração	92
Gráfico 5.56- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem.....	93
Gráfico 5.57- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração	94
Gráfico 5.58- - Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração mensal.....	96
Gráfico 5.59- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração máxima diária.....	97
Gráfico 5.60- Evolução do fator de segurança no tempo para o faseamento da escavação e os diferentes tipos de drenagem no cenário de menor permeabilidade	99
Gráfico 5.61- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade.....	99
Gráfico 5.62- Evolução do fator de segurança no tempo para o faseamento da escavação e os diferentes tipos de drenagem no cenário de menor coesão	101
Gráfico 5.63- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração moderada no cenário de menor coesão	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1- Designação dos parâmetros usados no <i>Plaxis 2D</i>	25
Tabela 4.2- Identificação das fases modeladas.....	32
Tabela 4.3- Propriedades geomecânicas estimadas com base na prospeção geológica-geotécnica .	36
Tabela 4.4- Parâmetros geotécnicos utilizados no modelo numérico	37
Tabela 4.5- Parâmetros de ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva obtida por Viana da Fonseca, 1996	40
Tabela 4.6- Parâmetros de ajuste de Van Genuchten, 1980 às curvas média e mínima obtidas por Gomes, 2008	43
Tabela 4.7- Permeabilidade estimadas para um solo saprolítico do Porto, Viana da Fonseca., 2003	47
Tabela 4.8- Permeabilidade adotada no modelo	47
Tabela 4.9- Dados da precipitação mensal de janeiro de 2025 (IPMA)	50
Tabela 4.10- Valores da permeabilidade usadas no cenário 3.1	51
Tabela 4.11- Valores de coesão utilizados no cenário 3.2	52
Tabela 4.12- Resumo dos cenários criados nas simulações.....	52
Tabela 5.1- Duração das atividades das diferentes simulações.....	56
Tabela 5.2- Posição dos pontos em estudo na malha de elementos finitos gerada	57
Tabela 5.3- Fator de segurança final para cada cenário e respectivas simulações.....	103

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

c	Coesão
c'	Coesão efetiva
e	Índice de vazios
E	Modulo de deformabilidade
g_a	Parâmetro de ajuste que está relacionado ao valor de entrada de ar no solo
g_c	Parâmetro de ajuste que é usado na equação geral de Van Genuchten. (No <i>Plaxis</i> , a seguinte suposição é feita para converter a equação de Van Genuchten numa equação de apenas dois parâmetros)
g_n	Parâmetro de ajuste que é a função da taxa de extração de água no solo uma vez que o valor de entrada de ar foi excedido
G_s	Densidade do solo
I_L	Índice de liquidez
K_{rel}	Coefficiente de permeabilidade relativo
K_s	Coefficiente de permeabilidade de saturação
K_x	Coefficiente de permeabilidade na direção horizontal
K_y	Coefficiente de permeabilidade na direção vertical
K_ψ	Permeabilidade à saturação
n	Porosidade do maciço
N_{SPT}	Número de pancadas do ensaio SPT
S	Grau de saturação
S_e	Saturação efetiva
u_a	Pressão de ar
u_w	Pressão de água
W	Grau de alteração
w	Teor em água do solo
W_L	Limite de liquidez
W_p	Limite de plasticidade
ψ	Sucção total
ϕ'	Ângulo de atrito
ϕ_b	Ângulo de atrito com respeito à sucção
γ	Peso volúmico do solo
γ_{sat}	Peso volúmico saturado

γ_d	Peso volúmico seco
ν	Coefficiente de Poisson
θ	Teor em água normalizado
θ_{res}	Teor em água volumétrico residual (saturação residual que descreve uma parte do fluido que permanece nos poros mesmo para altos valores de sucção)
θ_{sat}	Teor em água volumétrico para a condição de solo saturado
θ_w	Teor em água volumétrico
σ	Tensão total normal
τ	Resistência ao cisalhamento
EC7	Eurocódigo 7
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FS	Fator de segurança
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
MEF	Método dos elementos finitos
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SWCC	<i>Soil Water characteristic curve</i>

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A instabilidade de taludes representa, ainda hoje, um dos desafios centrais da engenharia geotécnica, sobretudo no contexto de obras lineares como estradas e ferrovias, onde a intervenção em encostas naturais ou a execução de cortes artificiais é inevitável. Estas intervenções, quando mal dimensionadas ou afetadas por fenómenos externos como a infiltração de água, podem comprometer a estabilidade global da infraestrutura, colocando em risco a segurança de pessoas e bens, e originando elevados custos económicos e ambientais associados à sua reabilitação.

A ação da água é, entre os fatores condicionantes, um dos mais relevantes. A infiltração decorrente da precipitação atmosférica altera significativamente o regime de tensões efetivas no interior do solo, induzindo aumentos nas pressões intersticiais e reduções na sucção matricial. Este efeito é particularmente crítico em solos parcialmente saturados, como é frequentemente o caso em encostas naturais, podendo resultar numa degradação progressiva da resistência ao corte e, em consequência, no desencadeamento de fenómenos de instabilidade. Neste sentido, torna-se essencial compreender as interações entre fluxo de água, propriedades geomecânicas e resposta estrutural do maciço, sendo a modelação numérica acoplada entre fluxo e deformação uma ferramenta determinante nesse processo.

A drenagem surge, nestes contextos, como uma medida de mitigação amplamente utilizada, com o objetivo de limitar a subida das poropressões e estabilizar o comportamento global do talude. Contudo, a sua eficácia depende de múltiplos fatores, como a estratigrafia do terreno, a localização do nível freático, a intensidade da precipitação, a geometria da encosta e a permeabilidade dos solos envolvidos. Assim, a avaliação da estabilidade de taludes sob a ação da água, e da performance de diferentes soluções de drenagem, requer uma abordagem integrada, rigorosa e sensível à variabilidade natural dos sistemas.

A presente dissertação insere-se neste enquadramento técnico e científico, com o objetivo de avaliar, com recurso a modelação numérica no *software Plaxis 2D*, a influência da precipitação, do faseamento construtivo e da aplicação de sistemas de drenagem na estabilidade de um talude escavado. O estudo foi desenvolvido com base num perfil geotécnico real fornecido pela empresa GEG, correspondente a um troço da futura linha ferroviária de alta velocidade em Portugal, tendo sido simulados diversos cenários que visaram representar diferentes combinações de fatores hidráulicos, geomecânicos e construtivos.

1.2. OBJETIVOS

A dissertação teve como principal objetivo a análise do comportamento hidrogeomecânico de um talude escavado sujeito à ação da precipitação e à aplicação de soluções de drenagem, com base num perfil geométrico e geotécnico real. Esta análise foi realizada com recurso a modelação numérica acoplada, com o intuito de compreender as interações entre o fluxo de água no solo, o desenvolvimento de poropressões e o comportamento estrutural do maciço, ao longo do tempo e em diferentes fases construtivas.

De forma mais específica, o trabalho procurou avaliar os efeitos da precipitação (considerando uma determinada profundidade do nível freático), tanto em intensidade como em duração, na estabilidade do talude, quantificando a variação do fator de segurança em diferentes condições. Para além disso, foram testadas diferentes geometrias e configurações de sistemas de drenagem profunda, com o objetivo de aferir a sua eficácia na redução da poropressão e no reforço da segurança global, contribuindo também para a otimização de soluções de drenagem aplicáveis a uma situação real de projeto. A influência do faseamento construtivo foi também analisada, de modo a perceber de que forma a escavação progressiva pode alterar o regime de tensões no interior do solo. Por fim, foi realizada uma análise de sensibilidade relativamente à variação de dois parâmetros geotécnicos fundamentais, a permeabilidade e a coesão, com vista à identificação dos fatores mais críticos para a estabilidade do talude.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, organizados de forma lógica e sequencial, de modo a refletir a progressão natural do trabalho desenvolvido, desde a revisão teórica até à análise dos resultados e formulação das conclusões.

O Capítulo 2 corresponde ao estado da arte, onde são apresentados os principais conceitos associados à estabilidade de taludes naturais, à influência da água e da precipitação na sua instabilidade, à utilização de soluções de drenagem e às metodologias de modelação numérica aplicadas a este tipo de problema. Este capítulo estabelece o enquadramento teórico e técnico fundamental para o desenvolvimento do estudo.

No Capítulo 3, dedicado ao comportamento dos solos não saturados, são exploradas as características hidráulicas e mecânicas destes materiais, com especial foco na relação entre sucção, grau de saturação e resistência ao corte. Apresenta-se ainda a formulação utilizada no *Plaxis 2D* para simular o comportamento acoplado de fluxo e deformação em solos parcialmente saturados, com destaque para os modelos constitutivos aplicados.

O Capítulo 4 apresenta o caso de estudo real, descrevendo o perfil geotécnico analisado, os materiais considerados, a geometria modelada e os parâmetros geotécnicos atribuídos a cada camada de solo. Explica-se a metodologia relativa à modelação adotada, bem como os diferentes cenários simulados, incluindo o faseamento construtivo, os episódios de precipitação com diferentes intensidades e as várias soluções de drenagem testadas.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com análise detalhada da evolução da sucção, da poropressão e do fator de segurança em cada cenário. A comparação entre as diferentes combinações de parâmetros e configurações permite retirar conclusões fundamentadas sobre a eficácia das soluções de drenagem e a sensibilidade da estabilidade à ação da água.

Finalmente, o Capítulo 6 reúne as conclusões e desenvolvimentos futuros, sintetizando os principais contributos do trabalho, identificando as suas limitações e sugerindo linhas de investigação que possam complementar ou expandir a análise aqui realizada.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes naturais ou escavados é uma preocupação constante em projetos de Engenharia Civil, em especial na construção de infraestruturas lineares como vias rodoviárias e ferroviárias. A ocorrência de movimentos de massa associados à instabilidade de taludes pode representar riscos significativos à segurança, ao meio ambiente e à integridade das estruturas envolventes, resultando em elevados custos económicos e sociais.

Os taludes naturais e escavados estão sujeitos a diversos fatores que influenciam a sua estabilidade, entre os quais a ação da água desempenha um papel determinante. A infiltração da água da chuva, o nível freático e as características geotécnicas dos solos afetam o equilíbrio do maciço, podendo originar movimentos de massa. A avaliação do comportamento de taludes exige, por isso, uma análise integrada que considere as propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos, bem como a sua evolução temporal sob diferentes condições climáticas.

Entre os fatores que mais contribuem para a instabilização de taludes está a infiltração da água da chuva, que provoca alterações nas condições hidráulicas e geotécnicas do solo. A saturação progressiva de determinadas camadas, a perda de sucção em solos não saturados e o aumento das poropressões são mecanismos frequentemente associados a escorregamentos superficiais e profundos. Este fenómeno é particularmente relevante em regiões com variações sazonais de precipitação acentuadas, como é o caso da região de Viana do Castelo, onde serão analisados dados climáticos reais no âmbito deste trabalho.

Como resposta técnica a esta problemática, os sistemas de drenagem desempenham um papel essencial na manutenção da estabilidade de taludes. A sua correta conceção e implementação permite controlar o escoamento superficial, reduzir a infiltração de água e diminuir as poropressões do solo. No entanto, a eficácia dos diferentes tipos de drenagem pode variar significativamente consoante a natureza dos materiais, a geometria do talude e as condições hidrogeológicas locais.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos associados à estabilidade de taludes sob efeito da precipitação, abordar os mecanismos de infiltração e a sua influência no comportamento dos solos, e compilar os contributos mais relevantes da literatura relativamente ao papel dos sistemas de drenagem na prevenção de instabilidades. Serão ainda abordadas as ferramentas computacionais utilizadas na modelação e análise de estabilidade, com enfoque no método dos elementos finitos implementado no *software Plaxis 2D*.

2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.2.1. ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de um talude depende do equilíbrio entre as forças resistentes (devido à coesão e fricção do solo) e as forças desestabilizadoras (como o peso próprio do solo, cargas externas ou presença de água). A relação entre estas forças é expressa pelo fator de segurança, que representa o quociente entre a resistência ao deslizamento e os esforços mobilizados. Valores de fator de segurança (FS) inferiores a 1 indicam condição de instabilidade iminente.

Os métodos clássicos de análise de estabilidade são geralmente baseados no equilíbrio limite, como os métodos de Bishop (1955), Janbu (1973) ou Spencer (1967). Estes modelos assumem superfícies de rotura circulares ou não circulares e utilizam simplificações para calcular o fator de segurança. Em contextos mais complexos, recorre-se à modelação numérica, que permite uma análise mais realista do comportamento tenso-deformacional do maciço.

A estabilidade de um talude depende de fatores como a geometria, as propriedades dos solos constituintes, a presença de água, cargas externas, e alterações no ambiente natural ou por ação humana. A condição mais crítica verifica-se frequentemente após episódios de precipitação intensa, que induzem o aumento do teor de humidade e a subida do nível freático, reduzindo a resistência ao corte dos solos finos (Fredlund et al., 2012).

A resistência ao corte em solos não saturados é muitas vezes modelada considerando a sucção matricial, que contribui para o aumento da coesão aparente. No entanto, esta sucção diminui com a infiltração, o que compromete a estabilidade do talude. Taludes escavados, como o do presente estudo, estão especialmente sujeitos a estes efeitos durante e após a fase construtiva.

2.2.2. INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E IMPACTOS NA ESTABILIDADE

A infiltração da água da chuva modifica as condições de tensão e sucção nos solos. Em solos parcialmente saturados, a sucção matricial (pressão negativa da água nos poros) contribui para a resistência ao corte. Com a infiltração contínua, essa sucção diminui, levando à perda de coesão aparente e ao aumento da vulnerabilidade à instabilidade (Fredlund et al., 1993; Ng & Shi, 1998).

A intensidade e duração da chuva são fatores críticos: chuvas de curta duração, mas altas intensidades podem causar escoamento superficial e erosão, enquanto chuvas prolongadas têm maior potencial para saturar camadas profundas, levando a escorregamentos. Estudos como os de Rahardjo et al., (2007) mostraram que taludes em solos residuais podem tornar-se instáveis após vários dias de chuva contínua, mesmo que cada episódio individual não seja extremo. Solos com elevada porosidade e permeabilidade (como areias siltosas) permitem uma rápida infiltração, enquanto solos mais finos (como os siltes e as argilas) retêm a água por mais tempo, prolongando os efeitos desestabilizadores (Van Genuchten, 1980).

Além disso, a infiltração leva ao aumento das pressões neutras, reduzindo a tensão efetiva e a resistência ao corte. Isto é especialmente perigoso em taludes com camadas de baixa permeabilidade subjacentes a camadas mais permeáveis, pois a água pode acumular-se e gerar planos de rotura preferenciais.

2.2.3. SOLUÇÕES DE DRENAGEM

Os sistemas de drenagem têm como objetivo controlar a presença de água no interior do talude, reduzir a saturação e, conseqüentemente, melhorar a estabilidade. Estes sistemas podem ser classificados em:

- Drenagem superficial: valetas, caleiras ou coberturas vegetais que reduzem a infiltração direta da chuva e controlam o escoamento superficial.
- Drenagem profunda: drenos horizontais, verticais, geodrenos ou poços que permitem escoar a água acumulada em profundidade, reduzindo a pressão intersticial.

A escolha do sistema mais adequado depende da geometria do talude, tipo de solo, nível freático e regime pluviométrico. Por exemplo, em taludes compostos por solos finos e pouco permeáveis, os drenos profundos podem ser mais eficazes do que as soluções superficiais, já que a infiltração atinge lentamente as camadas críticas.

Vários estudos têm demonstrado a eficácia da drenagem na melhoria do fator de segurança. Por exemplo, Chu et al., (2001) utilizaram modelação numérica para mostrar que a instalação de drenos horizontais pode aumentar o fator de segurança em mais de 30% em taludes argilosos. Já Cavalcanti (2016), em dissertação aplicada ao contexto brasileiro, confirmou a importância da combinação entre proteção superficial e drenagem profunda em taludes urbanos instáveis.

2.2.4. PERFIS-TIPO E CAMADAS CONSTRUTIVAS EM PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS

No âmbito do dimensionamento e da modelação geotécnica de infraestruturas ferroviárias, a definição precisa do perfil transversal da plataforma constitui um elemento essencial. Este perfil inclui não só a geometria da escavação e dos taludes, como também as diferentes camadas construtivas que garantem o suporte estrutural e a durabilidade da via-férrea. Em linhas de alta velocidade, estes aspetos adquirem particular importância, dada a elevada exigência em termos de segurança, regularidade e conforto da circulação.

O perfil adotado para o presente estudo baseia-se num corte representativo da nova Linha de Alta Velocidade entre o Porto e Lisboa, atualmente em fase de projeto e execução. Este perfil-tipo foi disponibilizado pela empresa GEG, no contexto dos estudos geotécnicos realizados para a implantação da plataforma ferroviária.

A geometria representada contempla uma escavação com cerca de 81 metros de largura no topo e profundidade máxima aproximada de 19 metros. O fundo da escavação apresenta um patamar central com cerca de 18 metros de largura, destinado à futura plataforma da linha férrea, sendo ladeado por taludes inclinados em dois lanços simétricos. Esta configuração geométrica visa otimizar o equilíbrio do talude e reduzir o volume total de escavação.

Relativamente à constituição estratigráfica, consideram-se quatro camadas principais:

- uma camada superficial de aterro aluvionar;
- e três camadas inferiores de materiais naturais, correspondentes a diferentes unidades geotécnicas da região atravessada (siltes e granitos com diferentes graus de alteração e resistência, conforme caracterização geotécnica efetuada *in situ*).

A introdução do sub-balastro cumpre os critérios definidos na Norma Portuguesa NP EN 13231-3 (relativa à geometria e qualidade da via) e nas especificações técnicas da Infraestruturas de Portugal, constituindo uma solução corrente em plataformas de linhas de alta velocidade, onde é exigida elevada rigidez e capacidade de drenagem da fundação da via.

Este perfil-tipo (Figura 2.1) será posteriormente utilizado na modelação numérica, nomeadamente para avaliar a estabilidade do talude sob diferentes cenários de precipitação e soluções de drenagem, tal como se detalhará nos seguintes capítulos.

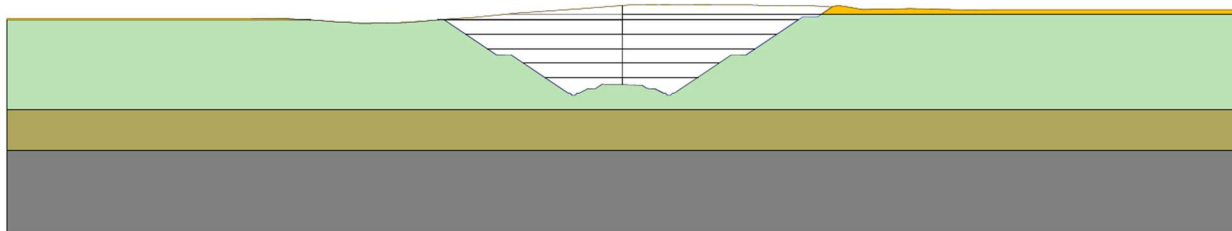


Figura 2.1- Perfil-tipo da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (fonte: GEG, adaptado)

2.3. REVISÃO DE ESTUDOS ANTERIORES

2.3.1. ESTABILIDADE DE TALUDES SOBRE A AÇÃO DA CHUVA

Diversos autores têm analisado os efeitos da precipitação na estabilidade de taludes, com enfoque nas variações de sucção, infiltração e evolução das poropressões. O trabalho clássico de Ng et al., (1998) demonstrou que tanto a intensidade como a duração da chuva influenciam de forma significativa o grau de saturação e, por consequência, o fator de segurança de taludes em solos não saturados.

Estudos mais recentes, como o de Rahardjo et al. (2007), mostraram que a perda de sucção matricial em solos residuais pode ser responsável por deslizamentos mesmo em encostas com declives moderados, especialmente quando a chuva se prolonga por vários dias consecutivos. Foi observado que o fator de segurança tende a diminuir progressivamente à medida que a frente de humidade penetra no perfil do solo.

Em Portugal, apesar da crescente preocupação com eventos extremos e alterações climáticas, ainda são escassos os estudos que relacionam precipitação real com instabilidade de taludes. Trabalhos como o de Viana da Fonseca (2015) focam-se sobretudo em eventos de colapso registados, mas há uma lacuna clara no que diz respeito à simulação numérica baseada em dados pluviométricos regionais.

Este trabalho pretende contribuir para esse campo, ao integrar dados históricos de precipitação de Viana do Castelo em modelos numéricos para avaliar o efeito de diferentes intensidades e durações de chuva em taludes com condições geotécnicas variadas.

2.3.2. SISTEMAS DE DRENAGEM APLICADOS À ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

A drenagem tem sido amplamente referida como uma das soluções mais eficazes para mitigar os efeitos da infiltração da água nos taludes. Como referido, Cavalcanti (2016) estudou o efeito combinado de proteção superficial com drenagem profunda, concluindo que a simples colocação de drenos horizontais pode aumentar significativamente o FS, especialmente em solos argilosos com baixa permeabilidade.

Chu et al., (2001) utilizaram modelação numérica para simular diferentes configurações de drenagem em taludes e observaram que, dependendo da profundidade e espaçamento entre drenos, a melhoria no

fator de segurança (FS) podia ultrapassar os 30%. Este tipo de intervenção mostrou-se mais eficaz do que apenas reduzir o ângulo de inclinação do talude.

Em contextos de obras lineares, como linhas ferroviárias ou rodoviárias, Lepore et al. (2020) demonstraram a eficácia da instalação de geodrenos verticais associados a drenos horizontais, criando um sistema de drenagem integrado capaz de estabilizar taludes previamente instáveis com baixo impacto na geometria original.

No contexto português, continua a ser necessário comparar a eficácia de diferentes soluções de drenagem adaptadas a solos típicos, como siltes ou materiais graníticos alterados, em conjunto com as variações pluviométricas das regiões montanhosas. Esta dissertação visa, assim, explorar esta interseção de forma detalhada.

2.3.3. APLICAÇÕES DE MODELAÇÃO NUMÉRICA

O uso de modelação numérica tem-se tornado cada vez mais relevante para a previsão do comportamento de taludes sob condições hidrológicas variáveis. O *Plaxis 2D* é uma das ferramentas mais utilizadas para este fim, permitindo simular a acoplagem entre escoamento não saturado e deformações do solo (modelo *couple flow-deformation*).

Rahardjo et al., (2005) utilizaram o *Plaxis* para simular chuvas de diferentes intensidades e demonstraram que a infiltração pode induzir deslocamentos progressivos mesmo antes da falha global. De modo semelhante, Lee et al., (2013) combinaram dados meteorológicos reais com modelação numérica para prever a janela de tempo crítica entre o início da chuva e a ocorrência de instabilidade.

Trabalhos como o de Pinto et al., (2019), realizados em Portugal, aplicaram o *Plaxis* à modelação de taludes escavados em granito alterado, evidenciando a necessidade de calibrar adequadamente os parâmetros hidráulicos e de resistência ao corte para obter resultados consistentes.

2.4. FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO NUMÉRICA

A utilização de ferramentas de modelação numérica tem-se tornado essencial na análise da estabilidade de taludes, sobretudo em contextos que envolvem a ação da chuva, variações na saturação dos solos e a presença de sistemas de drenagem. Entre os *softwares* mais utilizados, destaca-se o *Plaxis 2D*, desenvolvido com base no método dos elementos finitos (MEF), que permite simular o comportamento mecânico e hidráulico de solos e estruturas em situações complexas.

2.4.1. CAPACIDADE PARA MODELAÇÃO HIDROGEOTÉCNICA

O *Plaxis* permite a análise acoplada de escoamento de água em meios porosos não saturados e deformações mecânicas do solo, através do módulo “*coupled flow-deformation*”. Isto é particularmente importante em taludes sujeitos à infiltração da chuva, onde a variação da sucção e o aumento da poropressão ao longo do tempo afetam significativamente a resistência ao corte do solo.

Entre as funcionalidades relevantes para o presente caso de estudo, destacam-se:

- Definição de curvas de retenção (SWCC) com base em ensaios laboratoriais ou valores empíricos (modelo de Van Genuchten, 1980);

- Introdução de cenários de precipitação simulada na superfície do talude, com controlo da intensidade e duração;
- Definição de níveis freáticos móveis e avaliação da sua evolução com o tempo;
- Implementação de drenos horizontais ou verticais, poços e barreiras impermeáveis;
- Possibilidade de simular faseamento construtivo, escavações parciais ou alterações na geometria ao longo do tempo.

Estes recursos tornam o *Plaxis* adequado para representar de forma realista o comportamento de um talude sob diferentes condições climáticas e soluções de engenharia.

2.4.2. AVALIAÇÃO DO SOFTWARE *PLAXIS 2D* NA MODELAÇÃO GEOTÉCNICA

A modelação numérica é atualmente uma ferramenta essencial em Geotecnia, permitindo simular o comportamento do solo e das estruturas em condições que seriam difíceis ou impraticáveis de reproduzir em ensaios laboratoriais ou campanhas de campo. No contexto da análise de taludes sujeitos à infiltração de água, a simulação computacional assume particular relevância, uma vez que permite estudar o acoplamento entre escoamento não saturado e estabilidade do maciço.

Entre os diversos programas disponíveis, o *Plaxis 2D* destaca-se como uma das ferramentas mais utilizadas na prática profissional e na investigação científica. Este *software*, baseado no método dos elementos finitos (MEF), permite a análise de problemas geotécnicos complexos em duas dimensões, incluindo a consideração de fases construtivas, diferentes modelos constitutivos de solo e condições hidráulicas variáveis ao longo do tempo.

2.4.2.1. Vantagens do *Plaxis 2D*

- Permite a simulação acoplada do escoamento de água e do comportamento mecânico do solo (cálculos de pressão neutra, tensão-deformação e deslocamentos);
- Inclui uma vasta biblioteca de modelos constitutivos, desde modelos elásticos a modelos avançados como o *Hardening Soil* ou o *Soft Soil Creep*;
- A funcionalidade de fases construtivas (*Staged Construction*) permite representar escavações, carregamentos progressivos e alterações nas condições de fronteira de forma realista;
- A interface gráfica facilita a definição da geometria, propriedades dos materiais, cargas e malha de elementos finitos;
- Permite análises de segurança ao deslizamento (FS) com diferentes métodos (ex: ϕ/c reduction);
- Integra ferramentas de visualização de resultados úteis para análise de estabilidade (ex: campo de deslocamentos, tensões, pressões neutras).

2.4.2.2. Limitações do *Plaxis 2D*

- A representação bidimensional obriga à simplificação de geometrias reais tridimensionais, o que pode afetar a precisão dos resultados em alguns casos;
- A qualidade e fiabilidade da análise dependem fortemente da definição adequada da malha, da modelação das condições de contorno e dos parâmetros dos modelos de solo (os quais podem ser difíceis de obter ou estimar com precisão);
- A simulação de infiltração requer a definição de parâmetros hidráulicos, como a curva característica do solo, que frequentemente não estão disponíveis em estudos de campo;
- Em perfis geotécnicos muito heterogêneos ou irregulares, pode ser necessário simplificar o modelo para garantir a convergência e a estabilidade numérica;
- O tempo de cálculo pode ser elevado, especialmente em simulações transitórias com várias fases.

Apesar destas limitações, o *Plaxis 2D* é uma ferramenta amplamente validada e utilizada, sendo recomendada em várias normas internacionais e presente em múltiplos estudos científicos. A sua aplicação nesta dissertação visa explorar a evolução da estabilidade de um talude em perfil real, sujeito a diferentes situações de drenagem, precipitação e parametrização.

2.5. SÍNTESE CRÍTICA E LACUNAS IDENTIFICADAS

A literatura analisada demonstra que a instabilidade de taludes induzida pela chuva é um fenómeno complexo, influenciado por múltiplos fatores, incluindo o tipo de solo, a geometria do talude, o regime de precipitação e a presença (ou ausência) de sistemas de drenagem. Estudos internacionais, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, têm demonstrado com clareza a importância de considerar a infiltração em meios não saturados, as variações de sucção e a poropressão no tempo como elementos cruciais na avaliação da estabilidade de taludes.

Além disso, diversos trabalhos comprovam que a instalação de sistemas de drenagem, tanto superficiais como profundos, é uma das medidas mais eficazes para aumentar o fator de segurança e prevenir falhas em encostas instáveis. A modelação numérica com o *Plaxis 2D* ao permitir a simulação acoplada entre escoamento e deformação, tem sido amplamente utilizada com sucesso para representar estes fenómenos em detalhe.

Contudo, identificam-se várias lacunas relevantes, especialmente no contexto português:

- A maioria dos estudos de instabilidade de taludes em Portugal tem carácter descritivo ou empírico, baseando-se na observação de deslizamentos ou em análises simplificadas de estabilidade estática;
- Há uma escassez de trabalhos que combinem dados meteorológicos reais (precipitação medida) com modelação numérica transiente;
- São ainda poucos os estudos que explorem o efeito comparativo de diferentes soluções de drenagem sob cenários de chuva intensa, especialmente em taludes com estratigrafia complexa ou baseados em perfis reais de obras de engenharia, como linhas ferroviárias;

- Por fim, verifica-se uma lacuna na aplicação do *Plaxis 2D* a taludes com múltiplas camadas de solos naturais e alterados, em zonas como o Norte e o Interior de Portugal, onde predominam solos graníticos alterados, aluviões e siltes.

Neste contexto, a presente dissertação pretende responder a essas lacunas, através de:

- A modelação numérica de um talude com base num perfil geotécnico real fornecido pelo GEG;
- A simulação de chuvas com diferentes intensidades e durações, usando dados reais das estações de Viana do Castelo, dados fornecidos pelo IPMA;
- A comparação entre cenários com e sem drenagem, avaliando o impacto de diferentes soluções de engenharia na melhoria do fator de segurança e na evolução das poropressões ao longo do tempo.

Deste modo, espera-se contribuir para uma melhor compreensão do comportamento dos taludes naturais em Portugal sob ação da chuva, bem como para a avaliação da eficácia de soluções de drenagem adaptadas às condições locais.

3

COMPORTAMENTO DOS SOLOS NÃO SATURADOS E IMPLICAÇÕES NA ESTABILIDADE DE TALUDES

3.1. INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento dos solos não saturados tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante na engenharia geotécnica, sobretudo em contextos onde a variação do teor de humidade influencia significativamente a estabilidade de taludes naturais. Ao contrário dos solos saturados, os solos não saturados apresentam uma fase gasosa e uma fase líquida coexistindo nos poros, o que origina fenómenos complexos como a sucção matricial e a coesão aparente. Estes efeitos podem conferir uma resistência adicional ao solo em condições secas, mas tendem a desaparecer à medida que o solo se aproxima da saturação total, o que pode levar à instabilização de taludes após períodos prolongados de precipitação (Fredlund et al., 1993).

A sucção no solo, resultante da tensão superficial da água nos poros e da interação entre as fases sólida e líquida, afeta tanto o comportamento hidráulico como o mecânico do solo. Em particular, a resistência ao corte dos solos não saturados depende não só da tensão efetiva, mas também da sucção matricial e do grau de saturação (Vanapalli et al., 1996). A representação gráfica desta relação é geralmente feita através da curva de retenção de água (SWCC, *Soil Water Characteristic Curve*), que permite descrever a variação do teor de água em função da sucção, sendo essencial na previsão do fluxo de água em meios não saturados.

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais relacionados com a sucção, o grau de saturação e a curva de retenção de água, discutindo-se a sua influência na estabilidade de taludes sujeitos à infiltração. Será ainda explorada a forma como estes fenómenos são representados em modelação numérica com recurso ao *software Plaxis 2D*, de forma a contextualizar os resultados obtidos nesta dissertação.

3.2. CONCEITO DE SUCÇÃO NOS SOLOS

Nos solos não saturados, a presença simultânea de água e ar nos poros introduz o fenômeno da sucção, que desempenha um papel central tanto no comportamento hidráulico como no comportamento mecânico destes materiais. A sucção pode ser definida como a diferença entre a pressão da fase gasosa (ar) e a pressão da fase líquida (água) nos poros do solo (Fredlund et al., 1993):

$$\psi(\text{sucção}) = u_a - u_w \quad 3.1$$

em que u_a é a pressão do ar e u_w a pressão da água.

A sucção total pode ser dividida em duas componentes principais: sucção matricial e sucção osmótica. A sucção matricial é a mais relevante do ponto de vista geotécnico, pois está associada à tensão superficial da água nos poros e à sua adesão às partículas sólidas do solo. Esta forma de sucção é fortemente influenciada pelo tamanho dos poros, pela estrutura do solo e pelo seu teor de humidade. A sucção osmótica, por outro lado, resulta da presença de solutos dissolvidos na água do solo, sendo mais significativa em solos contaminados ou em ambientes com alta concentração de sais (Lu et al., 2004). Na maioria das análises de estabilidade de taludes naturais, é a componente matricial que assume maior relevância.

A sucção matricial pode contribuir de forma significativa para a resistência ao corte dos solos não saturados. A este efeito chama-se coesão aparente, que desaparece quando o solo atinge a saturação. Fredlund et al. (1978) propuseram uma generalização do critério de resistência de Mohr-Coulomb para solos não saturados, incorporando o efeito da sucção matricial:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad 3.2$$

onde:

- τ é a resistência ao cisalhamento,
- c' é a coesão efetiva,
- σ é a tensão total normal,
- ϕ' é o ângulo de atrito efetivo,
- ϕ_b é o parâmetro que representa a variação da resistência com a sucção matricial.

Este modelo demonstra que a sucção contribui para a resistência do solo de forma semelhante à tensão efetiva, mas essa contribuição depende da saturação e da estrutura do solo. Quando ocorre um aumento do teor de água (como em períodos de chuva intensa) a sucção diminui, e consequentemente, a coesão aparente também, podendo conduzir à redução da estabilidade do talude.

Assim, a consideração da sucção matricial é essencial para a análise realista do comportamento de taludes em condições naturais, especialmente em solos finos com baixa permeabilidade, onde os efeitos da não saturação podem ser significativos.

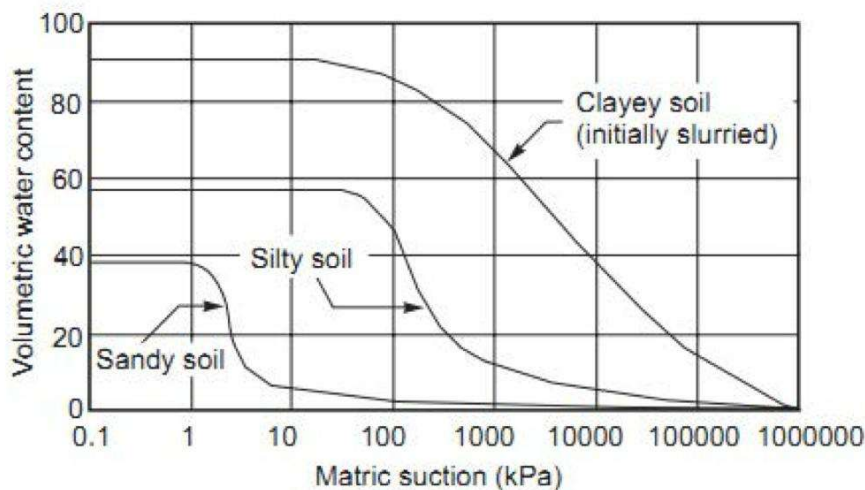


Figura 3.2- Curvas de sucção para solos arenosos, siltosos e argilosos (Fredlund et al., 1994)

Para a sua representação matemática, diversos modelos empíricos foram propostos. Um dos mais amplamente utilizados é o modelo de Van Genuchten (1980).

3.3.1. MODELO DE VAN GENUCHTEN

O modelo de Van Genuchten (1980) é um dos modelos empíricos mais utilizados para descrever a curva de retenção de água dos solos. A sua popularidade deve-se à capacidade de ajustar com elevada aproximação os dados experimentais da curva de retenção, com um número reduzido de parâmetros e boa aplicabilidade prática, tanto em laboratórios como em modelação numérica.

A expressão geral da curva proposta por Van Genuchten é dada por:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\psi|)^n]^m} \quad 3.3$$

onde:

- $\theta(\psi)$ é o teor de água volumétrico para uma dada sucção, ψ ;
- θ_s é o teor de água volumétrico à saturação;
- θ_r é o teor de água volumétrico residual (água fortemente retida pelas partículas do solo);
- α é um parâmetro inversamente relacionado com o valor da sucção a partir do qual se inicia a secagem (isto é, quanto maior α , menor a sucção correspondente ao início da transição);
- n controla a inclinação da curva na zona de transição;
- m está relacionado com n , sendo muitas vezes definido como $m = 1 - \frac{1}{n}$ para simplificar os ajustes.

Este modelo é particularmente eficaz em solos com uma estrutura porosa contínua e bem definida, como areias e siltes, mas também pode ser ajustado a solos argilosos.

Além da sua aplicação na caracterização da curva de sucção, o modelo de Van Genuchten pode ser integrado com a equação de Mualem (1976) para estimar a condutividade hidráulica não saturada, o que o torna ainda mais útil em análises de fluxo em meios porosos não saturados:

$$k(\psi) = k_s \cdot S_e^l \cdot [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad 3.4$$

onde:

- $k(\psi)$ é a condutividade hidráulica para uma sucção, ψ ;
- k_s é a condutividade hidráulica à saturação;
- $S_e = \frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ é a saturação efetiva;
- l é um parâmetro de forma (geralmente assumido como 0,5 para solos naturais);
- os restantes parâmetros são os mesmos da equação da SWCC.

Este modelo combinado Van Genuchten–Mualem é implementado em vários programas de modelação numérica, como o *Plaxis 2D*, permitindo a simulação precisa do fluxo de água em meios não saturados, essencial na avaliação da estabilidade de taludes sujeitos à infiltração.

A adoção do modelo de Van Genuchten na presente dissertação justifica-se pela sua fiabilidade, pela disponibilidade de parâmetros na literatura e pela sua compatibilidade com o *Plaxis 2D*, que permite introduzir diretamente os parâmetros α , n , θ_s , θ_r e k_s para realizar análises transientes de infiltração.

Este modelo permite ajustar experimentalmente a curva e usá-la como base para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, essencial em simulações com programas como o *Plaxis 2D*, que requerem a definição da curva de retenção para a análise de infiltração em meios não saturados.

O conhecimento desta curva é, portanto, indispensável para avaliar a resposta dos taludes a fenómenos de infiltração, uma vez que controla tanto a movimentação da água no perfil como o comportamento mecânico do solo, em função das variações da humidade ao longo do tempo.

3.3.2. GRAU DE SATURAÇÃO E COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

O grau de saturação (S_r) é uma das variáveis-chave na caracterização dos solos não saturados, representando a relação entre o volume de água presente nos poros e o volume total de vazios:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad 3.5$$

onde:

- V_w é o volume de água;
- V_v é o volume de vazios (água + ar).

Em solos saturados, $S_r = 100\%$, enquanto em solos completamente secos, $S_r = 0\%$. No intervalo entre esses extremos, o grau de saturação influencia diretamente tanto as propriedades hidráulicas como mecânicas do solo.

Num solo não saturado, a presença de ar nos poros reduz significativamente a condutividade hidráulica, quando comparada com o solo saturado. À medida que o grau de saturação diminui, a continuidade da fase líquida entre os poros é interrompida, dificultando o escoamento da água. A condutividade hidráulica não saturada ($k(\theta)$ ou $k(\psi)$) torna-se, assim, uma função altamente não linear do grau de saturação ou da sucção matricial.

O comportamento hidráulico dos solos não saturados é descrito por dois mecanismos principais (Figura 3.3):

- O movimento capilar, que domina em graus de saturação intermédios, através da tensão superficial da água nos meniscos formados entre partículas;
- O movimento por película ou filme adsorvido, que ocorre em baixos graus de saturação, onde a água se encontra fortemente retida na superfície das partículas (Lu et al., 2004).

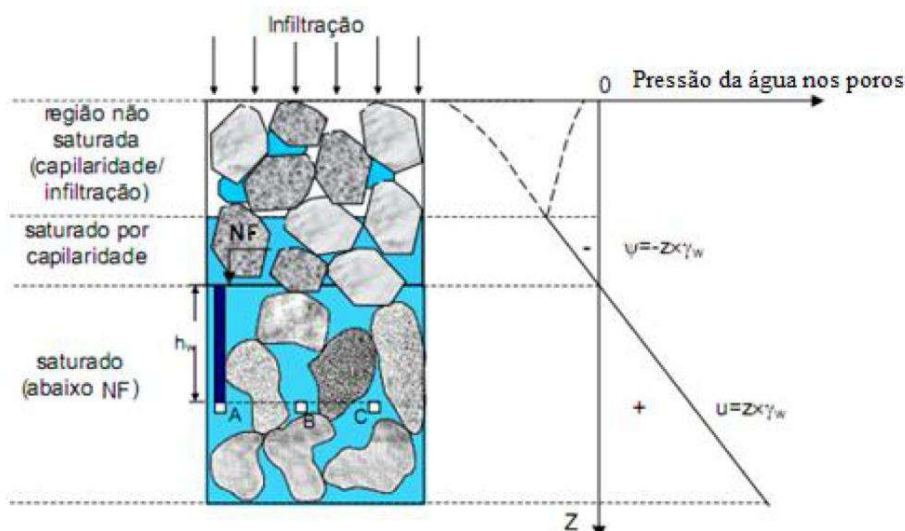


Figura 3.3- Distribuição da pressão de água nos poros (Gerscovich, 2009)

A definição precisa do grau de saturação, juntamente com a curva de retenção de água, permite descrever o comportamento de infiltração e redistribuição da água nos solos. Estes parâmetros são essenciais para a modelação de fenómenos transientes, como a infiltração induzida pela chuva em taludes, uma vez que controlam o avanço da frente de humidade e a forma como a água influencia a sucção e, por consequência, a resistência do solo.

3.3.3. RELAÇÃO ENTRE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E RESISTÊNCIA AO CORTE

Do ponto de vista mecânico, o grau de saturação também influencia o comportamento ao corte dos solos. À medida que S_r aumenta, a sucção matricial diminui, levando à redução da coesão aparente (Fredlund et al., 1993). Em termos práticos, isto significa que a resistência ao corte dos taludes pode diminuir significativamente após eventos de precipitação intensa, mesmo sem saturação completa do solo.

Esta relação entre humidade e resistência justifica a inclusão do grau de saturação nas formulações estendidas do critério de Mohr-Coulomb, como a apresentada anteriormente (Fredlund et al., 1978), onde a variação de sucção é ponderada pelo parâmetro ϕ_b , função da S_r .

Além disso, alguns modelos modernos têm proposto a utilização direta do grau de saturação (ou da saturação efetiva) como variável fundamental para definir a transição entre comportamento seco e saturado, permitindo uma modelação mais realista da degradação da resistência ao longo do tempo.

3.3.4. APLICAÇÃO PRÁTICA EM MODELAÇÃO

Nos programas de elementos finitos como o *Plaxis*, o grau de saturação é um parâmetro central na análise de fluxo não saturado e acoplamento hidromecânico. A definição da função de saturação (S_r vs ψ), geralmente derivada da SWCC, é utilizada para calcular tanto o armazenamento de água no solo como a variação da sucção ao longo do tempo. Isto permite simular com precisão os efeitos da precipitação de diferentes intensidades e durações, e avaliar a sua influência na segurança de taludes.

3.4. EFEITOS DA SUCÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES

A infiltração da água proveniente da precipitação atmosférica é um dos principais fatores responsáveis pela instabilização de taludes naturais, sobretudo em solos finos com baixa permeabilidade e elevada sensibilidade à variação de sucção. A ação da chuva altera as condições hidráulicas internas do solo, modificando o grau de saturação, a sucção matricial e, consequentemente, a resistência ao corte. O entendimento destes mecanismos é essencial para avaliar o risco de movimentos de massa induzidos por chuva e para propor medidas de drenagem e proteção de taludes.

3.4.1. MECANISMOS DE INFILTRAÇÃO E AS SUAS CONSEQUÊNCIAS

Durante um evento de precipitação, a água infiltra-se na superfície do solo e começa a percolar verticalmente através dos poros, seguindo os gradientes de sucção e gravidade. O efeito imediato da infiltração é a redução da sucção matricial na zona superficial, o que pode causar uma diminuição da coesão aparente, reduzindo a resistência do solo à rutura (Rahardjo et al., 2007).

Se a intensidade da chuva for superior à capacidade de infiltração do solo, forma-se uma frente de humidade que avança progressivamente para camadas mais profundas, afetando zonas anteriormente mais estáveis. Este fenómeno é particularmente crítico em solos estratificados, onde camadas de baixa permeabilidade podem provocar acumulação de água e formação de poropressões positivas, criando planos potenciais de rotura.

Além disso, o aumento do teor de água conduz a um aumento da massa do talude e à redução do atrito interno, favorecendo o deslizamento. A perda de sucção não acontece de forma imediata e homogênea, sendo muitas vezes adiada em função da capacidade de retenção do solo e da sua condutividade hidráulica.

3.4.2. ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS NÃO SATURADOS

Em condições naturais, muitos taludes encontram-se estáveis devido à coesão aparente gerada pela sucção matricial. Esta coesão adicional pode ser significativa, principalmente em argilas e siltes parcialmente saturados. No entanto, ao longo de um episódio de chuva intensa e prolongada, a infiltração de água reduz progressivamente esta sucção, diminuindo a resistência ao corte.

Fredlund et al. (2012) referem que a transição de um estado de não saturação para saturação pode levar a variações bruscas no fator de segurança, sendo que os taludes mais inclinados e com menor capacidade drenante são particularmente vulneráveis. Esta variação não é apenas dependente da quantidade de água infiltrada, mas também da velocidade de infiltração, do tipo de solo e da profundidade do nível freático.

A situação agrava-se quando o nível freático sobe devido à recarga hídrica, criando poropressões positivas em zonas anteriormente submetidas a sucção, o que pode conduzir à rutura por redução da tensão efetiva. A este fenómeno associa-se frequentemente a ocorrência de deslizamentos superficiais ou movimentos em massa de pequena profundidade, típicos de encostas em zonas temperadas com solos residuais (Figura 3.4).

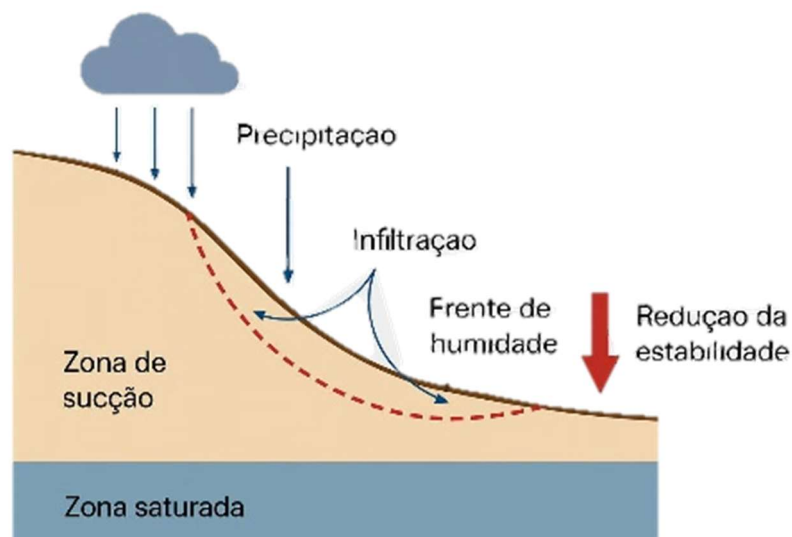


Figura 3.4- Processo de redução de estabilidade através da precipitação

3.4.3. IMPORTÂNCIA DA MODELAÇÃO DA INFILTRAÇÃO

A complexidade destes processos exige a utilização de modelos numéricos acoplados hidromecânicos, que permitam simular a evolução temporal da infiltração e da estabilidade do talude. Programas como o *Plaxis 2D* permitem integrar:

- a curva de retenção de água (SWCC);
- a condutividade hidráulica não saturada;
- os parâmetros mecânicos do solo (c' , ϕ' , ϕ_b);
- e a aplicação de precipitação como condição de contorno variável no tempo.

Com esses dados, é possível prever a propagação da frente de infiltração, as alterações de sucção e o comportamento do fator de segurança ao longo do tempo. Este tipo de análise é fundamental para a avaliação de risco em períodos de chuva intensa e para o dimensionamento de sistemas de drenagem, como valas superficiais, geodrenos ou coberturas protetoras.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve o caso de estudo e metodologia adotada para a análise da influência dos sistemas de drenagem, precipitação, e propriedades do solo que afetam a estabilidade de taludes, com base num perfil geotécnico real e representativo de um troço da nova linha de alta velocidade no Norte de Portugal. A abordagem envolveu a recolha de dados reais, a definição de um perfil-tipo com base em informação fornecida pela empresa GEG, e a respetiva modelação numérica no *software Plaxis 2D*, tendo sido simuladas diferentes intensidades de precipitação e testadas diferentes soluções de drenagem.

4.2. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO

Para a realização das modelações numéricas foi utilizado o *Plaxis 2D*, um *software* de elementos finitos amplamente reconhecido na engenharia geotécnica pela sua capacidade de simular o comportamento mecânico e hidráulico de solos em diversas condições. Desenvolvido especificamente para análises geotécnicas avançadas, este programa permite representar de forma realista tanto a deformabilidade dos solos como a evolução das poropressões ao longo do tempo, sendo especialmente eficaz na modelação de taludes, escavações, fundações e infraestruturas enterradas.

4.2.1. APLICAÇÃO AO PRESENTE CASO

No âmbito do presente trabalho, o *Plaxis 2D* foi utilizado para modelar um perfil real a descrever concretamente na secção 4.3.1 do presente capítulo, com especial enfoque na análise do impacto da precipitação e da aplicação de soluções de drenagem sobre a estabilidade global da estrutura. A geometria modelada corresponde a um talude inclinado, de configuração irregular, composto por quatro camadas de solo com propriedades geotécnicas e hidráulicas distintas. A camada superficial foi considerada como aterro, enquanto as camadas inferiores representam diferentes graus de alteração do granito da Madalena.

Foi também representado um nível freático em contacto com uma das camadas, detetado em campanhas de prospeção *in situ* essenciais para o suporte e desenvolvimento do projeto, de modo a avaliar o efeito da água subterrânea na geração de poropressões e na evolução da estabilidade do talude.

4.2.2. MODELO DE COMPORTAMENTO DO SOLO

Para representar o comportamento mecânico dos solos, foi adotado o modelo de Mohr-Coulomb, amplamente utilizado em análises de estabilidade global. Apesar da sua simplicidade, este modelo fornece uma estimativa adequada das tensões e deformações induzidas pela escavação dos taludes para construção da linha ferroviária e da resistência ao corte em situações onde o objetivo principal é determinar o fator de segurança e identificar os mecanismos potenciais de rotura.

A análise em tensões-deformações foi realizada em regime elasto-plástico, permitindo observar a degradação progressiva da rigidez e resistência do solo à medida que ocorrem deformações crescentes, até atingir um mecanismo de colapso.

4.2.3. ANÁLISE ACOPLADA DE FLUXO

A simulação da infiltração da água da chuva e o seu efeito na estabilidade do talude foi realizada através de uma análise acoplada fluxo-deformação (*Fully Coupled Flow Stress-Strain Analysis*). Este tipo de análise permite modelar simultaneamente:

- o fluxo de água (em regime saturado e não saturado);
- e as deformações resultantes em tensões incluindo variações da poropressão.

Esta abordagem é fundamental quando se pretende estudar o impacto da infiltração na estabilidade, uma vez que a alteração do teor de água afeta diretamente as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao corte dos solos.

4.2.4. MODELO DE FLUXO NÃO SATURADO, CONDIÇÕES HIDRÁULICAS E SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO

Para o comportamento hidráulico dos solos, foi utilizado o modelo Van Genuchten, 1980, que relaciona a sucção com o grau de saturação e, com isso, o teor em água no solo através de parâmetros ajustáveis. Os principais parâmetros considerados incluem:

- Teor em água residual e saturado;
- Parâmetros α , b e c que são parte da proposta de Van Genuchten;
- Permeabilidades saturadas vertical e horizontal.

Esta modelação é essencial para representar a infiltração da água da chuva, a saturação progressiva das camadas superficiais e a conseqüente variação da poropressão e da estabilidade do talude.

O modelo de fluxo utilizado baseia-se nas leis de Darcy para meios porosos e integra a curva de retenção de água do solo usando a exemplo o modelo de Van Genuchten, definido pelos parâmetros seguintes:

Tabela 4.1- Designação dos parâmetros usados no *Plaxis 2D*

Nome no PLAXIS	Designação	Unidades	Descrição
K_r	Modelo hidráulico	<i>m/dia</i>	Seleção do modelo hidráulico (Van Genuchten)
θ_r	Teor em água volumétrico residual	-	Conteúdo de água retido no solo que não consegue ser drenado
g_a	Parâmetro α de Van Genuchten	$1/m$	Parâmetro de ajuste que está relacionado com o valor de entrada de ar
g_n	Parâmetro b de Van Genuchten	-	Parâmetro de ajuste que é a função da taxa de extração de água no solo uma vez que o valor de entrada de ar foi excedido
g_l	Parâmetro c de Van Genuchten (Parâmetro de conectividade entre poros)	-	Parâmetro de ajuste empírico
$K_{sat} (vertical)$	Permeabilidade saturada vertical	<i>m/dia</i>	Permeabilidade vertical do solo em saturação total
$K_{sat} (horizontal)$	Permeabilidade saturada horizontal	<i>m/dia</i>	Permeabilidade horizontal do solo em saturação total

Tal modelo permite representar de forma realista o comportamento hidráulico dos solos parcialmente saturados. Esta modelação é crítica para simular a infiltração da água da chuva, a saturação progressiva das camadas superficiais, e os efeitos associados à subida ou descida do nível freático.

O *Plaxis 2D* permite definir a posição inicial do nível freático de forma explícita, através da atribuição de uma linha de água no domínio do modelo. Esta linha estabelece a fronteira entre as zonas inicialmente saturadas e não saturadas, influenciando diretamente a distribuição das poropressões iniciais. No presente caso, o nível freático foi definido permitindo avaliar as variações das poropressões em função da infiltração e da capacidade de drenagem do sistema.

Antes da aplicação das condições de precipitação, foi realizada uma análise em regime permanente (*steady-state*) para estabelecer as condições hidráulicas iniciais do talude. Esta análise tem como objetivo garantir que o modelo parte de uma distribuição estável de poropressões, compatível com o nível freático definido, com as propriedades hidráulicas dos solos e com o avanço da escavação. O regime permanente é fundamental para evitar desequilíbrios artificiais no modelo, assegurando que os efeitos observados durante a simulação da chuva resultam unicamente da variação da carga hidráulica associada à infiltração.

Após a definição do estado estacionário, procedeu-se à fase de análise transitória, onde foram introduzidas as condições atmosféricas (precipitação) através da definição do caudal variável, ou não e da duração em dias do evento.

4.2.5. CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA

A avaliação da estabilidade do perfil é feita com recurso ao método da redução de resistência (“*Strength Reduction Method*”), que consiste em reduzir progressivamente os parâmetros de resistência ao corte (coesão e ângulo de atrito) até que ocorra a rotura no modelo, permitindo assim calcular o fator de segurança (FS) como o coeficiente de redução correspondente à instabilidade

4.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA NO PLAXIS 2D

4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL-TIPO

O perfil geotécnico utilizado nesta dissertação corresponde a um corte transversal fornecido pela empresa GEG, relativo a uma secção de uma zona de escavação da nova linha ferroviária de alta velocidade Porto-Lisboa. A secção geotécnica inclui quatro materiais distintas, sendo o superior constituída por aterro, sobrejacente a três camadas de granito da Madalena com diferentes graus de alteração.

A caracterização geotécnica baseou-se num vasto conjunto de ensaios baseados em métodos intrusivos. Dentro desta análise, foram realizados ensaios de penetração dinâmica (SPT) executados ao longo do traçado do projeto bem como outros ensaios *in situ* e laboratoriais para que fosse possível obter caracterizações geomecânicas dos estratos que compõem a amostra. Por outro lado, com base nos valores obtidos da prospeção com o número de pancadas (N_{SPT}), foram ainda estimadas propriedades geotécnicas como a coesão (c'), o ângulo de atrito interno (ϕ'), a densidade seca (γ_d), o módulo de deformabilidade (E) e a permeabilidade (k). Sempre que necessário, estas propriedades foram complementadas com valores de referência da literatura para materiais semelhantes.

Como referido, a presença de um nível freático foi também considerada, dado o seu impacto significativo no comportamento do talude sob condições de saturação induzidas por precipitação. A profundidade do nível freático foi também obtida a partir de ensaios *in situ* realizados no âmbito da prospeção geotécnica.

4.3.1.1. Geometria do perfil-tipo

A geometria do perfil-tipo fornecido pela empresa GEG, representativo da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade em Portugal é apresentado na figura seguinte (Figura 4.1). Este perfil apresenta uma largura total de aproximadamente 259,1 m e uma altura máxima de cerca de 47,3 m, sendo composto por quatro camadas geotécnicas com diferentes características e espessuras (Tabela 4.4).

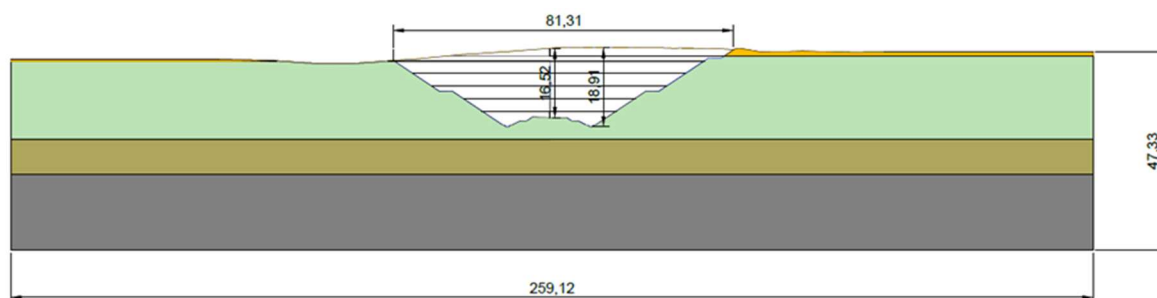


Figura 4.1- Perfil-tipo cotado da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (GEG, adaptado)

A camada superior corresponde a um aterro-aluvião, sobrejacente a três camadas distintas de granito da Madalena, com variações no grau de alteração, como o anteriormente referido. Estas camadas foram mantidas no modelo final, de forma a representar fielmente a estratigrafia observada no local.

A escavação central, apresenta uma largura de cerca de 81,3 m e profundidade máxima de 18,9 m, e possui um papel relevante na redistribuição de tensões e no escoamento superficial e subterrâneo da água da chuva.

4.3.1.2. Simplificação da geometria para a modelação

Apesar da tentativa de representar fielmente o perfil real, foi necessário introduzir pequenas simplificações na base da escavação, tornando-a reta, de forma a garantir a estabilidade e a convergência do modelo numérico no *Plaxis 2D*. A geometria original representativa de uma plataforma ferroviária incluía a inclinação do balastro, sub-balastro e coroamento, que se tornavam difíceis de representar com precisão na malha de elementos finitos sem comprometer a qualidade da malha ou gerar erros de cálculo.

Assim, a base da escavação foi ligeiramente suavizada, mantendo-se a profundidade geral, mas simplificando as transições entre os diferentes patamares e detalhes da base. Esta alteração permitiu melhorar a qualidade da malha e evitar problemas de convergência nas fases de cálculo, sem comprometer significativamente a representatividade do modelo.

Todas as camadas geotécnicas foram mantidas, respeitando as espessuras e a sequência estratigráfica observada no perfil original (Figura 4.2). As simplificações foram consideradas aceitáveis, dado que se concentraram em regiões com menor influência na análise da estabilidade global do talude e na resposta à infiltração.

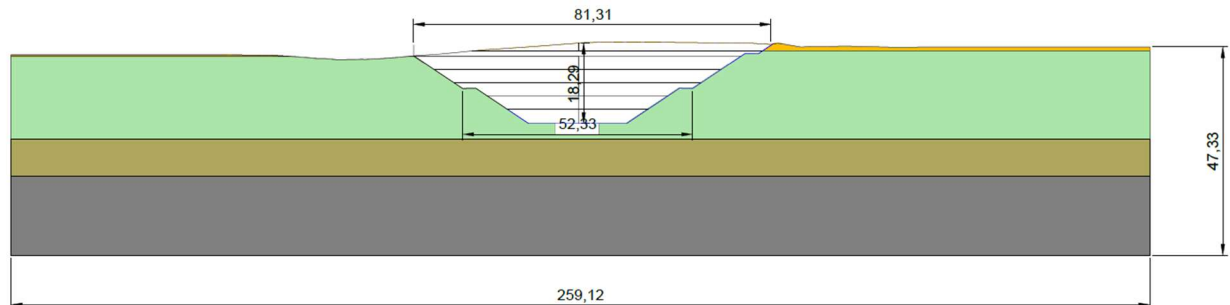


Figura 4.2- Perfil-tipo simplificado da plataforma ferroviária da nova linha de alta velocidade (GEG, adaptado)

4.3.2. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS, CONDIÇÕES DE CONTORNO E NÍVEL FREÁTICO

4.3.2.1. Malha de elementos finitos

Para a discretização do modelo foi utilizada uma malha de elementos finitos tipo “*mesh generation*” automática do *Plaxis 2D*. A malha do modelo é mais refinada nas zonas críticas, nomeadamente na base da escavação e nas interfaces de escavação de forma a melhorar a precisão dos resultados.

Foi adotado um refinamento fino (“*fine*”) com elementos de 15 nós para maior precisão, ajustado localmente sempre que necessário para garantir a qualidade da malha e evitar elementos excessivamente deformados. A geometria simplificada da base da escavação, conforme descrito na secção anterior, contribuiu para a obtenção de uma malha estável e compatível com os requisitos numéricos do programa (Figura 4.3).

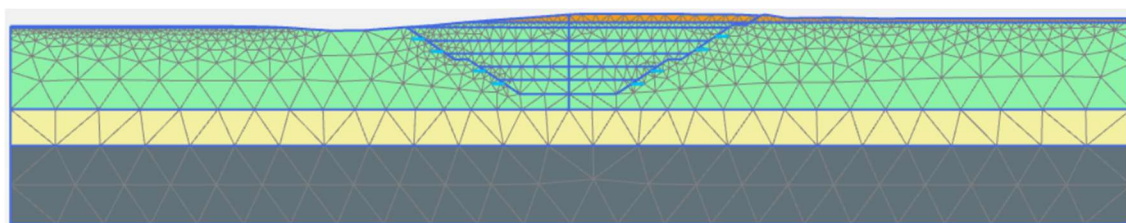


Figura 4.3- Malha de elementos finitos gerada (*Plaxis 2D*)

4.3.2.2. Condições de contorno e nível freático

As condições de contorno adotadas no modelo respeitaram os critérios recomendados pelo manual do *Plaxis 2D*, (Plaxis, 2023). As fronteiras laterais foram consideradas fixas horizontalmente, permitindo apenas movimento vertical, enquanto a base foi fixada em ambas as direções, assumindo-se uma fundação rígida (Figura 4.4).

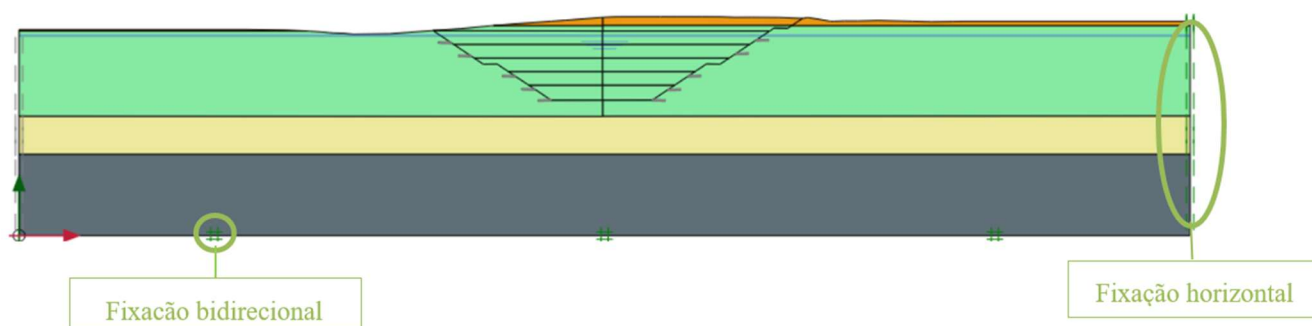


Figura 4.4- Condições de contorno aplicadas ao modelo

O nível freático foi incluído com base na informação fornecida pela GEG (com base na prospeção geotécnica realizada *in situ*), a explorar de seguida, representando uma superfície livre em contacto com um dos tipos de solo. No modelo, foi definida uma profundidade inicial que atravessa a escavação e se estende lateralmente até à periferia do talude. Ao longo do faseamento numérico, o material escavado foi considerado seco (“dry”) para que o nível freático (Figura 4.5) seguisse o comportamento natural, baixando sequencialmente para a base de escavação (Figura 4.6).

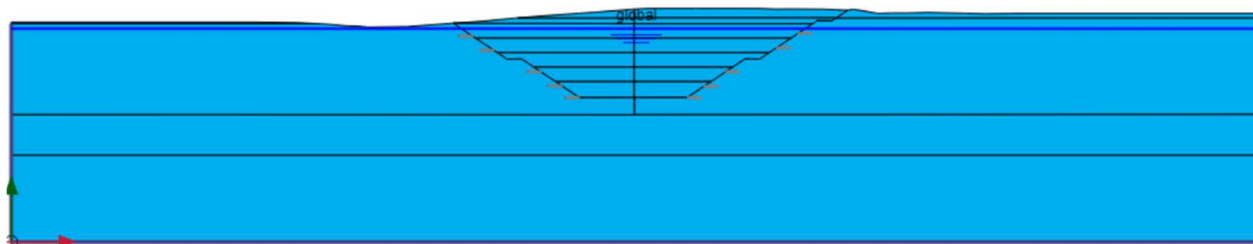


Figura 4.5- Implementação do nível freático no modelo

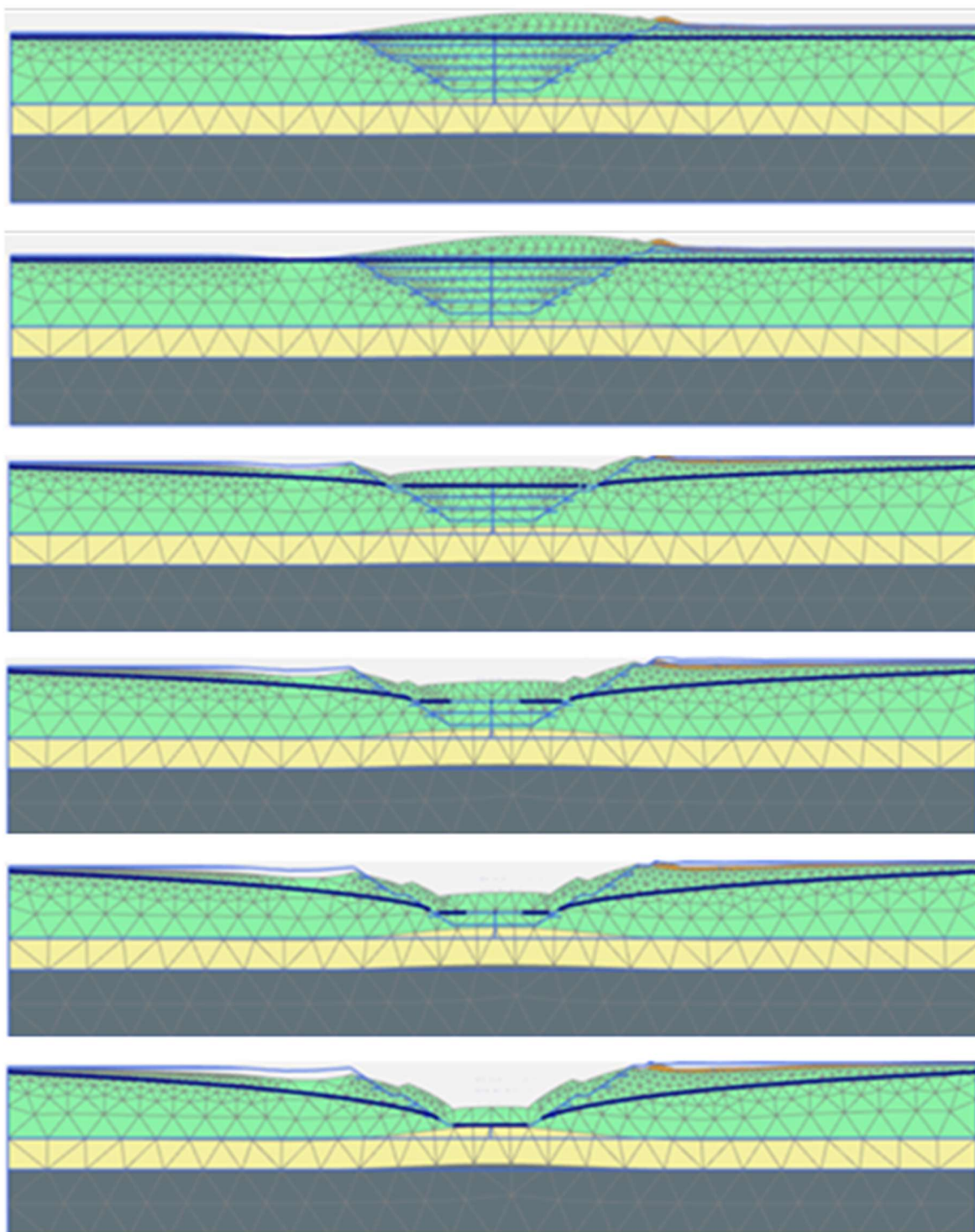


Figura 4.6- Posição do nível freático da primeira à sexta fase de escavação no *Plaxis 2D*

4.3.3. SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE DRENAGEM

A precipitação foi simulada no *Plaxis 2D* (Figura 4.7) através da aplicação de fluxos de infiltração na superfície do maciço, definidos como caudais constantes ou variáveis em m/dia, durante um intervalo de tempo representativo do evento de chuva. Esta abordagem baseia-se na definição de condições atmosféricas disponíveis no *software*, permitindo que a água da chuva entre no solo de forma controlada, de acordo com as propriedades hidráulicas dos materiais e o estado de saturação inicial.

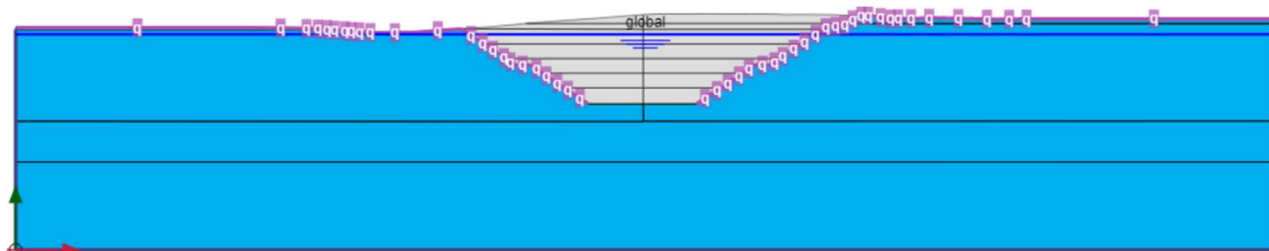


Figura 4.7- Simulação de precipitação na modelação

Esta metodologia é fisicamente plausível e coerente com o comportamento real dos solos parcialmente saturados, uma vez que:

- A água da chuva não penetra de forma instantânea e uniforme em toda a espessura do solo, mas infiltra-se gradualmente, sendo limitada pela permeabilidade do material e pela curva de retenção de água, ou também designada de curva de sucção (neste caso, modelada a partir do modelo de Van Genuchten, 1890);
- A infiltração provoca um aumento progressivo do teor em água, conduzindo ao crescimento das poropressões e à redução das tensões efetivas, com impacto direto na resistência ao corte e, por consequência, na estabilidade do talude, visto que a permeabilidade também cresce com o aumento da saturação;
- A análise acoplada de fluxo-deformação disponível no *Plaxis 2D* permite capturar com rigor estas interações entre a entrada de água, a resposta mecânica dos materiais, a condutividade hidráulica e o desenvolvimento de mecanismos de instabilidade.

A definição do fluxo foi utilizada apenas na superfície superior do modelo. Não foi aplicada infiltração na base da escavação, por se considerar que esta zona é drenada lateralmente por valas técnicas, representadas no perfil real da plataforma ferroviária. Estas valas são concebidas para escoar a água superficial e evitar a acumulação no fundo da escavação, atuando como elementos de drenagem eficazes.

Este tipo de solução é comum em projetos ferroviários e está em conformidade com o previsto na NP EN 1997-2:2010 (Eurocódigo 7 – Parte 2: Projeto geotécnico – Investigação e ensaios de campo) e GR.IT.GEO.011 (Infraestruturas de Portugal 2023), que recomendam a inclusão de sistemas de drenagem superficial e subsuperficial nas zonas escavadas, de forma a garantir a estabilidade e a durabilidade das infraestruturas de transporte.

Assim, a não aplicação de infiltração na base da escavação constitui uma decisão técnica fundamentada, tanto do ponto de vista hidráulico como normativo.

Os sistemas de drenagem utilizados foram apenas os equivalentes a drenos (“*drains*”) com uma cota piezométrica, h em metros igual à cota do seu ponto de implementação e uma inclinação equivalente a

3% (do primeiro ao quarto nível ascendente e no quinto nível descendente) (Figura 4.8). O efeito da sua colocação também foi avaliado com consideração da análise numérica com fluxo acoplado, tendo sempre ao longo do seu alinhamento a mesma carga hidráulica.

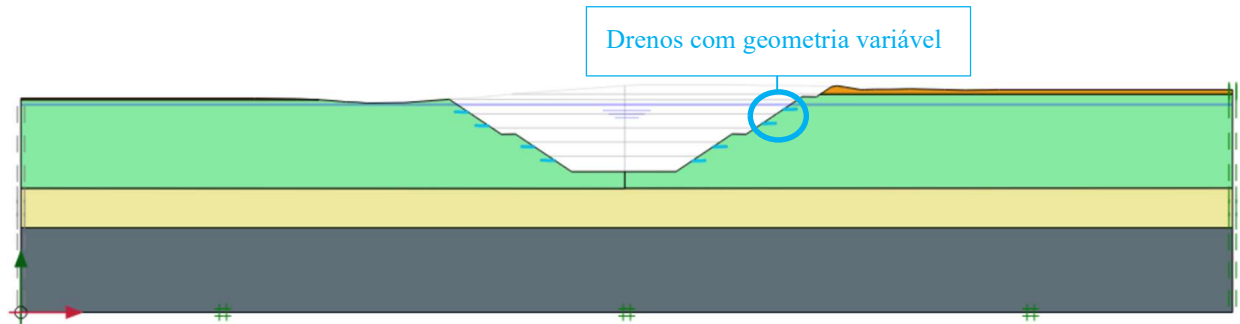


Figura 4.8- Simulação da drenagem (drenos) na modelação

Uma vez que foram testadas diferentes geometrias para os drenos existiu uma lógica para que a execução dos drenos fosse possível e simplificada visto que a perfuradora/cravadora de drenos tem de conseguir executá-los de maneira prática para a melhor otimização como se demonstra pela seguinte figura.

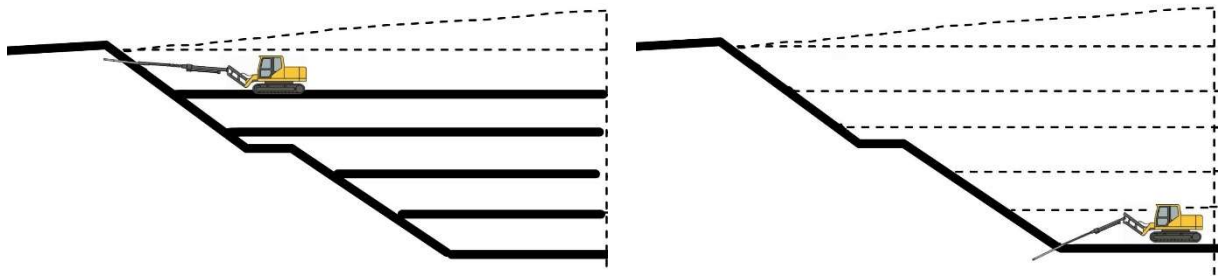


Figura 4.9- Esquema de execução dos drenos

4.3.4. FASEAMENTO CONSTRUTIVO

O modelo foi construído em várias fases, de forma a simular realisticamente o processo construtivo da plataforma ferroviária e a evolução das tensões no interior do talude. O faseamento seguiu a seguinte lógica (Tabela 4.2):

- Fase inicial – Condição inicial de equilíbrio geostático, com o peso próprio dos materiais e as condições de saturação iniciais;
- Fases intermédias – Escavação central, representando a remoção do volume correspondente à plataforma da linha ferroviária;
- Fases adicionais – Aplicação das condições de fronteira definitivas, com ativação da drenagem e/ou infiltração, aplicadas em momentos distintos para avaliar a resposta do talude sob diferentes condições;
- Fase final– Avaliação do fator de segurança.

Tabela 4.2- Identificação das fases modeladas

Fase	Descrição	Descrição de fases adicionais	Tempo (dias)
Inicial	Geração do estado de tensão inicial		5
1	Primeira escavação de 3m		15
2	Segunda escavação de 3m		15
9		Primeiro nível de drenos a 2,75m da superfície	1
3	Terceira escavação de 3m		14
10		Segundo nível de drenos a 5,75m da superfície	1
4	Quarta escavação de 3m		14
5	Quinta escavação de 3m		13
11		Terceiro nível de drenos a 2,75m da plataforma	1
6	Escavação final de 3,29m		13
12		Quarto a quinto nível de drenos a respectivamente 5,75m e 8m da plataforma	1
7		Precipitação	Variável
8	Verificação de segurança		

Este faseamento permitiu avaliar não só o comportamento final do talude sob efeito da infiltração, mas também a sua evolução ao longo do tempo, nomeadamente a redistribuição da poropressão e as possíveis instabilidades progressivas. A duração de cada atividade foi apenas estimada, sendo que para as fases de escavação se levou em conta que a escavação do primeiro volume, com aproximadamente 81 metros de largura e 3 metros de profundidade, em solo comum, poderá demorar aproximadamente 27 dias uteis a ser concluída, considerando o uso de uma escavadora hidráulica de médio porte a operar num turno único de 8 horas diárias. Esta estimativa baseia-se numa produtividade média de $100 \text{ m}^3/\text{h}$. A duração da escavação poderá ser significativamente reduzida mediante o recurso a mais equipamentos, sendo assim considerou-se, hipoteticamente, que serão utilizadas duas escavadoras o que conduzirá a um tempo confortável de escavação de aproximadamente 15 dias que normalmente irão reduzir à medida que a base de escavação diminui. Ainda assim, a escavação dos três últimos patamares poderá ser mais difícil devido à maior compactação e profundidade, e por isso o rendimento ser menor. Todavia, para os efeitos do presente estudo essa consideração não se tomou como condicionante.

Nas seguintes figuras é apresentado o faseamento numérico adotado.

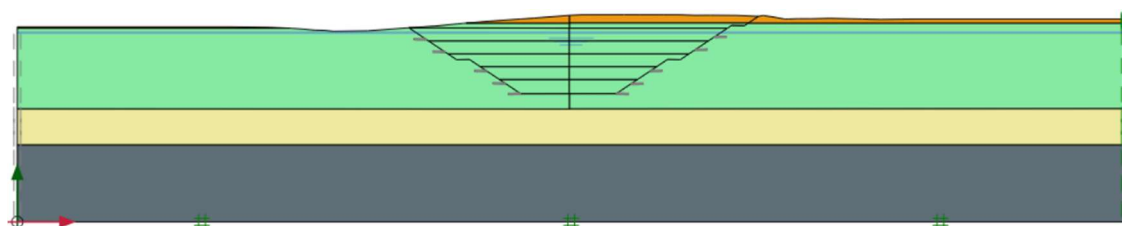


Figura 4.10- Fase inicial

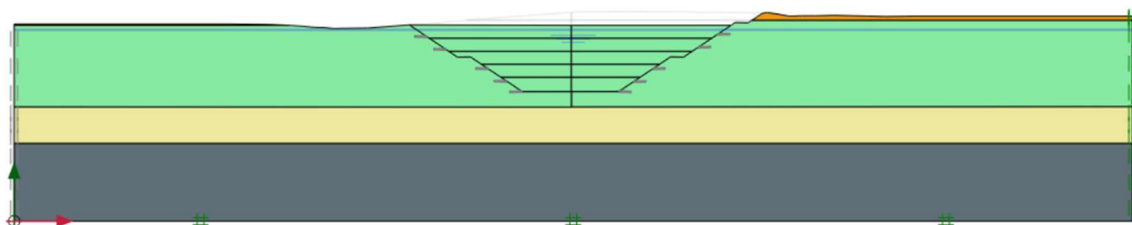


Figura 4.11- Escavação inicial

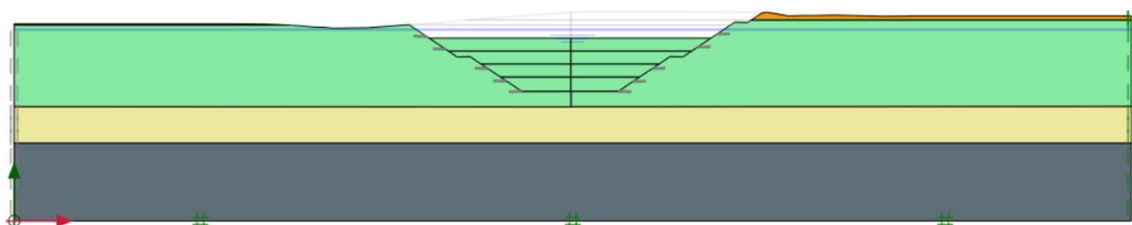


Figura 4.12- Segunda escavação

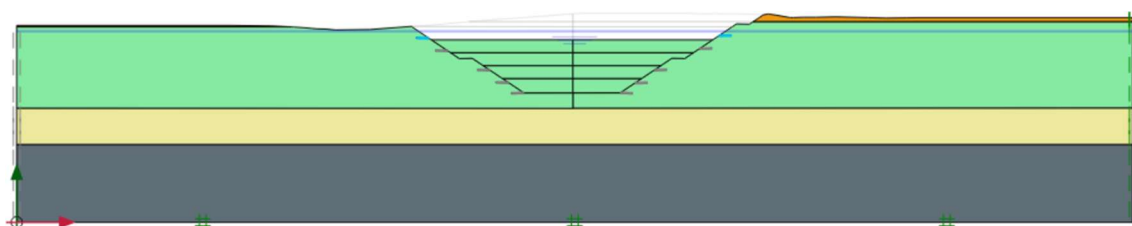


Figura 4.13- Ativação do primeiro nível de drenos

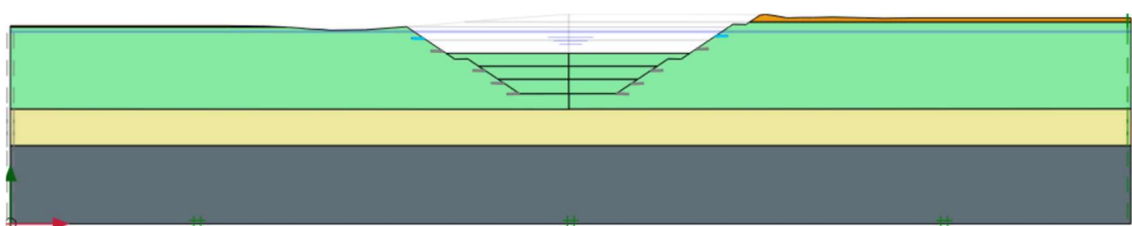


Figura 4.14- Terceira escavação

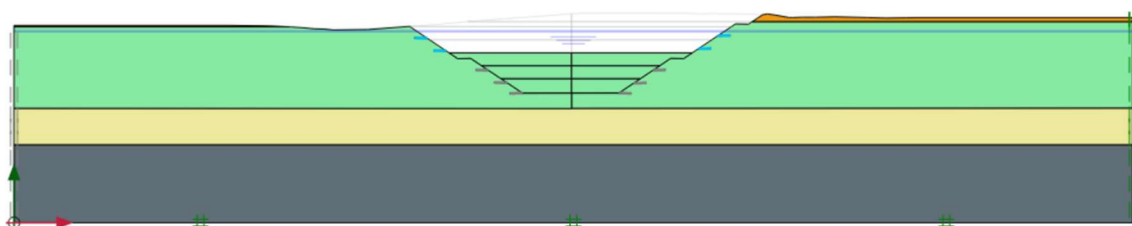


Figura 4.15- Ativação do segundo nível de drenos

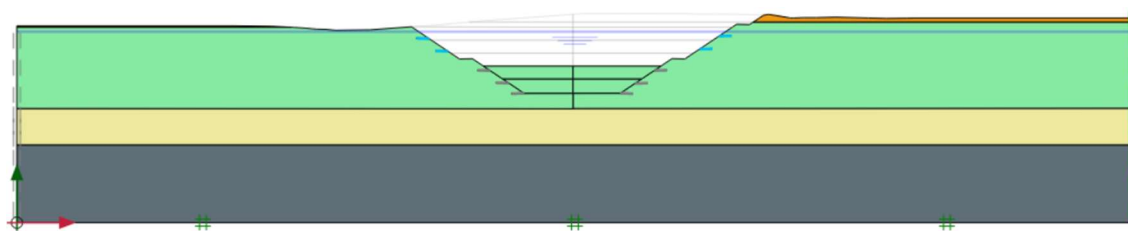


Figura 4.16- Quarta escavação

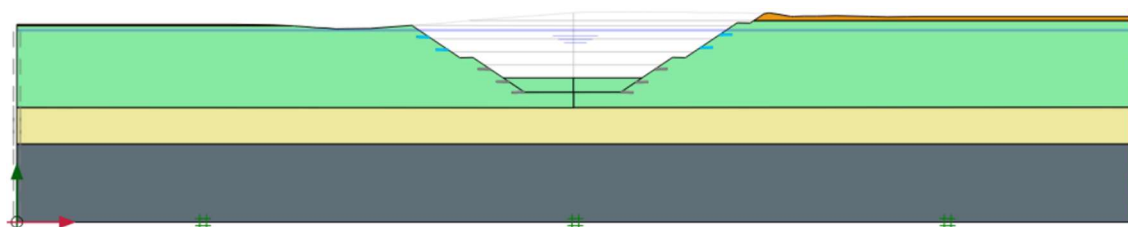


Figura 4.17- Quinta escavação

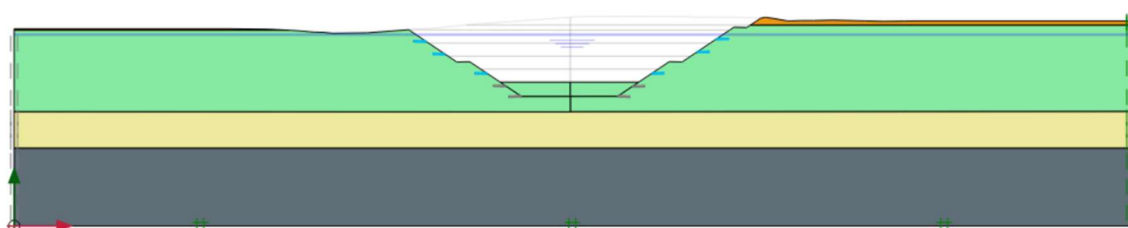


Figura 4.18- Ativação do terceiro nível de drenos

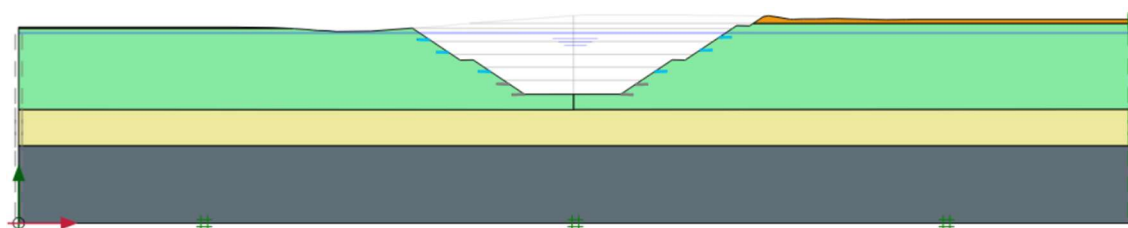


Figura 4.19-Escavação final

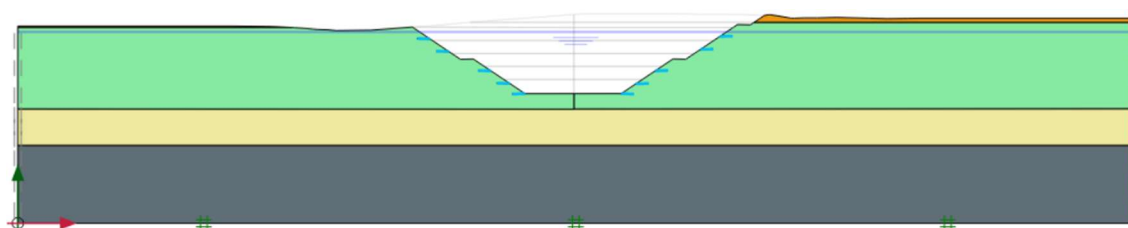


Figura 4.20- Ativação do quarto/quinto nível de drenos

4.4. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

4.4.1. INTRODUÇÃO

Na mecânica dos solos a litologia, a estratigrafia e as condições hidrogeológicas determinam as propriedades de resistência do solo (Terzaghi et al., 1996) e consequentemente do talude. Em maciços rochosos competentes, o principal fator determinante é a estrutura geológica, a disposição e a frequência das superfícies de descontinuidade, o grau de alteração e por fim, em materiais terrosos, sedimentares, em particular granulares, não coesivos ou argila, não sobre consolidados a litologia desempenha um papel predominante (Vallejo, 2002). Assim, é determinante uma adequada caracterização geotécnica do maciço constituinte que por sua vez, é um passo essencial em qualquer estudo da vertente geotécnica pois permite conhecer informações detalhadas sobre as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos solos constituintes.

Esta caracterização pode ser realizada através de ensaios de campo *in situ* e laboratoriais, permitindo determinar parâmetros como a granulometria, a plasticidade, a permeabilidade, a resistência ao corte, a deformabilidade, entre outros. Estes dados são fundamentais para avaliar o comportamento do solo em diferentes condições de carga e variação de estado, garantindo a segurança e estabilidade das estruturas construídas sobre ou dentro do maciço.

No presente caso e no contexto da modelação numérica, uma caracterização geotécnica detalhada é essencial para obter resultados realistas e representativos da realidade. *Softwares* como o *Plaxis 2D* utilizam modelos constitutivos (*Plaxis*, 2023) que requerem parâmetros precisos para definir corretamente o comportamento do solo.

Além disso, a modelação de fluxos de água subterrânea e infiltração de chuva depende diretamente da caracterização da sucção (Fredlund et al., 1993), da permeabilidade e do posicionamento do nível freático. Solos mais permeáveis, como areias, permitem uma infiltração rápida, enquanto solos argilosos tendem a reter água, alterando significativamente as poropressões e, consequentemente, a estabilidade do talude. Se os parâmetros geotécnicos não forem bem definidos, a modelação pode subestimar ou sobrestimar os riscos de instabilidade, levando a decisões inadequadas na fase de projeto.

Outro aspeto crítico na modelação numérica é a distribuição das tensões e deformações ao longo do tempo. A caracterização da resistência ao corte e dos parâmetros de deformabilidade, permite prever deslocamentos do solo e potenciais mecanismos de falha. Sem dados precisos, a modelação pode sugerir soluções incorretas, comprometendo a segurança da estrutura e aumentando os custos de obra devido a intervenções corretivas.

Deste modo, os dados da caracterização geotécnica do maciço constituinte do perfil tipo usado no presente documento foram retirados da prospeção geológica realizada *in situ*. Assim, foi possível proceder a uma pequena descrição das características gerais que constituem o perfil/secção em estudo. Foram realizados, entre outros, o ensaio da penetração (SPT) que resultou em 4 tipos de solo diferentes, cuja caracterização geológica-geotécnica será mais detalhada ao longo deste capítulo.

4.4.2. PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO MACIÇO

Como o referido anteriormente foram identificadas duas unidades de solo que se dividem em quatro estratos diferentes. Esta prospeção foi realizada tendo em conta o local e o ensaio de penetração SPT, que é um dos ensaios geotécnicos mais utilizados para investigação de solos, especialmente em fundações e estudos de estabilidade. Este fornece uma estimativa da resistência do solo à penetração e foi realizado para caracterizar mais assertivamente a envolvente e a real zona de estudo.

Funcionamento de ensaio SPT:

- Execução da sondagem: Um amostrador padrão é cravado no solo no fundo de um furo de sondagem;
- Cravação do amostrador: Utiliza-se um martelo padronizado que cai de uma altura de 76 cm. O amostrador é cravado em três etapas de 15 cm (total de 45 cm). O número de penetrações necessário para cravar os últimos 30 cm é o chamado de índice de resistência à penetração N_{SPT} ;
- O valor de N_{SPT} é a soma das pancadas necessárias para cravar os últimos 30 cm do amostrador no solo. Este valor é usado como indicativo da compacidade (em solos granulares) ou consistência (em solos coesivos).

Este ensaio permite obter informações como a classificação do solo com base na resistência, a profundidade e espessura das camadas do solo, coletar amostras deformadas para identificação visual e tátil e permite também a identificação do nível freático.

Deste modo, através do resultado do ensaio e da caracterização da zona envolvente foi feita uma prospeção adequada que é apresentada na tabela 4.3. Com base nos ensaios *in situ* e laboratoriais foi realizada uma estimativa das propriedades geomecânicas dos materiais.

Tabela 4.3- Propriedades geomecânicas estimadas com base na prospeção geológica-geotécnica

Descrição		N_{SPT}	$\gamma(kN/m^3)$	$\phi'(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$C_u(kPa)$	$E'(MPa)$
Aterro	Aluvião	5-10	16-18	28-32	0	-	6-10
Granito da Madalena	Areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea (solo residual ou saibro)	5-10	16-18	28-32	0-15		6-10
		10-30	18-19	30-35	5-30		10-30
		30-60	19-20	33-38	10-50		30-50
		>60	20-22	35-38	50-100		50-200

Os resultados obtidos nos ensaios consistiram em:

- Aterro com 1.8 metros de espessura;
- Material com N_{SPT} inferior a 30 pancadas com 20 metros de espessura;
- Material com N_{SPT} entre 30-60 pancadas com 8.4 metros de espessura;
- Material com N_{SPT} superior a 60 pancadas com 18 metros de espessura;
- Nível freático a 4 metros de profundidade.

Existem assim, duas unidades de solo uma de aterro formado por aluviões e outras três correspondentes a areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea correspondente ao Granito da Madalena. No caso do material identificado como granito da Madalena foram definidos 3 estratos diferentes correspondentes aos diferentes resultados dos ensaios.

Deste modo, e conciliando a tabela anterior com os resultados do ensaio foi possível parametrizar os solos existentes no modelo numérico. Para reduzir as incertezas associadas aos dados geotécnicos, e em conformidade com os critérios definidos no Eurocódigo 7 (EN 1997-1), optou-se pela consideração de valores característicos para cada parâmetro de referência. Estes valores característicos foram estimados com base nos valores médios obtidos a partir do ensaio e da prospeção, justificando-se esta escolha pela consistência e representatividade dos dados disponíveis, em linha com a metodologia adotada no EC7. Assim, no modelo foram utilizados os seguintes parâmetros.

Tabela 4.4- Parâmetros geotécnicos utilizados no modelo numérico

Descrição		N_{SPT}	$\gamma(kN/m^3)$	$\phi'(^{\circ})$	$c'(kPa)$	ν	$E'(MPa)$	$esp.(m)$
Aterro	Aluvião	5-10	17	30	5	0.3	8	1.8
Granito da Madalena	Areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea (solo residual ou saibro)	10-30	19	33	20	0.3	20	20
		30-60	20	35	30	0.25	40	8.4
		>60	21	37	75	0.2	125	18

O aterro aluvionar corresponde a um solo arenoso-argiloso com baixa compactação e reduzida homogeneidade, o baixo valor para o ensaio realizado indica uma fraca resistência à penetração, sugerindo uma compactação deficiente ou um solo heterogêneo (Viana da Fonseca et al., 2008). A densidade aparente reduzida é compatível com materiais soltos, pouco compactados e possivelmente com presença de materiais finos (Bowles, 1996). Apesar da prospeção geotécnica indicar coesão efetiva nula, foi adotada uma coesão superior de 5kPa, como uma coesão numérica mínima para garantir estabilidade computacional, uma vez que se considerou que mesmo o solo não sendo coesivo na realidade, apresenta muitas vezes uma coesão numérica mínima, a coesão aparente, que pode ser introduzida no modelo para assegurar a estabilidade, sem que isso afete significativamente os resultados. Assim pode garantir-se estabilidade e convergência numérica do modelo (Plaxis, 2023; Brinkgreve et al., 2019).

A unidade geotécnica designada como Granito da Madalena está dividida em três estratos com características físicas e mecânicas distintas, associadas a diferentes profundidades e graus de alteração do granito original. As variações são visíveis nos parâmetros de resistência, rigidez e densidade.

O primeiro estrato representa um solo residual, derivado da alteração intensa do granito. A presença de minerais micáceos, associados à textura fina e à fração silto-argilosa, reduz a rigidez e a resistência global do material. O número de pancadas SPT relativamente baixo reflete um material com resistência média, coerente com a sua origem saprolítica.

O segundo estrato, por sua vez, tem uma evolução no grau de compactação, o aumento de pancadas SPT indica um solo mais denso e consolidado. A coesão e o atrito aumentam, traduzindo um material com menor grau de alteração e maior resistência ao corte. A presença de minerais micáceos ainda se verifica, mas com menor impacto na estrutura global. Este estrato funciona como uma transição entre o solo residual e a rocha fraca.

O último estrato representa uma rocha menos alterada, com características geomecânicas perto do granito original (Marques, 2001). O valor das pancadas SPT indica um material bastante resistente. A rigidez, coesão efetiva e atrito interno elevados atingem valores típicos de materiais rochosos fraturados ou muito compactos, sendo que a estrutura interna é mais coesa.

Pode assim dizer-se que as causas da diferença de resistência entre os estratos podem dever-se a diversos fatores como, o grau de alteração do granito original (Viana da Fonseca et al., 2013); a compactação natural que aumenta com a profundidade, conferindo valores mais elevados de coesão e rigidez nos estratos mais profundos, a textura e a mineralogia em que a presença de minerais moles como as micas influenciam negativamente a resistência dos estratos superiores, enquanto nos níveis mais profundos a estrutura mineral é mais estável e resistente à deformação, e o estado de esforço e pressão de confinamento, o aumento da pressão efetiva com a profundidade melhora o comportamento mecânico (Das, 2010).

Para a modelação do perfil é essencial distinguir e modelar corretamente as unidades geotécnicas e respetivos estratos, de forma a evitar a subestimação ou superestimação da estabilidade do talude e da deformação no solo. (Viana da Fonseca et al., 2002). Além disso, a transição de solo para rocha deve ser cuidadosamente considerada, pois influencia o caminho preferencial da infiltração o comportamento do maciço após eventos de precipitação.

4.4.3. PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Para compreender o comportamento do maciço com a infiltração da água, especialmente em cenários de precipitação intensa, é fundamental considerar os parâmetros hidráulicos do solo, nomeadamente as curvas de retenção de água (ou curvas de sucção) e a permeabilidade não saturada. As curvas de sucção descrevem a relação entre o conteúdo de água no solo e a sucção matricial, fornecendo informação essencial sobre a capacidade do solo em reter ou transmitir a água a diferentes estados de saturação. Já a permeabilidade, expressa a facilidade com que a água se move no interior do solo, sendo fortemente influenciada pela sua estrutura, textura e grau de saturação.

Estes parâmetros são essenciais para a modelação de fenómenos de infiltração, uma vez que permite simular, com maior precisão a resposta do solo à ocorrência de precipitação. A correta caracterização das curvas de sucção e da permeabilidade torna-se indispensável para avaliar a redistribuição da água nos perfis de solo.

4.4.3.1. Curvas de sucção

Como referido anteriormente as curvas de sucção são uma variável essencial quando se trata da influência da água nos solos. Desta maneira é essencial que estejam bem caracterizadas para que os resultados sejam mais fidedignos e próximos da realidade.

Apesar da correta caracterização ser muito importante, em muitas situações práticas, sobretudo em unidades geotécnicas de aterro, não existem dados laboratoriais que permitam caracterizar esta curva. Desta forma torna-se justificável recorrer a curvas padrão, como as curvas de Van Genuchten disponibilizadas no *Plaxis 2D*.

Apesar do aluvião ser caracterizado como um material arenoso-argiloso, devido à sua significativa percentagem de finos, caracterizadores de materiais argilosos, decidiu-se ainda assim, no contexto desta dissertação adotar a curva de Van Genuchten associada a um material arenoso. Esta associação prende-se com o facto de a curva de sucção utilizada no modelo visar representar uma resposta mais conservadora em termos de variação do grau de saturação com a sucção, reduzindo a retenção de água no solo e favorecendo uma resposta mais sensível às variações de precipitação simuladas.

Assim, a utilização de uma curva padrão bem documentada, como a de Van Genuchten para a areia (“sand”), representa uma solução prática e confiável para as análises comparativas. Os parâmetros calibrados para areia pelo *Plaxis 2D* são os seguintes:

- $\theta_r = 0.045$;
- $\theta_s = 0.43$;
- $K_{sat} = 7.13 \text{ (m/dia)}$; (*Plaxis*, 2023).
- $g_a = 14.5 \text{ (1/m)}$;
- $g_n = 2.68$;
- $g_l = 0.5$.

Esta abordagem não só simplifica a implementação e garante a estabilidade numérica na simulação.

Para se obter resultados mais fidedignos, optou-se por utilizar uma curva de sucção real proveniente da tese de doutoramento de Viana Fonseca, 1996, relativa a solos residuais graníticos do Porto, para o primeiro estrato da unidade geológica intitulada Granito da Madalena, a qual é apresentada abaixo.

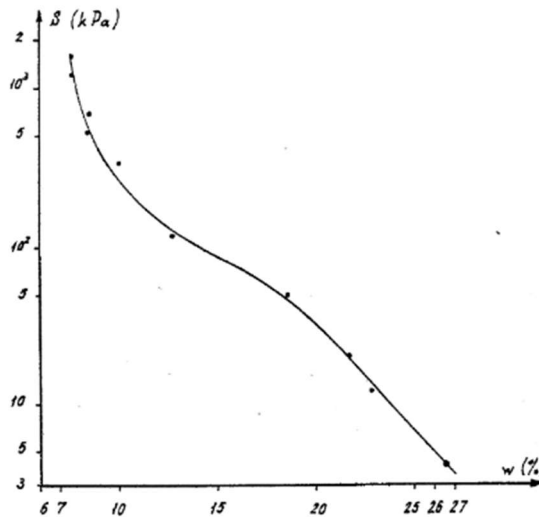


Fig. 6.14 - Curva de sucção (variação das pressões neutras negativas com o teor em água do solo fofo)

QUADRO 6-I - RESUMO DO ENSAIO DE SUCÇÃO

Sucção S (kPa)	0	4	8	12	20	50	120	320	530	690	100	120
Teor em água w (%)	41,3	26,5	24,4	22,8	21,6	18,5	12,7	10,0	8,5	8,4	7,8	7,7

* Nos provetes saturados nota-se um ligeiro empolamento, resultante de uma certa expansibilidade do solo.

** O solo contraiu, diminuindo o índice de vazios.

Figura 4.21- Curva de sucção de Viana da Fonseca, 1996

A escolha desta curva fundamenta-se na sua determinação experimental rigorosa, que permite captar com maior precisão as características hidráulicas do solo estudado, particularmente para o estrato 1, por esta ser realizada para um granito mais alterado. Estudos como os de Fredlund et al., 1993 e de Lu et al., 2004 demonstram que a curva de retenção de água, ao refletir a interação entre os parâmetros físicos do solo (como distribuição granulométrica, índice de vazios e plasticidade) e o comportamento da água sob diferentes condições de sucção, é essencial para a modelação de processos de infiltração, a condutividade que se vai gerando até porque a condição em cada instante corresponde a um nível de sucção o que interfere na estabilidade em solos não saturados.

A curva de sucção utilizada na presente análise foi obtida a partir de ensaios laboratoriais realizados por Viana da Fonseca, resultando num perfil que se ajusta de forma adequada às características do estrato 1 da unidade Granito da Madalena. Essa abordagem experimental permite que os modelos numéricos adotados, como aqueles incorporados no *Plaxis 2D*, reproduzam de maneira mais fiel o comportamento

do solo sob condições reais de campo, proporcionando uma base sólida para a avaliação dos fenómenos de infiltração e a análise da estabilidade de taludes.

Além disso, a utilização de uma curva real reforça a validade dos parâmetros utilizados na modelação, possibilitando uma melhor calibração dos modelos empíricos, como o de Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980), que relaciona a curva de sucção à condutividade hidráulica do solo. Assim, a adoção desta curva não só melhora a precisão dos resultados, mas também contribui para a robustez das simulações e para a consecução de análises geotécnicas mais confiáveis e representativas da realidade.

Para isto, a esta curva real, excluindo o primeiro ponto, por se tratar de um ponto fora da curva, foi realizado o ajuste de Van Genuchten (de 4 parâmetros), utilizando como parâmetros de ajuste a própria curva e os dados da tabela de ajuste realizada por Rawls 1982, para solos com textura arenosa ou franco arenosa. Deste modo procedeu-se com o ajuste, tentando minimizar o erro quadrático entre o teor de humidade real e o teor de humidade calculado pela equação de Van Genuchten, 1980.

$$\theta_w = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + g_a |\psi g_n|)^{g_c}}, \quad \theta_w = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + \alpha |\psi^n|)^m} \quad 4.1$$

Para se proceder com o ajuste foi necessário determinar o teor em água volumétrico, θ_w , da curva real uma vez que esta se encontra definida com base em valores de teor em água, w . Para isso, foi necessário determinar o grau de saturação do solo tendo em conta uma densidade das partículas do solo, G_s , de 2.65 e uma porosidade, n , de 0.30, valores adequados para solos residuais derivados de granitos ou arenitos segundo Craig, 2004. Sendo todas estas relações diretas, foi obtido o teor em água volumétrico.

$$S = \frac{\omega \cdot G_s}{n} \quad 4.2$$

$$\theta_w = \frac{S \cdot \omega \cdot G_s}{S + \omega \cdot G_s} \quad 4.3$$

Com base nos valores reais do teor de água volumétrico, procedeu-se ao cálculo através da equação de Van Genuchten. Os parâmetros de entrada, os valores finais de ajuste e os dados introduzidos no programa encontram-se representados na tabela seguinte.

Tabela 4.5- Parâmetros de ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva obtida por Viana da Fonseca, 1996

	Parâmetros de entrada	Parâmetros de ajuste finais	Parâmetros <i>Plaxis</i> 2D
θ_r	0.16	0.12	$S_{res} \left(\frac{\theta_r}{\theta_s} \right)$
θ_s	0.5	0.54	S_{sat}
α	0.145	0.027	g_a
n	2.68	1.115	g_n
$m \left(1 - \frac{1}{n} \right)$	0.627	0.646	g_l

A curva real e ajustada está representada no gráfico seguinte. Na zona de baixa sucção, a curva ajustada é bastante semelhante à experimental, e o valor é típico de solos com boa retenção inicial. Mais ainda, o modelo acompanha fielmente esta região, refletindo a saturação e o início da drenagem com elevada precisão. Na zona de transição, a curva apresenta uma maior variação, com uma diminuição progressiva do teor de água volumétrico. Esta região é crítica, pois representa a fase em que a água é removida dos poros, mas, mesmo assim, o modelo mantém-se bastante próximo da curva real, sendo que o modelo tende a suavizar as oscilações nos dados experimentais, sem perder, em geral, a precisão do comportamento hidráulico. Na zona de alta sucção a curva estabiliza-se gradualmente. De forma geral o ajuste de Van Genuchten é bastante satisfatório.

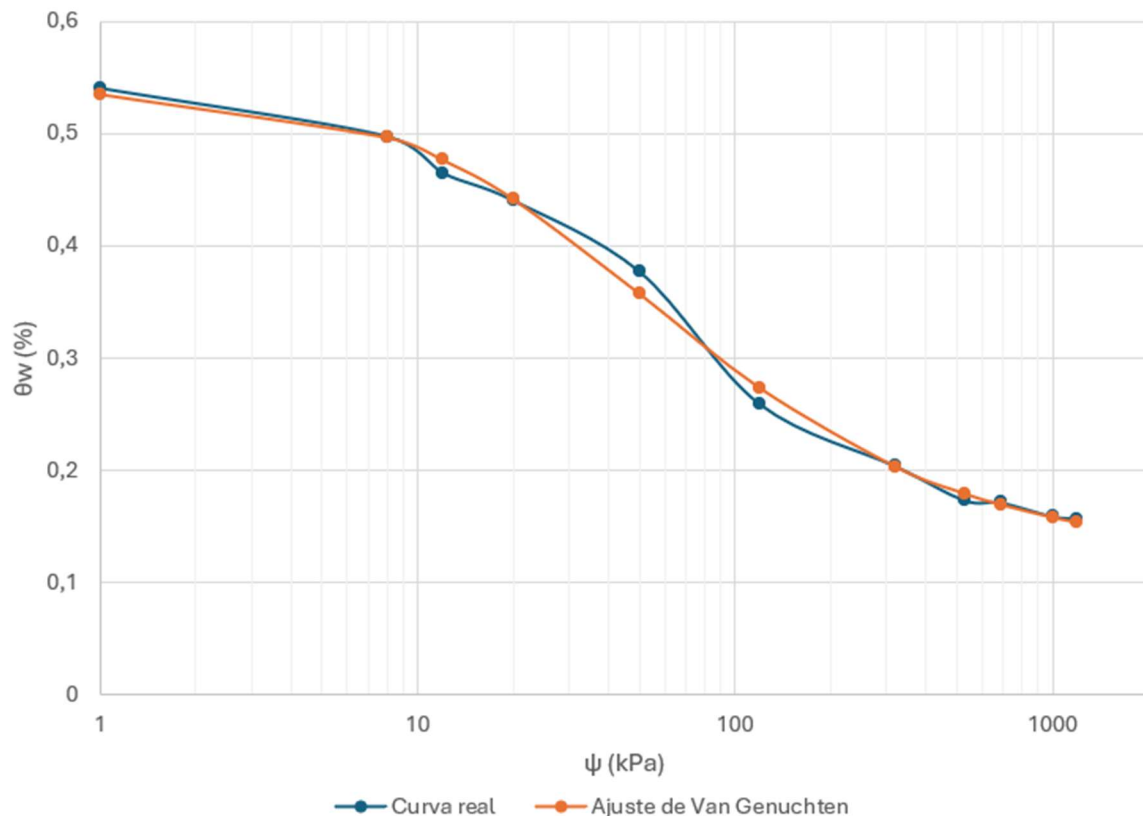


Gráfico 4.1- Ajuste de Van Genuchten, 1980 à curva de sucção de Viana da Fonseca, 1996

Para a parametrização hidromecânica dos materiais da unidade geotécnica correspondente ao “Granito da Madalena”, para os estratos 2 e 3 a seleção adequada da curva de retenção de água é essencial para uma correta representação do comportamento não saturado dos solos em regime transitório, sobretudo em contextos de infiltração induzida por precipitação. De acordo com os dados geotécnicos apresentados anteriormente, o segundo estrato deste maciço corresponde a uma matriz composta por solo residual de transição, de natureza silto-argilosa com presença de materiais micáceos. O terceiro estrato, por sua vez, é constituído por saprolito ou saibro granítico, com um grau de intemperismo mais avançado, maior densidade e módulo de deformabilidade significativamente superior denotando uma maior competência do material e uma transição progressiva para o maciço rochoso.

A curva característica de sucção adotada neste estudo tem como origem a tese de doutoramento de Gomes, 2008, onde se encontra um conjunto de curvas obtidas experimentalmente para solos derivados da alteração de granito, com composições mineralógicas e estruturas semelhantes àsquelas identificadas nesta unidade geotécnica, curvas estas representadas na seguinte figura.

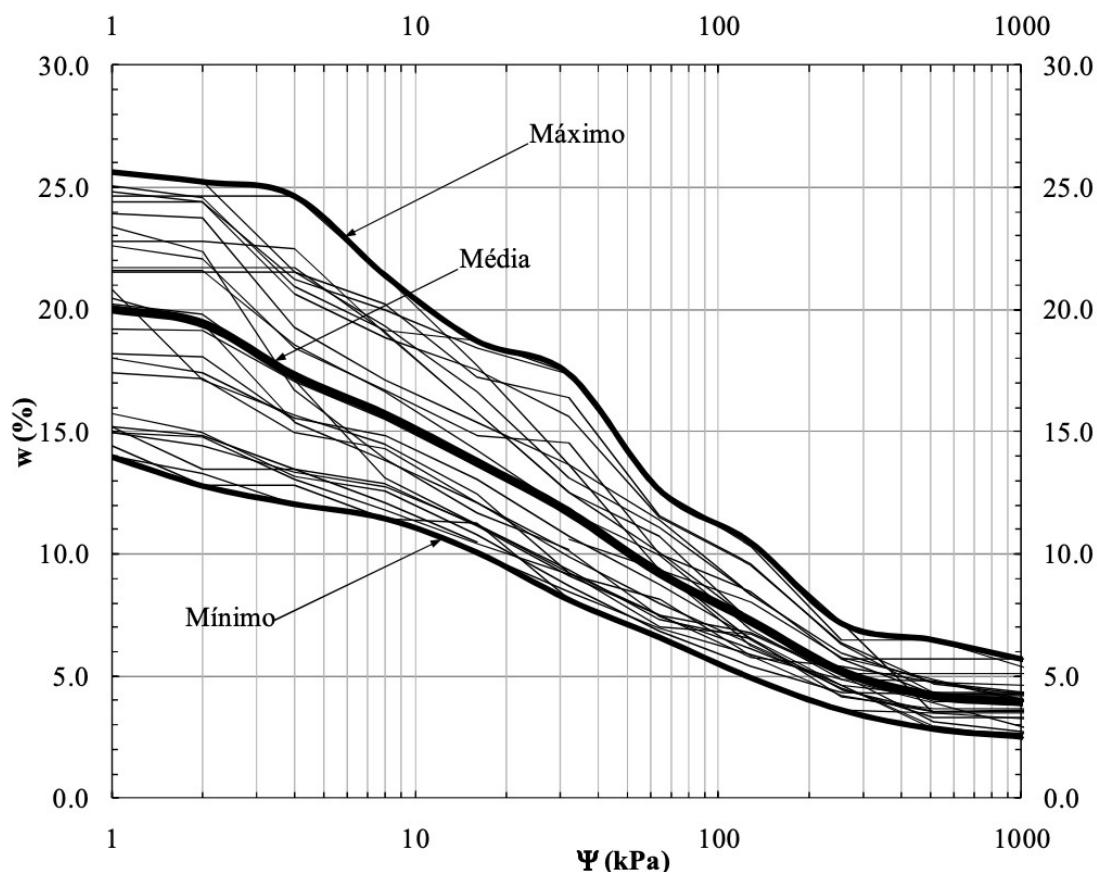


Figura 4.22- Curvas obtidas por Gomes, 2008

Neste contexto, a escolha da curva média para o segundo estrato justifica-se pela sua natureza intermediária entre solo residual e saprolítico, com propriedades mecânicas e hidráulicas relativamente homogêneas e compatíveis com os valores médios obtidos nas amostras estudadas por Gomes, 2008. Esta escolha permite representar de forma adequada o comportamento da retenção de água em situações de transição, sem comprometer a sensibilidade do modelo a variações menores na sucção.

Já para o terceiro estrato, optou-se pela utilização da curva mínima da distribuição experimental. Esta decisão apoia-se na constatação de que os materiais mais competentes, com menor porosidade e maior densificação estrutural (características compatíveis com o saibro granítico) tendem a apresentar capacidades de retenção de água reduzidas, originando curvas de sucção com teores de humidade inferiores para os mesmos valores de sucção matricial. Esta relação é coerente com os resultados laboratoriais apresentados por Gomes, 2008, onde se observa que os materiais mais densos e menos alterados exibem curvas deslocadas para baixo no gráfico apresentado anteriormente. Adicionalmente, a utilização da curva mínima introduz maior realismo no modelo, uma vez que evita a sobrestimação da capacidade de retenção hídrica em materiais mais compactos, o que poderia conduzir a uma subvalorização da infiltração real e dos seus efeitos sobre a estabilidade do talude.

Assim, esta distinção entre curvas de retenção nos diferentes estratos do “Granito da Madalena” permite representar com maior precisão a heterogeneidade hidrogeotécnica vertical do perfil, assegurando uma melhor calibração do modelo.

De modo semelhante ao realizado anteriormente para o primeiro estrato da unidade geotécnica referida, foi feito um ajuste seguindo a equação de Van Genuchten, 1980, utilizando os mesmos parâmetros para

a densidade e porosidade da curva anterior, também estes determinados experimentalmente por Gomes, 2008, cujos parâmetros estão apresentados na seguinte tabela.

Tabela 4.6- Parâmetros de ajuste de Van Genuchten, 1980 às curvas média e mínima obtidas por Gomes, 2008

Parâmetros de entrada		Parâmetros de ajuste finais		Parâmetros <i>Plaxis 2D</i>			
	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 2	Estrato 3		Estrato 2	Estrato 3
θ_r	0.08	0.06	0	0.0047	$S_{res}(\frac{\theta_r}{\theta_s})$	0	0.017
θ_s	0.40	0.28	0.41	0.27	S_{sat}	1	1
α	0.145		0.175	0.0918	g_a	1.78	0.936
n	2.68		1.33	1.407	g_n	1.326	1.407
$m(1-\frac{1}{n})$	0.627		0.246	0.289	g_l	0.5	0.5

Os dois gráficos que se seguem comparam as curvas de sucção obtidas experimentalmente e como ajuste teórico do modelo de Van Genuchten, 1980.

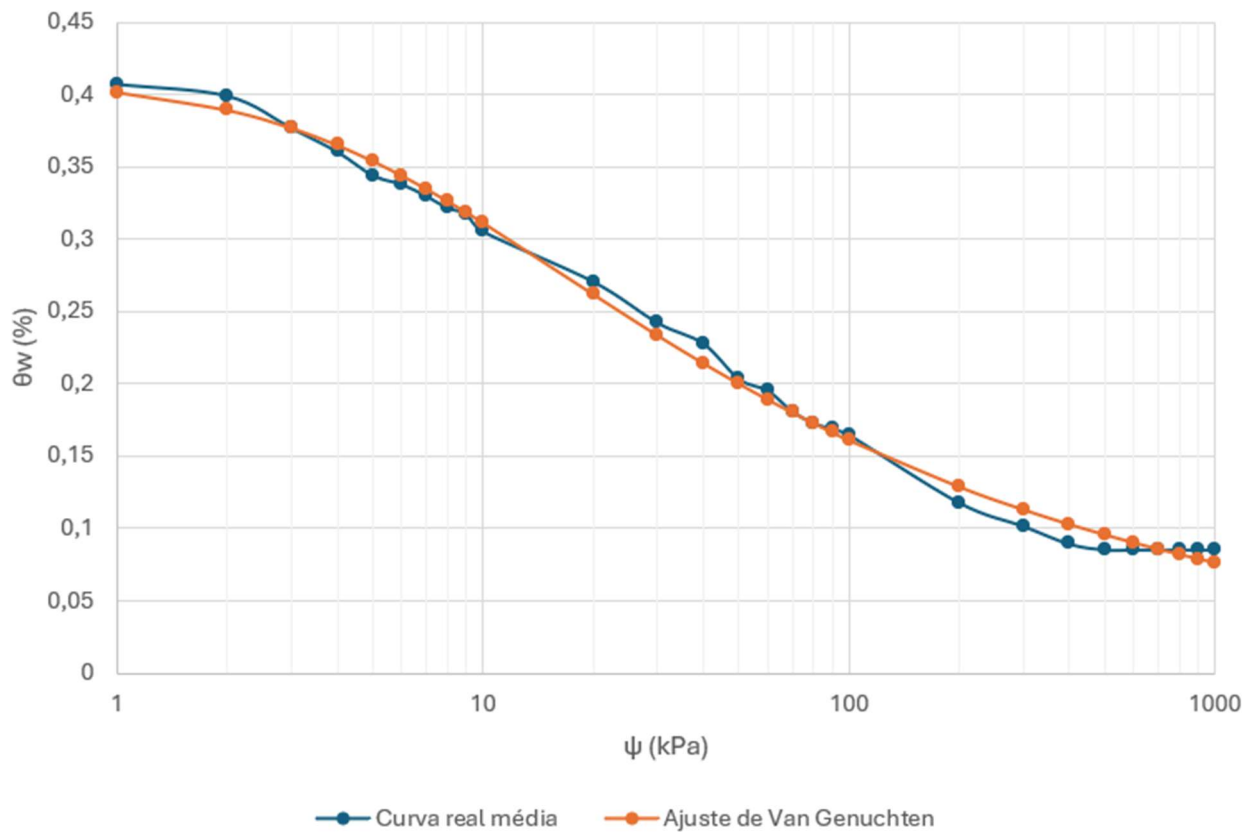


Gráfico 4.2- juste de Van Genuchten, 1980 à curva média obtida por Gomes, 2008

Neste gráfico é apresentada a comparação entre a curva de sucção média obtida experimentalmente por Gomes, 2008, e o ajuste referido. Observa-se que o ajuste acompanha muito bem a tendência geral da curva experimental, ao longo de toda a faixa de sucção. Na zona de baixa sucção (entre 1 e 10 kPa),

onde o solo se encontra perto da saturação, o modelo ajusta-se de forma muito próxima à realidade, com pequenas diferenças pontuais. À medida que a sucção aumenta, na zona de transição, a curva real apresenta ligeiras oscilações que o modelo de Van Genuchten tende a atenuar, como o esperado num modelo teórico contínuo. Ainda assim, a concordância é bastante satisfatória. Na zona de alta sucção, onde o solo se encontra progressivamente mais seco, o modelo continua a reproduzir bem a tendência da curva.

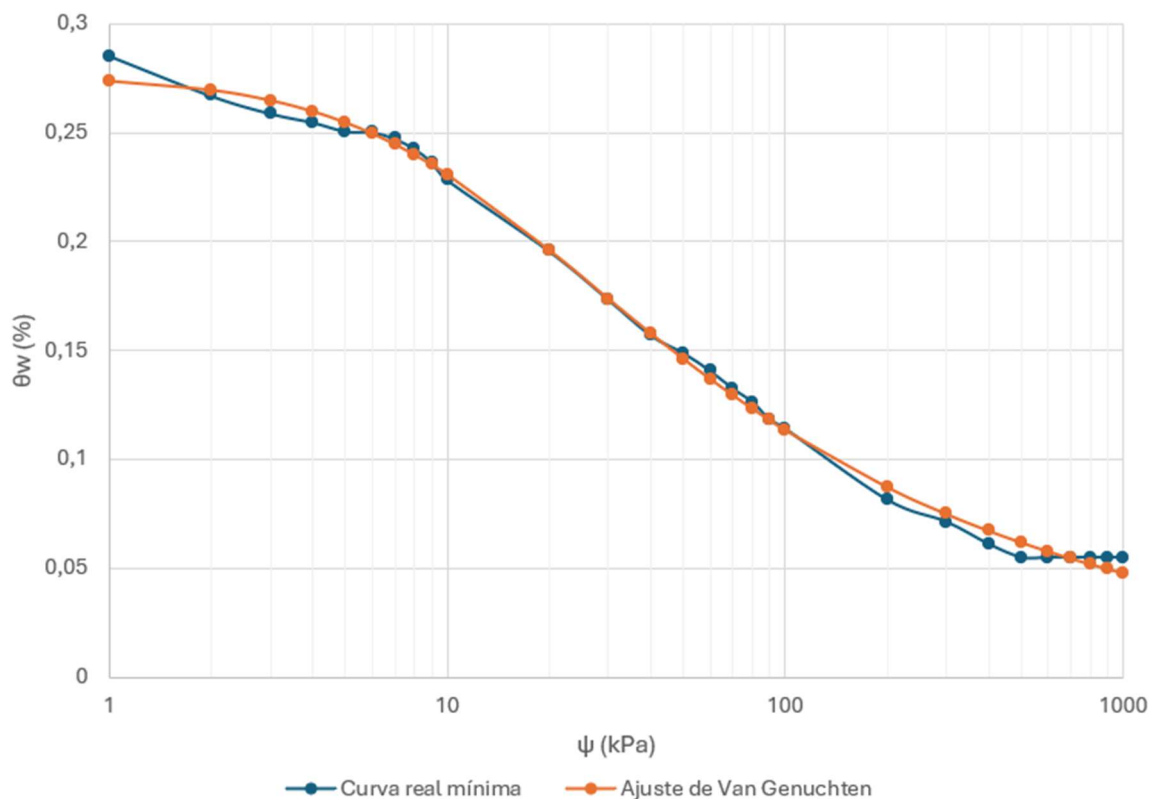


Gráfico 4.3- juste de Van Genuchten, 1980 à curva mínima de Gomes, 2008

Já neste gráfico a comparação é feita entre a curva real mínima, a curva de menor retenção entre as amostras analisadas por Gomes, 2008, e o seu respetivo ajuste. Neste caso, embora o modelo continue a apresentar um bom desempenho geral, observam-se algumas diferenças ligeiramente mais pronunciadas nas extremidades da curva. Na zona de baixa sucção, o modelo tende a subestimar ligeiramente o teor em água volumétrico real, o que pode estar associado à resposta hidráulica de solos menos porosos ou mais compactos sobre pequenas pressões. No intervalo de transição o ajuste é novamente bastante satisfatório, com o modelo a acompanhar bem a curva real. Na faixa de alta sucção, nota-se uma discreta subestimação do teor de água residual por parte do modelo. No entanto, estas diferenças continuam a ser pequenas e não comprometem significativamente a fidelidade do ajuste.

Pode assim, dizer-se que o modelo de Van Genuchten, 1980, é adequado para representar as curvas de sucção obtidas experimentalmente. O ajuste é particularmente bom na zona de transição, crucial para a caracterização hidráulica de solos não saturados, e apenas pequenas discrepâncias surgem nas extremidades das curvas, o que é esperado em dados reais, visto que os modelos teóricos tendem suavizar variações locais que são típicas de dados experimentais.

4.4.3.2. Permeabilidade

A permeabilidade é uma das propriedades hidráulicas mais relevantes em geotecnia, uma vez que controla a capacidade de escoamento da água no interior do solo. Trata-se de um parâmetro que influencia diretamente processos como a drenagem, a variação do teor de humidade e, de forma crítica, a estabilidade de taludes sujeitos a infiltração de água (Fredlund et al., 1993).

Em termos físicos, a permeabilidade está associada à facilidade com que a água se move através dos poros interconectados do solo, sendo condicionada por vários fatores, como a granulometria, a estrutura interna, a porosidade, o grau de saturação e a viscosidade da água (Terzaghi et al., 1996). Solos arenosos, com estrutura mais aberta e partículas maiores, tendem a apresentar maior permeabilidade do que solos argilosos, nos quais os poros são menores e a movimentação da água ocorre de forma mais lenta.

A avaliação da permeabilidade é essencial em simulações hidrogeotécnicas, sobretudo em condições não saturadas, onde o comportamento do solo difere significativamente do regime saturado. Nesses casos, a permeabilidade não é constante, mas varia em função da saturação ou do teor de humidade, exigindo o uso de modelos não lineares para descrever essa relação.

Uma das abordagens mais utilizadas para representar o comportamento hidráulico de solos não saturados é, mais uma vez o modelo de Van Genuchten (1980), o qual estabelece uma relação entre a pressão capilar e o conteúdo de água volumétrico, permitindo calcular a condutividade hidráulica não saturada a partir da saturação relativa. Este modelo é expresso pela equação:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha|\psi|)^n]^{-m} \quad 4.5$$

onde S_e é a saturação efetiva, θ é o teor de humidade volumétrico, θ_r e θ_s são, respetivamente, o teor de humidade residual e à saturação, ψ é a sucção e, α , n e m são parâmetros empíricos do solo (Van Genuchten, 1980), como referido anteriormente na expressão de teor em água volumétrico, θ_w .

Com base nesta relação, Van Genuchten propôs ainda uma equação para a condutividade hidráulica relativa, expressa por:

$$k(\theta) = k_s \cdot S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad 4.6$$

em que $k(\theta)$ é a condutividade hidráulica não saturada e k_s é a condutividade hidráulica saturada.

Este modelo é amplamente utilizado em *softwares* de elementos finitos como o *Plaxis 2D*, permitindo simular o comportamento hidráulico dos solos durante fenómenos de infiltração, como a precipitação (Plaxis, 2023). A variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo influencia diretamente o tempo de resposta do solo à infiltração e, por consequência, a estabilidade do talude, uma vez que a água infiltrada pode reduzir a sucção matricial, aumentar a poropressão e diminuir as tensões efetivas (Fredlund et al., 1993).

No âmbito da presente dissertação, a equação de Van Genuchten foi utilizada para caracterizar o comportamento não saturado dos diferentes solos do talude modelado, sendo essencial para a simulação do escoamento de água no interior do maciço, em cenários com precipitação de diferentes intensidades.

Como referido anteriormente, a equação de Van Genuchten foi utilizada para modelar a curva de retenção de água nos solos. Esta equação permite também estimar a permeabilidade relativa, k_{rel} , estabelecendo uma relação entre a saturação e a sucção do solo, essencial para a caracterização do escoamento em condições não saturadas.

4.4.3.3. Relação entre permeabilidade relativa e permeabilidade

A permeabilidade relativa é uma função da saturação do solo e da permeabilidade real e é usada para modificar a permeabilidade do solo em função da sua saturação. O valor da permeabilidade relativa varia de 0 (totalmente não saturado) a 1 (totalmente saturado). Para solo saturado $k_{rel} = 1$, para solo não saturado, a permeabilidade relativa diminui à medida que a saturação diminui.

$$k_{rel} = \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^n [1 + (\alpha \cdot \psi)^m]^{-n} \quad 4.7$$

A permeabilidade do solo em qualquer ponto do perfil não saturado pode ser expressa como o produto entre a permeabilidade saturada, K_s , e a permeabilidade relativa, K_{rel} , que depende da saturação do solo e da pressão de sucção no momento.

$$K_x = K_s \cdot k_{rel} \quad 4.8$$

Assim, no *Plaxis 2D*, ao introduzir a equação de Van Genuchten, os respetivos parâmetros determinam de que forma a permeabilidade relativa, k_{rel} , varia em função da saturação e da sucção. Quando são também definidos manualmente os valores de K_x e K_y , o modelo consegue calcular a permeabilidade efetiva em cada ponto, tendo em conta o grau de saturação do solo, as condições de sucção e as características do material.

Optou-se por definir no modelo a permeabilidade do solo nas duas direções, considerando que os solos são isotrópicos quanto à permeabilidade para simplificação do modelo, o que nos solos residuais isotrópicos de granito é muito razoável por ser uma rocha ígnea, uma vez que esta opção reduz a complexidade dos dados de entrada, simplifica as equações de fluxo usadas pelo programa, torna o comportamento hidrodinâmico mais previsível, culminando numa modelação mais rápida e estável, sem comprometer a fidelidade do comportamento global, uma vez que, os solos em causa não apresentam evidência significativa de anisotropia hidráulica.

Para a classificação desta permeabilidade, considerou-se para a camada de aterro a permeabilidade natural de solos areno-argilosos, e para os seguintes estratos referentes à unidade geológica, Granito da Madalena, usou-se propriedades da caracterização de um solo saprolítico de granito no Porto, realizada por identificação das fases modeladas (Viana Fonseca, 2003). Para isto foram adotados graus de alteração para as diferentes camadas, tendo em conta os resultados dos ensaios e a estratigrafia, combinada com a seguinte tabela, apresentada por Viana da Fonseca, 2003.

Tabela 4.7- Permeabilidade estimadas para um solo saprolítico do Porto, Viana da Fonseca., 2003

Classe de alteração das rochas (W_i de ISRM, 1981)	Permeabilidade (m/s)	
	Referência	Resultados expectados
Rocha decomposta-solo sem estrutura relíquia (W_6)	Baixo	$\approx 10^{-7}$
Rocha completamente alterada- solo saprolítico (W_5)	Médio	$10^{-6} - 10^{-5}$
Rocha altamente alterada (W_4) e fraturada ($F_4 - F_5$)	Alto a médio	$10^{-5} - 10^{-4}$
Rocha moderadamente alterada (W_3) e fraturada ($F_3 - F_4$)	Médio a alto	$10^{-5} - 10^{-6}$
Rocha levemente alterada (W_2)	Médio	$10^{-6} - 10^{-7}$

A junção de todos estes fatores, resultou na caracterização da permeabilidade de cada estrato representado na tabela seguinte:

Tabela 4.8- Permeabilidade adotada no modelo

Descrição		N_{SPT}	Grau de alteração W_i	$K_x = K_y$ (m/s)	$K_x = K_y$ (m/dia)
Aterro	Aluvião	5-10	-	10^{-3}	86.4
Granito da Madalena	Areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea (solo residual ou saibro)	10-30	W_5	10^{-5}	0.864
		30-60	W_4	10^{-5}	0.864
		>60	W_3	10^{-6}	0.0864

Estes valores foram introduzidos no *Plaxis 2D* como parâmetros de entrada para o regime de fluxo em meio não saturado, influenciando a forma como a água da chuva se difunde no interior do talude, bem como o tempo de resposta de cada material à infiltração. Assim, os solos mais permeáveis (aterro) reagem rapidamente à precipitação, com rápida perda de sucção e maior risco de instabilidade superficial, enquanto os solos residuais derivados do granito, com menor condutividade, funcionam como barreiras ao escoamento vertical, podendo originar acumulação de água e poropressão positiva nas camadas superiores.

4.5. RESUMO DO PLANO DE SIMULAÇÕES

No âmbito da presente dissertação, foi desenvolvido um conjunto de simulações, com o objetivo de analisar o comportamento do perfil-tipo sujeito a diferentes cenários de drenagem, precipitação e parâmetros dos materiais constituintes do maciço.

As simulações estão organizadas em 4 grupos.

4.5.1. CENÁRIO BASE

Este grupo de simulações corresponde a uma primeira avaliação dos efeitos da escavação e da infiltração. Sendo considerados dois sub-cenários:

- Escavação faseada;
- Escavação faseada com infiltração (infiltração constante de 0.020 m/dia durante dois dias após a finalização da escavação, simulando um evento de precipitação moderada).

4.5.2. CENÁRIO 1-AVALIAÇÃO DO EFEITO DA GEOMETRIA DA DRENAGEM

Tendo com fundação o cenário base, este cenário corresponde à avaliação dos efeitos da presença de drenagem e da importância da geometria da mesma.

- Escavação faseada com drenagem (introdução de drenos horizontais de 3 metros dispostos em 4 níveis ao longo da profundidade de cada talude) (Figura 4.23);
- Escavação faseada com drenagem e infiltração (combinação dos drenos de 3 metros dispostos em 4 níveis com a infiltração constante de 0.020 m/dia durante dois dias após a escavação e colocação dos drenos).

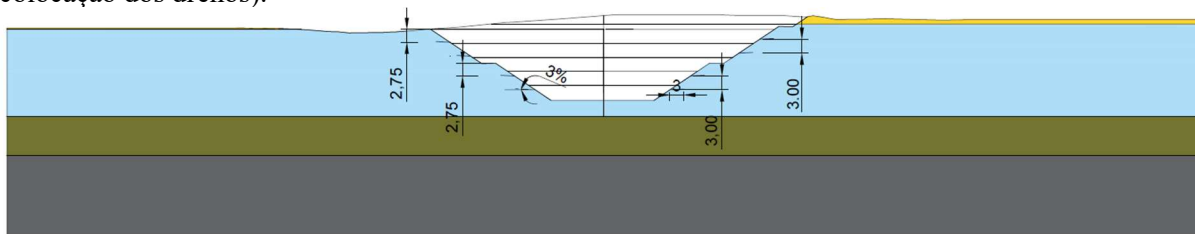


Figura 4.23- Representação dos drenos de 3 metros em 4 níveis

- Escavação faseada com drenagem (introdução de drenos horizontais de 3 metros dispostos em 5 níveis ao longo da profundidade de cada talude) (Figura 4.24);
- Escavação faseada com drenagem e infiltração (combinação dos drenos de 3m dispostos em 5 níveis com a infiltração constante de 0.020 m/dia durante dois dias após a escavação e colocação dos drenos).

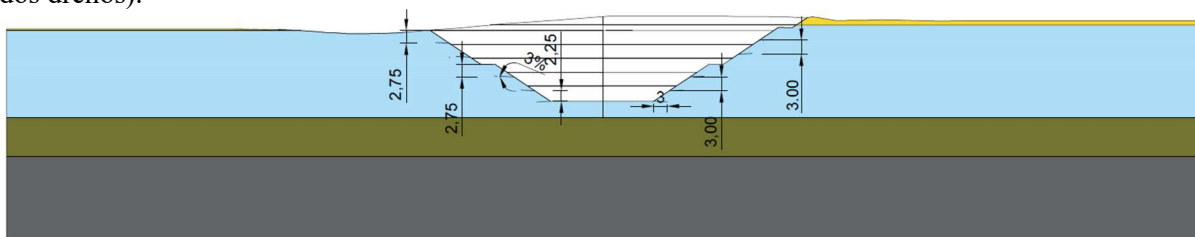


Figura 4.24- Representação dos drenos de 3 metros em 5 níveis

- Escavação faseada com drenagem (introdução de drenos horizontais de 6 metros dispostos em 4 níveis ao longo da profundidade de cada talude) (Figura 4.25);
- Escavação faseada com drenagem e infiltração (combinação dos drenos de 6 metros dispostos em 4 níveis com a infiltração constante de 0.020 m/dia durante dois dias após a escavação e colocação dos drenos).

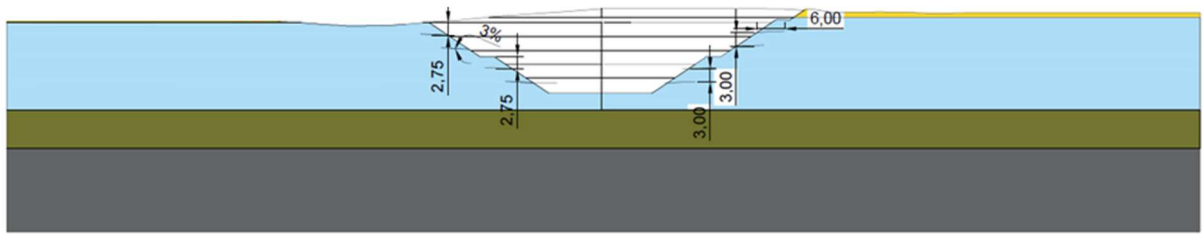


Figura 4.25- Representação dos drenos de 6 metros em 4 níveis

- Escavação faseada com drenagem (introdução de drenos horizontais de 6 metros dispostos em 5 níveis ao longo da profundidade de cada talude) (Figura 4.26);
- Escavação faseada com drenagem e infiltração (combinação dos drenos de 6 metros dispostos em 5 níveis com a infiltração constante de 0.020 m/dia durante dois dias após a escavação e colocação dos drenos).

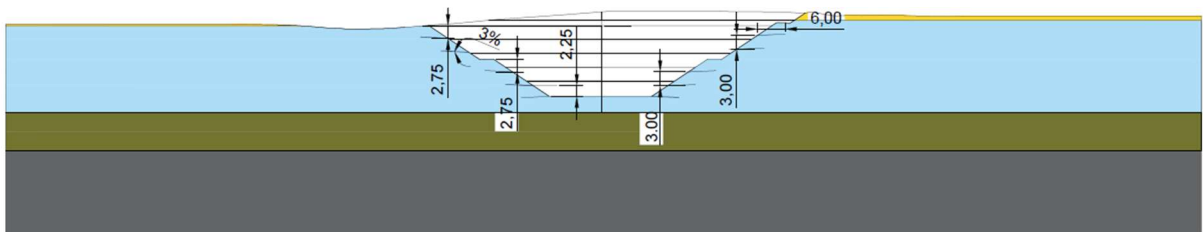


Figura 4.26- Representação dos drenos de 6 metros em 5 níveis

4.5.3. CENÁRIO 2-VARIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO

Este cenário tem como objetivo perceber a influência da precipitação no modelo (introduzida como infiltração) ao nível da estabilidade global, bem como verificar qual a condição mais favorável para uma atuação mais eficaz dos diferentes cenários de drenagem simulados.

Assim, este cenário comporta todas as simulações que envolvem infiltração do cenário base e do cenário 1, estando ainda divididos em dois casos de infiltração.

4.5.3.1. Cenário 2.1-Infiltração mensal

Este cenário corresponde à infiltração mensal do mês de janeiro de 2025 na estação meteorológica de Viana do Castelo/ Chafé, estação número 1200551 na designação do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), que forneceu toda a informação relativamente aos dados reais deste cenário. Na seguinte tabela estão representados os valores da infiltração real usada no modelo com uma duração de 31 dias.

Tabela 4.9- Dados da precipitação mensal de janeiro de 2025 (IPMA)

Ano	Mês	Dia	Quantidade de precipitação (mm/dia)
2025	1	1	0
2025	1	2	0
2025	1	3	0
2025	1	4	0
2025	1	5	43,3
2025	1	6	3,1
2025	1	7	21
2025	1	8	11,5
2025	1	9	1,8
2025	1	10	7,7
2025	1	11	0,8
2025	1	12	0
2025	1	13	0,1
2025	1	14	0
2025	1	15	0,1
2025	1	16	0
2025	1	17	0
2025	1	18	0
2025	1	19	13,7
2025	1	20	9,3
2025	1	21	12,4
2025	1	22	18,3
2025	1	23	0
2025	1	24	23,6
2025	1	25	2,8
2025	1	26	22,8
2025	1	27	7,2
2025	1	28	2,6
2025	1	29	14,4
2025	1	30	0
2025	1	31	0

Sendo assim simularam-se as seguintes situações usando a precipitação real

- Faseamento da escavação e infiltração variável (31 dias) após o fim da escavação;
- Faseamento da escavação com colocação de drenos de 3 e 6 metros em 4 e 5 níveis com posterior infiltração variável;

4.5.3.2. Cenário 2.2-Infiltração máxima diária

Este cenário, corresponde à máxima infiltração diária já registada na estação meteorológica, anteriormente referida, que aconteceu no dia três de outubro de 2010 e que corresponde a um caudal de 113.9 mm no referido dia, dado este fornecido pelo IPMA, 2025.

Deste modo, as simulações serão as mesmas realizadas para a infiltração mensal, tendo um caudal de 0.1139m/dia durante 1 dia.

4.5.4. CENÁRIO 3-AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA

A análise de sensibilidade do modelo é fundamental para compreender a importância da sua variação (na perspetiva de alguma deficiência ou insuficiência da investigação da caracterização mecânica) na fiabilidade das previsões do comportamento do talude. Para esse fim, optou-se por fazer a variação do parâmetro da permeabilidade e da coesão.

4.5.4.1. Cenário 3.1-Avaliação da influência a da permeabilidade

A permeabilidade controla a forma como a água se move no interior do maciço, influenciando diretamente o desenvolvimento de pressões neutras, o tempo de drenagem e o comportamento do solo sob infiltração. Pequenas alterações neste parâmetro podem provocar variações relevantes na velocidade de infiltração, no aumento das poropressões e, conseqüentemente, na redução da resistência ao corte (Van Genuchten 1980; Fredlund et al.,1993). Assim, decidiu-se alterar a permeabilidade do solo em contacto principal com a infiltração e do solo imediatamente abaixo, diminuindo-a uma ordem de grandeza e simular o efeito da escavação faseada, da infiltração moderada ($q=0.020\text{m/dia}$ durante dois dias), e das diferentes geometrias do sistema de drenagem.

Tabela 4.10- Valores da permeabilidade usadas no cenário 3.1

Descrição		$K_x = K_y \text{ (m/s)}$ Cenário base	$K_x = K_y \text{ (m/s)}$ Cenário 3.1	$K_x = K_y \text{ (m/dia)}$ Cenário 3.1
Aterro	Aluvião	10^{-3}	10^{-3}	86.4
Granito da Madalena	Areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea (solo residual ou saibro)	10^{-5}	10^{-6}	0.0864
		10^{-5}	10^{-6}	0.0864
		10^{-6}	10^{-6}	0.0864

4.5.4.2. Cenário 3.2-Avaliação da influência da coesão

A coesão, representa a resistência ao corte independente da tensão de confinamento efetiva. Em solos parcialmente saturados, esta coesão é composta pela coesão efetiva (inerente ao solo) e por uma coesão aparente induzida pela sucção matricial. A sucção contribui para a resistência total do solo ao dificultar a movimentação das partículas um efeito bem descrito na equação de Fredlund et al. (1978), que introduz a sucção como um parâmetro adicional no critério de resistência ao corte. Com a infiltração da água no

talude, a sucção é reduzida, o que leva a uma diminuição da coesão aparente e, consequentemente, à redução da resistência global do solo (Fredlund et al., 1993; Lu et al., 2004).

Desta forma, reduziu-se a coesão para metade nos ensaios de simulação, modelando-se assim cenários mais conservadores, compatíveis com a perda de sucção durante eventos de precipitação intensa. Essa abordagem permite avaliar a vulnerabilidade do talude a condições transientes de saturação, simulando de forma realista o enfraquecimento progressivo da estrutura do solo.

Tabela 4.11- Valores de coesão utilizados no cenário 3.2

Descrição		N_{SPT}	$c' (kPa)$ Cenário base	$c' (kPa)$ Cenário 3.2
Aterro	Aluvião	5-10	5	2.5
Granito da Madalena	Areia fina a grosseira, silto argilosa, micácea (solo residual ou saibro)	10-30	20	10
		30-60	30	15
		>60	75	37.5

Mais ainda, simularam-se as condições de escavação faseada, infiltração e drenagem dispostas no cenário base e no cenário 1 para que se avalie a sua interferência no modelo.

Tabela 4.12- Resumo dos cenários criados nas simulações

Cenário	Base	1	2.1	2.2	3.1	3.2
Faseamento da escavação	x				x	x
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 4 níveis		x			x	x
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 5 níveis		x			x	x
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 4 níveis		x			x	x
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 5 níveis		x			x	x
Faseamento da escavação com posterior infiltração	x		x	x	x	x
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração		x	x	x	x	x
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração		x	x	x	x	x
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração		x	x	x	x	x
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração		x	x	x	x	x

Estes cenários visam contribuir para uma avaliação mais direcionada para a variabilidade de cada parâmetro e compreender o seu efeito no comportamento do talude de escavação. O cenário base serve para avaliar o faseamento construtivo e as consequências da infiltração moderada, o cenário 1 para avaliar o desempenho da drenagem considerando a sua geometria, o segundo cenário contribui para analisar o impacto da intensidade e duração da precipitação usando dados pluviométricos reais e por fim o último cenário tem como finalidade observar como a permeabilidade e coesão afetam as condições do maciço com e sem drenagem.

5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da modelação numérica realizada com o *software Plaxis 2D*, com o objetivo de avaliar a influência de diferentes fatores no comportamento e estabilidade do perfil em estudo, sujeito à infiltração de água da chuva. A análise incide sobre um talude escavado com base num perfil geotécnico representativo da nova linha ferroviária de alta velocidade em Portugal.

Para além da avaliação pontual da evolução da poropressão, sucção matricial e do fator de segurança ao longo das fases construtivas e eventos simulados, este capítulo contempla uma comparação sistemática entre vários cenários, com o intuito de compreender a sensibilidade do talude às seguintes variáveis:

- Geometria dos drenos inclinados: diferentes extensões e níveis;
- Condições de precipitação: intensidades e durações representativas de eventos disponíveis e significativos que foram registados em Viana do Castelo;
- Parâmetros hidráulicos: variação da permeabilidade do solo nas camadas mais críticas;
- Parâmetros de resistência: variação da coesão efetiva que pode ser real em solos residuais ou saprolíticos, ou seja, granito muito alterado.

Com esta abordagem, pretende-se identificar quais os fatores que mais influenciam a perda de estabilidade do talude e avaliar a eficácia relativa das soluções de drenagem em cenários representativos de obra real. A análise dos resultados é organizada de forma “temática”, abordando em primeiro lugar a variação dos parâmetros hidromecânicos no maciço envolvido pela escavação, e seguidamente a comparação entre os diferentes cenários de simulação de precipitação e de opções para a geometria dos drenos.

Esta estratégia permite não só compreender os mecanismos físicos subjacentes à instabilização por infiltração, como também fornecer recomendações técnicas baseadas na modelação para projetos semelhantes em solos graníticos alterados e regiões com forte sazonalidade climática.

Importa referir que, nos cenários que envolvem precipitação, a análise de resultados foi realizada imediatamente após o término da chuva simulada, sem considerar um período adicional para a redistribuição ou estabilização da água no interior do talude. Esta abordagem visa avaliar o impacto direto da infiltração rápida sobre a estabilidade, representando uma situação crítica em que o solo se

encontra saturado de forma repentina, o que é particularmente relevante em episódios de chuvas de curta duração com uma intensidade relevante.

A avaliação dos resultados referentes às poropressões, à sucção e ao fator de segurança foi realizada de forma faseada acompanhando a progressão temporal do processo de escavação. Para cada simulação numérica, os valores obtidos foram associados ao momento correspondente na sequência temporal simulada, expressa em dias, tal como o descrito na Tabela 5.1. Esta abordagem permite uma leitura dinâmica e evolutiva do comportamento do talude, possibilitando a identificação de alterações significativas nas condições hidrogeomecânicas ao longo das várias fases da escavação. A análise temporal apresenta-se, neste contexto, como uma ferramenta particularmente vantajosa, uma vez que permite compreender não apenas o estado final da estrutura, mas também a forma como os parâmetros críticos de estabilidade evoluem em resposta às intervenções sucessivas, captando potenciais instabilidades transitórias que poderiam passar despercebidas numa análise meramente estática.

Tabela 5.1- Duração das atividades das diferentes simulações

	Escavação faseada	Escavação faseada e precipitação	Escavação faseada e drenos	Escavação faseada, drenos e precipitação
Fase inicial	5	5	5	5
1ª escavação	20	20	20	20
2ª escavação	35	35	35	35
1º nível de drenos	-	-	36	36
3ª escavação	49	49	50	50
2º nível de drenos	-	-	51	51
4ª escavação	63	63	65	65
5ª escavação	76	76	78	78
3ª nível de drenos	-	-	79	79
6ª escavação	89	89	92	92
4º/5º nível de drenos	-	-	93	93
Precipitação	-	92 a 123		92 a 123

5.2. ANÁLISE DA POROPRESSÃO AO LONGO DO TEMPO

A análise da evolução da poropressão foi realizada para seis pontos distintos do perfil do talude (pontos esses designados por: A, B, C, D, E, F) (Figura 5.1), localizados em posições representativas quer da superfície, quer do interior da massa de solo (Tabela 5.2). Estes pontos foram selecionados de forma a abranger diferentes profundidades e camadas geotécnicas, permitindo acompanhar a variação da poropressão em função do avanço da escavação e da infiltração da água da chuva.

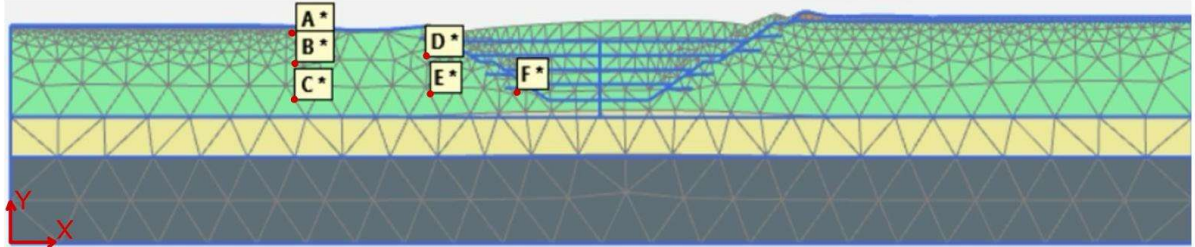


Figura 5.1- Posição dos pontos em estudo na malha de elementos finitos gerada

A escolha destes pontos teve também em consideração a proximidade ao nível freático e às zonas potencialmente mais críticas identificadas nos resultados preliminares. A evolução dos valores de poropressão ao longo do tempo e das fases construtivas permitiu avaliar a condição hidráulica instalada no talude em diferentes cenários, com e sem drenagem, e serviu de base para a interpretação dos mecanismos de instabilização associados às redes hidráulicas instaladas neste maciço terroso.

Tabela 5.2- Posição dos pontos em estudo na malha de elementos finitos gerada

	A	B	C	D	E	F
X (m)	66.4	66.4	66.4	94.2	94.1	113.9
Y (m)	44.0	37.9	29.8	37.9	29.8	29.9

5.2.1. EVOLUÇÃO DA POROPRESSÃO AO LONGO DO FASEAMENTO DA ESCAVAÇÃO

5.2.1.1. Condição base

Esta condição é marcada pelo faseamento de escavação desde a superfície correspondente a 0 metros (superfície do terreno natural) até à última escavação que corresponde aos 18.29 metros de profundidade. Deste modo, o gráfico 5.1 mostra a evolução das poropressões, ao longo do tempo das fases de escavação, esta avaliação foi realizada para todos os 6 pontos para que se possa ver a influência da posição dos mesmos nos resultados.

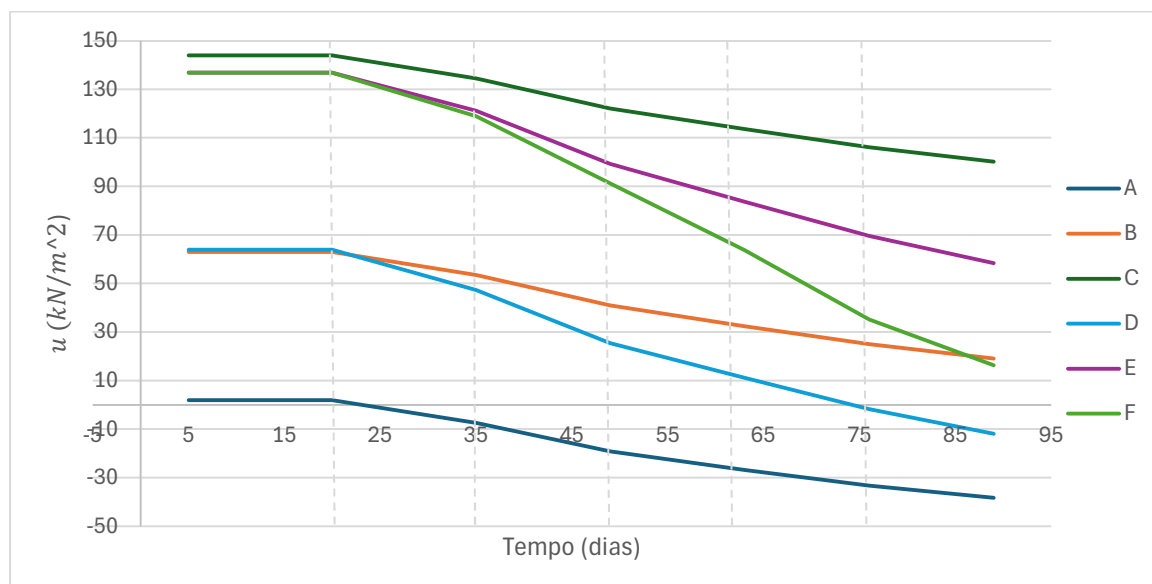


Gráfico 5.1- Evolução da poropressão ao longo do tempo do faseamento da escavação

Como se pode verificar, à medida que a escavação avança, observa-se uma diminuição da poropressão nas zonas escavadas, o que seria esperado, já que existe um rebaixamento do nível freático e consequentemente a redução da poropressão, sendo que nos pontos mais próximos da superfície e consequentemente do nível freático, esta pode tomar valores negativos refletindo que a descida do nível freático gerou sucção. Assim, durante as fases de escavação, o modelo revelou valores reduzidos de poropressão nas camadas mais superficiais representadas pelo ponto A, conforme a evolução da escavação observa-se uma reorganização do regime de tensões no interior do talude, refletindo-se numa redistribuição da poropressão.

Passando agora para o cenário base com infiltração moderada ($q=0.020$ m/dia durante 2 dias) fez-se a mesma representação sendo que a poropressão registada para o momento de precipitação se representou entre o dia 89 e 91, pois esta acontece apenas no final de toda a escavação.

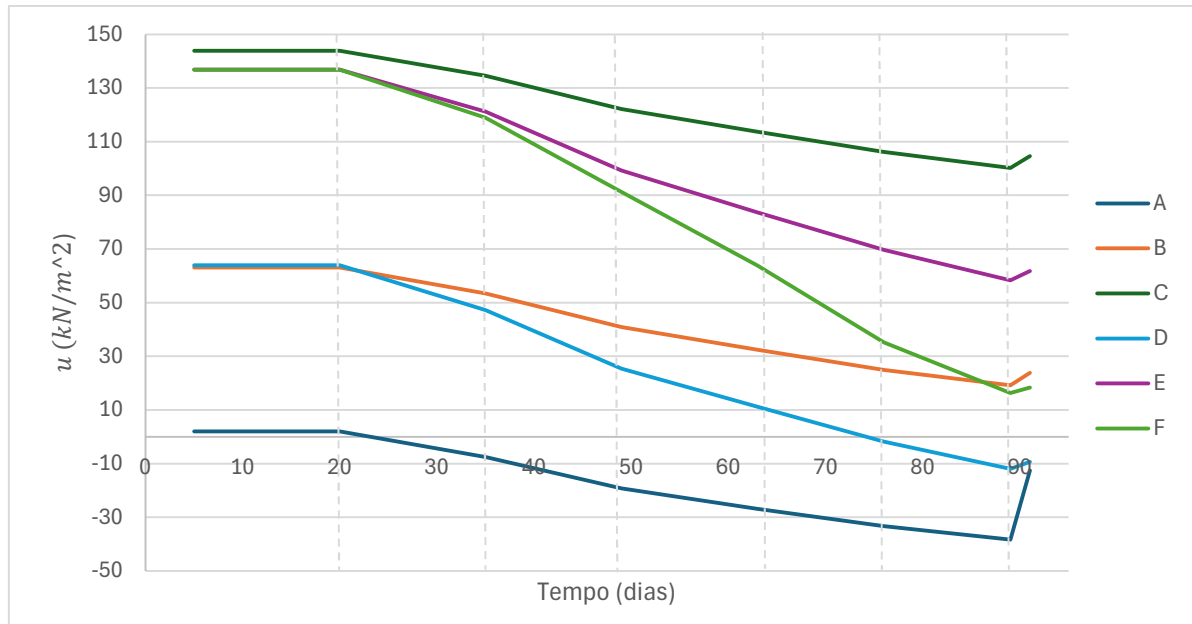


Gráfico 5.2- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração

Como expectável a infiltração após a escavação promove um aumento significativo da poropressão (Gráfico 5.2), especialmente nas camadas superiores (representadas pelo ponto A), uma vez que se dá uma subida do nível freático e consequentemente um aumento da poropressão, mesmo nos pontos mais afastados da superfície.

5.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAGEM

5.2.2.1. Drenos de três metros sem infiltração

A inclusão de drenos inclinados no modelo teve impacto direto na dissipação das poropressões acumuladas. A colocação dos mesmos promoveu uma redução da poropressão sobretudo em zonas mais próximas da linha de escavação e consequentemente dos drenos, como o ponto F. O efeito destes é mais acentuado nas fases finais de escavação, quando estão mais expostos e operacionais (Gráfico 5.3). Para além disto pode dizer-se também que a implementação de um quinto nível na base de escavação tem um maior impacto uma vez que a sua ação se verifica em pontos bastante mais afastados da linha de escavação como o ponto E, que sem este nível sentiria muito pouca variação na sua poropressão (Gráfico 5.4)

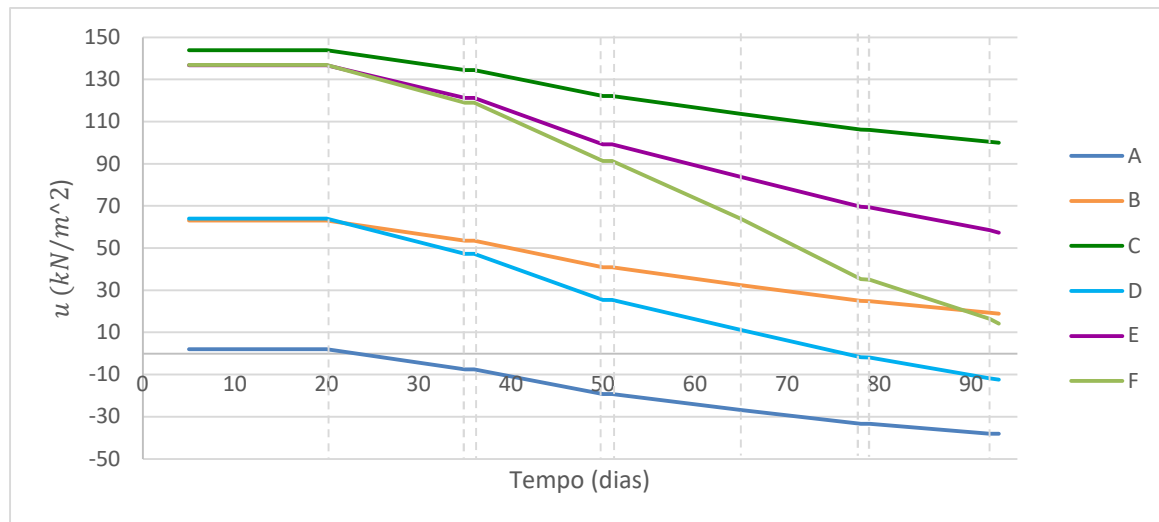


Gráfico 5.3- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis

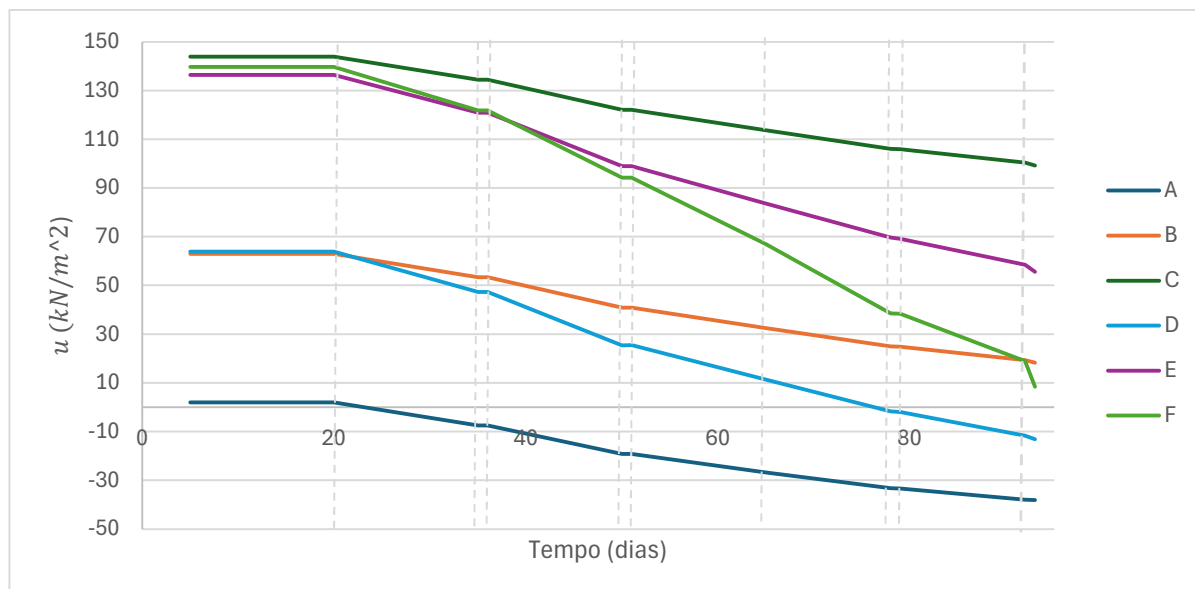


Gráfico 5.4- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis

5.2.2.2. Drenos de 6m sem infiltração

Neste caso, e em comparação com os drenos de 3 metros, pode dizer-se que os drenos mais extensos desempenham melhor função (Gráfico 5.4), pois diminuem significativamente a poropressão mesmo em fases mais iniciais da escavação, o que significa que quanto mais extensos forem os drenos mais profundo chegam dentro do maciço do solo, permitindo que este intersete zonas mais saturadas, onde há maior acumulação de água nos poros. Sendo, que mesmo assim continua a ser mais vantajoso a colocação do quinto nível de drenos (Gráfico 5.5) para que ocorra uma maior redução de pressão nos pontos mais próximos da linha de escavação, reduzindo a probabilidade de instabilização pela subida do nível freático.

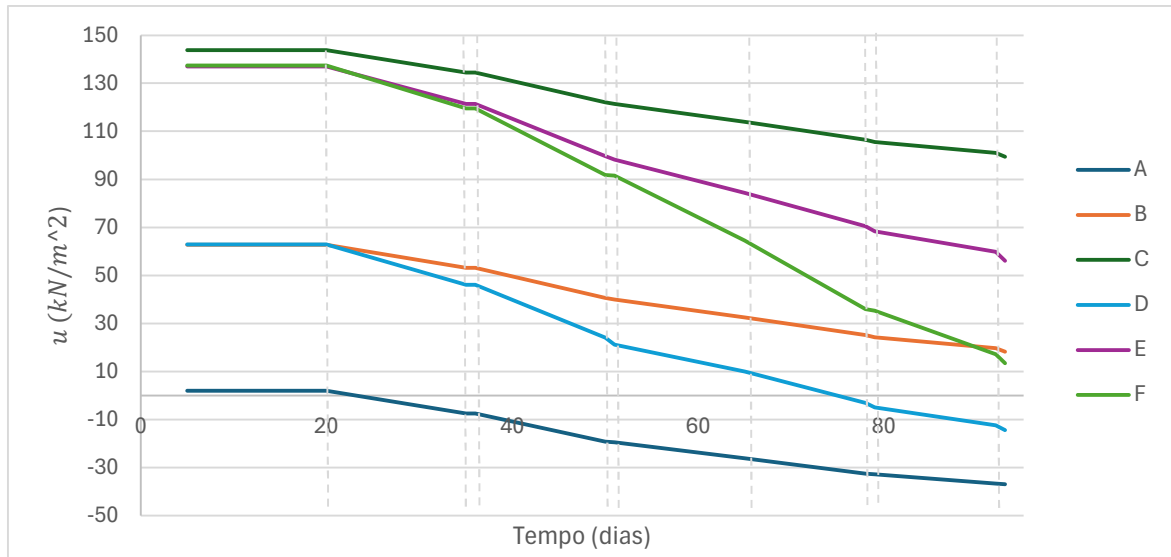


Gráfico 5.5- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis

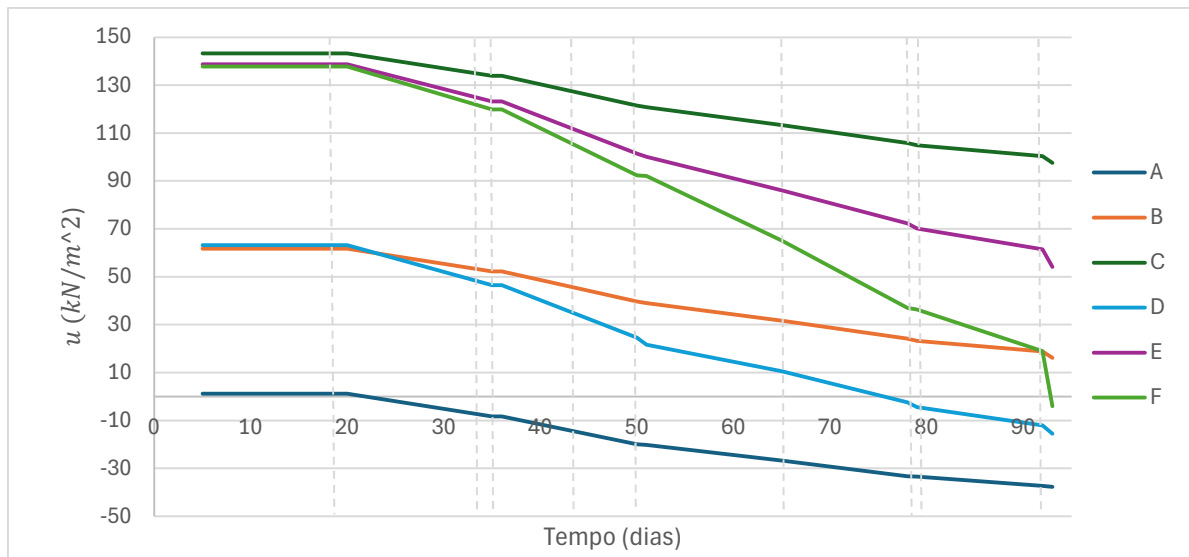


Gráfico 5.6- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

5.2.2.3. Drenos de três metros com infiltração moderada

Como se pode observar pelos seguintes gráficos, os drenos de 3 metros dispostos em 4 níveis não conseguem reverter totalmente o aumento da poropressão provocada pela infiltração, nos pontos mais próximos da linha de escavação, atuam de forma parcialmente eficaz, mas nos pontos mais afastados apesar de diminuírem a poropressão que estaria instalada sem eles não conseguem uma redução eficaz. O facto de se colocar um nível adicional de drenos atenua ligeiramente o aumento da poropressão causado pela infiltração nos pontos mais perto da escavação, e em alguns dos pontos (como E e F) reverte todo esse aumento.

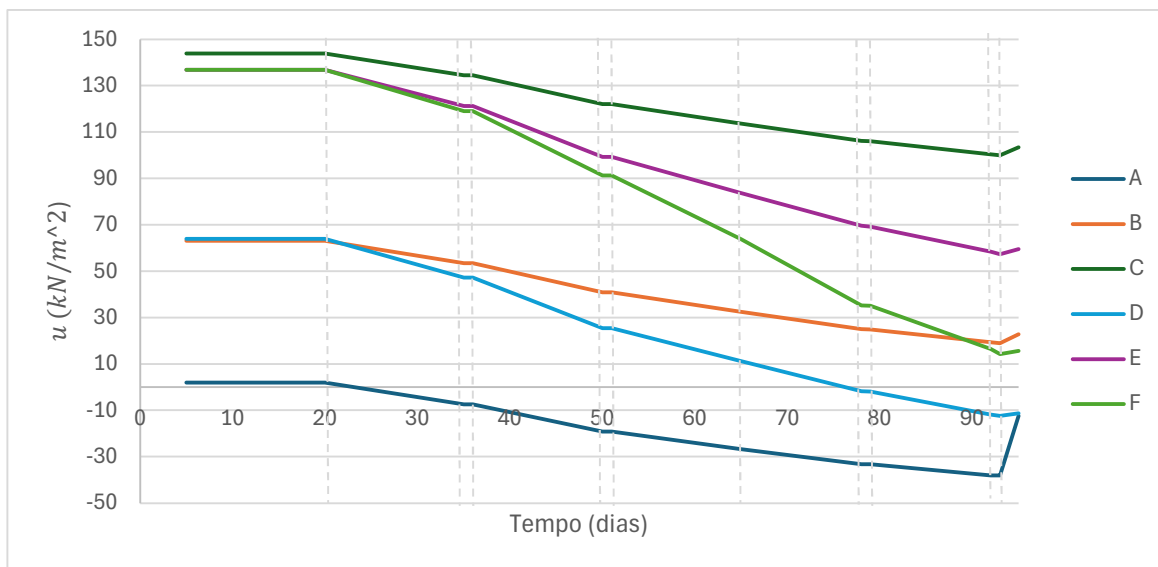


Gráfico 5.7-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada

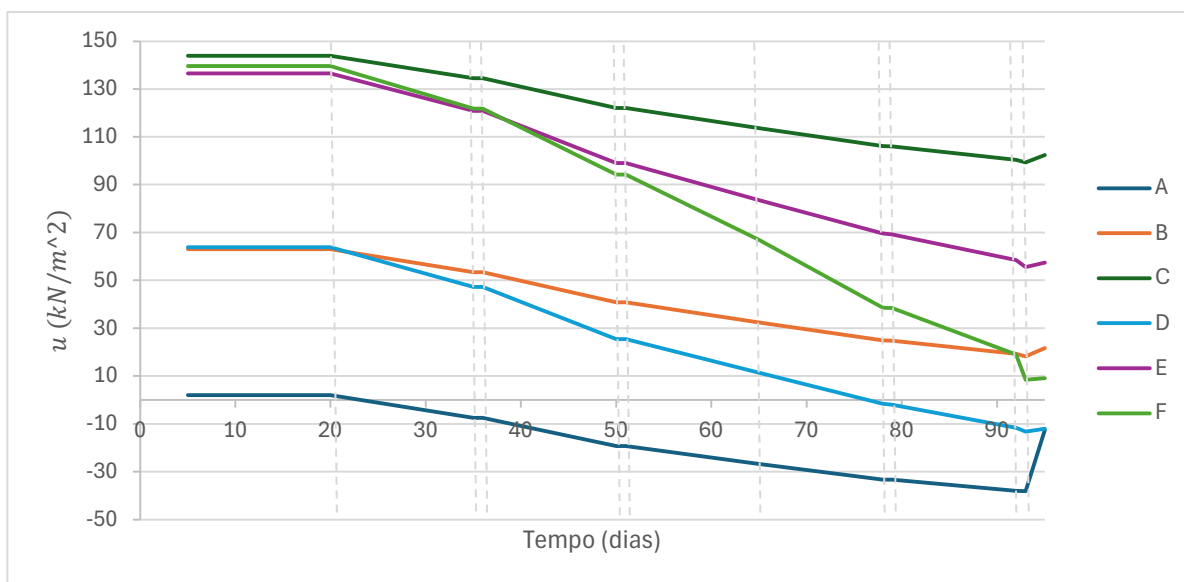


Gráfico 5.8- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada

5.2.2.4. Drenos de seis metros com infiltração moderada

Em comparação com os drenos menos extensos, os drenos de 6 metros, contribuem de forma mais significativa para a diminuição da poropressão gerada pela infiltração. O modelo de quatro níveis (Gráfico 5.9) continua a não compensar totalmente os excessos de pressões gerados pela infiltração, fazendo-o apenas nos pontos perto da escavação (como E e F). O acréscimo do nível de drenos na base de escavação (Gráfico 5.10) tem bastante influência do ponto de vista da redução das poropressões, uma vez que compensa os efeitos da infiltração em todos os pontos, à exceção do ponto mais à superfície pois está mais suscetível à subida do nível freático, o que significa que criam caminhos mais eficientes

para a dissipação da água e promovem uma maior estabilidade dado ao facto de menor probabilidade de acumulação de água à superfície da escavação.

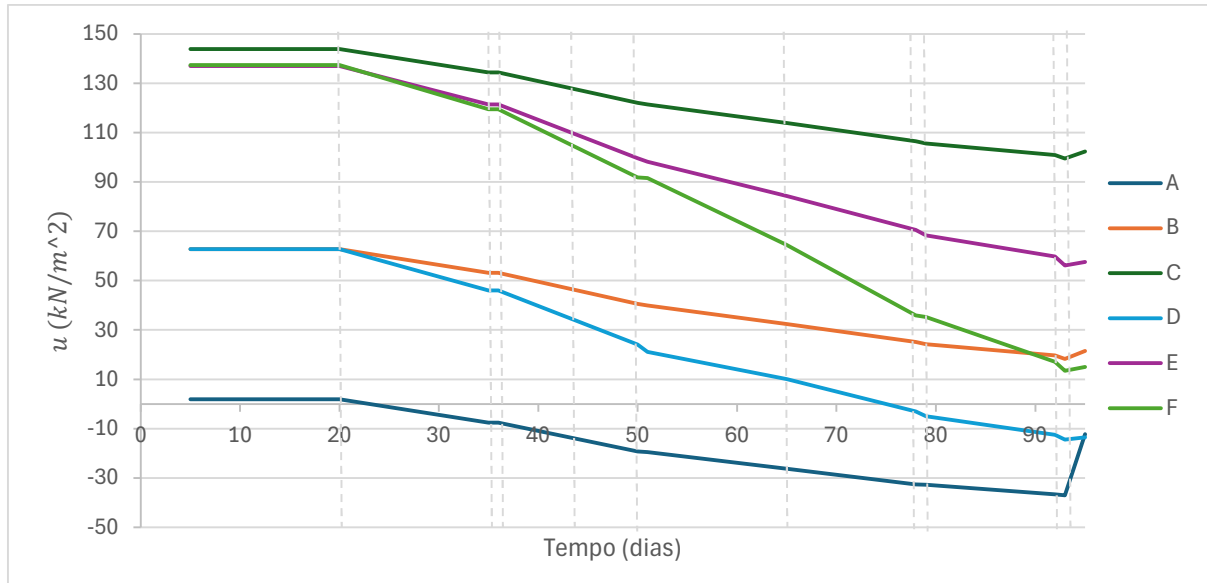


Gráfico 5.9- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada

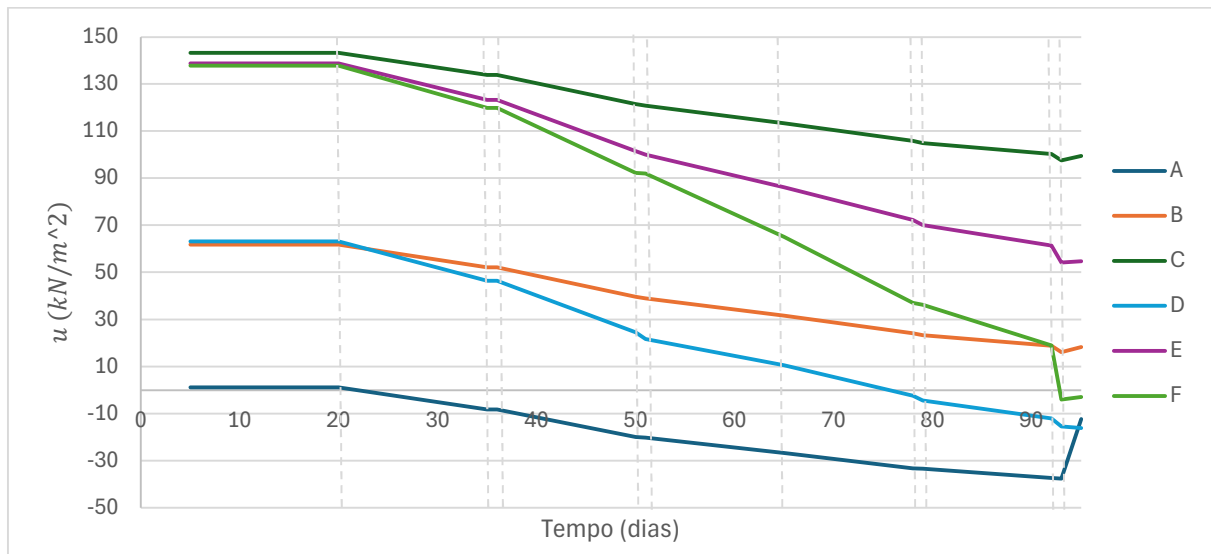


Gráfico 5.10- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada

Considera-se que, os modelos com menor densidade de drenos mostraram menor eficiência, com zonas localizadas de poropressão elevada a persistirem em profundidade. Por outro lado, a geometria dos drenos com maior extensão, permitiu alcançar maior extensão de drenagem ao longo do talude, favorecendo a dissipação da água infiltrada ao longo do tempo.

5.2.3. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO

5.2.3.1. Precipitação mensal de janeiro de 2025 em Viana do Castelo

O cenário de precipitação mensal sem drenagem não foi concluído com sucesso devido à ocorrência do erro “*Prescribed ultimate time not reached*”. Este erro no *Plaxis* 2D surge frequentemente quando o programa não consegue atingir um estado de equilíbrio numérico, muitas vezes associado a fenômenos de instabilidade no solo como (*Plaxis*, 2023):

- Excesso de saturação em camadas de baixa permeabilidade, que impede a dissipação do incremento da poropressão;
- Desenvolvimento de zonas críticas com poropressões excessivas, levando a fortes desequilíbrios hidráulicos;
- Redução súbita da resistência efetiva do solo, que impede a convergência.

Este resultado, embora não numérico, é altamente significativo do ponto de vista geotécnico, uma vez que demonstra inequivocamente a importância dos sistemas de drenagem na prevenção de instabilidade.

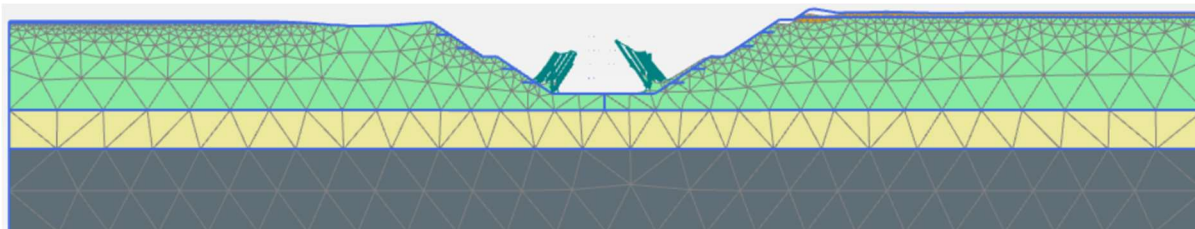


Figura 5.2- Acumulação de água na base de escavação para o cenário de precipitação mensal sem drenagem

Com a introdução da precipitação simulada na superfície do talude, prevê-se que a poropressão tenha aumentado, sobretudo nas zonas onde a permeabilidade dos materiais favorece a infiltração vertical. Efeito este que foi acentuado na simulação com chuva de longa duração, na qual a água atingiu rapidamente camadas intermédias, promovendo a saturação local e a consequente elevação das poropressões.

Como se pode verificar pela figura 5.2, a água tende a acumular-se acima da interface, criando uma zona de potencial instabilidade. Este comportamento evidencia a importância da estratigrafia no controlo do escoamento vertical e do risco de falha.

5.2.3.2. Drenos de três metros com precipitação mensal variável

Os gráficos seguintes apresentam a variação da poropressão ao longo do tempo em dias, nos pontos de controlo do talude, considerando uma infiltração mensal variável e a instalação de drenos em diferentes momentos correspondentes ao final das fases de escavação (dias 36, 51, 79 e 93). O eixo temporal continuou a ser adotado, uma vez que se pretendia ver a variação da poropressão tendo em conta a variação diária de precipitação, resposta à ação prolongada da infiltração em condições de operação real, comportamento hidrodinâmico ao longo do tempo, após a execução do talude.

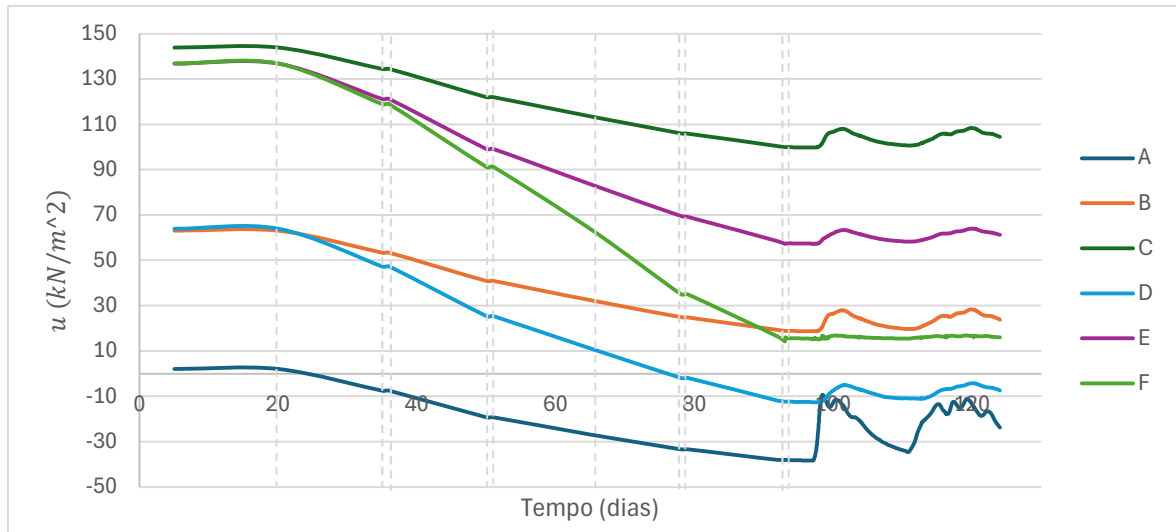


Gráfico 5.11-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração mensal variável

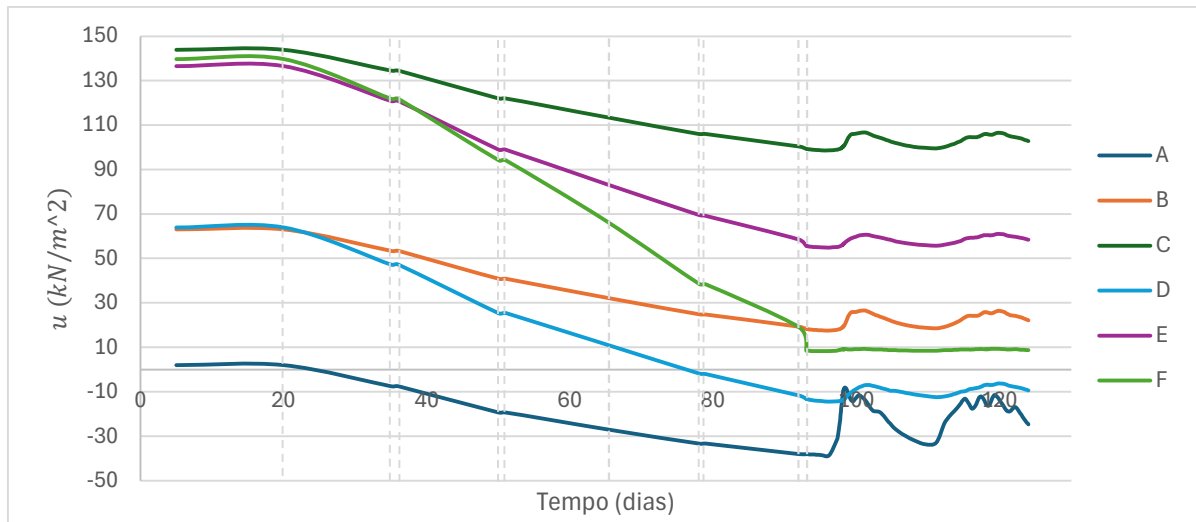


Gráfico 5.12- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração mensal variável

No cenário representado pelo gráfico 5.11, a redução da poropressão é parcialmente visível após a instalação dos drenos, especialmente nos pontos mais perto da linha de escavação (E e F), contudo os pontos mais afastados dos drenos mantêm valores de pressão elevados, que sugerem que o comprimento de 3 metros pode não ser suficiente para interceptar zonas de maior saturação, perto do nível freático ou camadas inferiores mais afastadas.

Com a colocação de um nível de drenos na base de escavação (Gráfico 5.12), observa-se uma melhoria na redução da poropressão ao longo do tempo, continuando esta a ser mais visível perto da zona de drenagem.

5.2.3.3. Drenos de seis metros com precipitação mensal variável

Os gráficos apresentados de seguida, servem mais uma vez para verificar que os drenos mais extensos revelam um melhor comportamento na redução das poropressões, sendo que a opção de 5 níveis se mantém mais vantajosa pelo facto de reduzir mais acentuadamente a poropressão em todos os pontos. Incluindo os mais profundos. Esta conjugação favorece a drenagem das zonas mais críticas, permitindo a dissipação mais eficiente da água infiltrada e prevenindo aumentos perigosos da poropressão após o início da precipitação (dia 93).

A evolução da poropressão ao longo do tempo confirma a eficácia dos sistemas de drenagem mais profundos na mitigação dos efeitos da infiltração prolongada e variável.

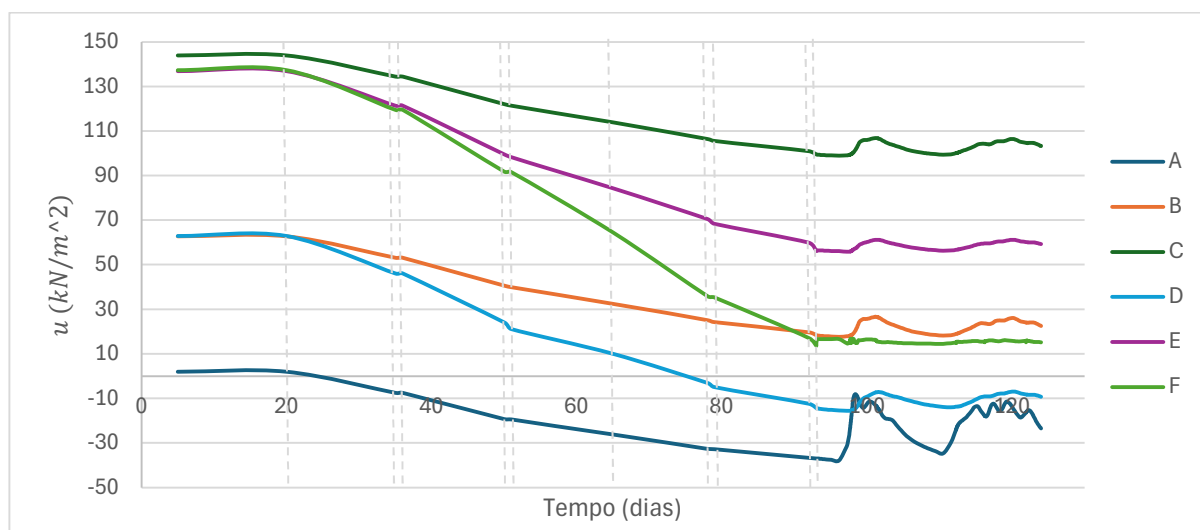


Gráfico 5.13- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração mensal variável

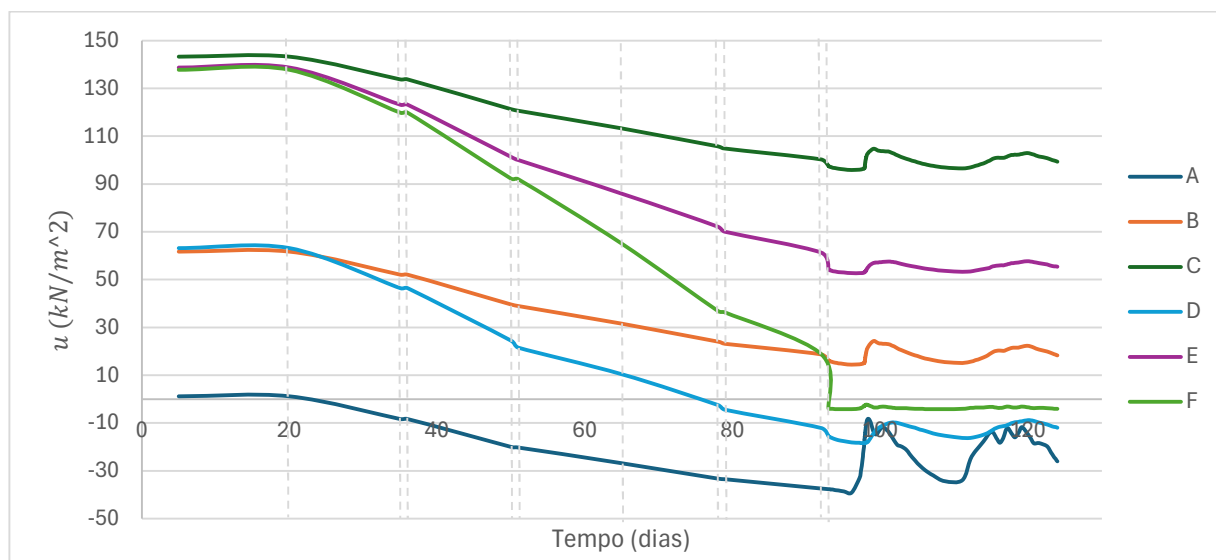


Gráfico 5.14- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração mensal variável

5.2.3.4. Precipitação máxima diária já registada em Viana do Castelo

Esta simulação foi executada tendo em conta uma precipitação de 0.1139m/dia durante um dia após a finalização da escavação simulando, deste modo um fenómeno extremo, a evolução da poropressão para este cenário está apresentada no seguinte gráfico.

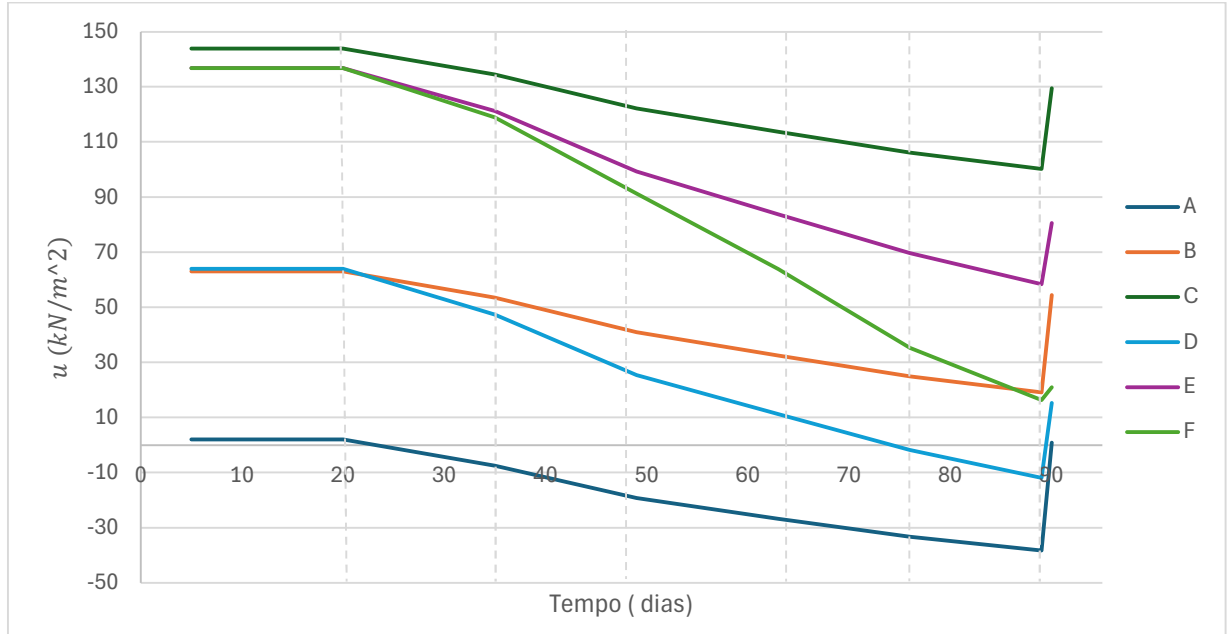


Gráfico 5.15- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e infiltração máxima diária

Neste caso, observa-se uma acumulação significativa de poropressão, bastante superior à dada para uma precipitação moderada, sobretudo nos pontos A e D, localizados em zonas superiores do talude. A poropressão mantém valores elevados mesmo para maiores profundidades, o que evidencia a saturação progressiva do solo com baixa capacidade de drenagem interna. A ausência de drenagem leva à acumulação de água e à lenta dissipação da poropressão excessiva, causada pelo elevado caudal de infiltração, o que traduz numa maior instabilidade do maciço.

5.2.3.5. Drenos de três metros com precipitação máxima diária

A introdução de drenos de 3 metros distribuídos em 4 níveis (gráfico 5.16) mostra uma melhoria considerável na dissipação da poropressão como acontecia para a infiltração moderada, com reduções visíveis nos pontos E e F mais próximos da escavação. Ainda assim os pontos A, B, C, localizados em zonas mais afastadas, mantêm valores de poropressão elevados, o que sugere que o alcance dos drenos com esta configuração é limitado e insuficiente para captar a água infiltrada nas zonas mais profundas ou mais saturadas do talude.

Com o aumento do nível de drenos para 5 (Gráfico 5.17), nota-se uma redução mais pronunciada da poropressão, sobretudo nos pontos E e F. Este comportamento reflete uma maior eficácia na captação da água que se acumula nas camadas inferiores.

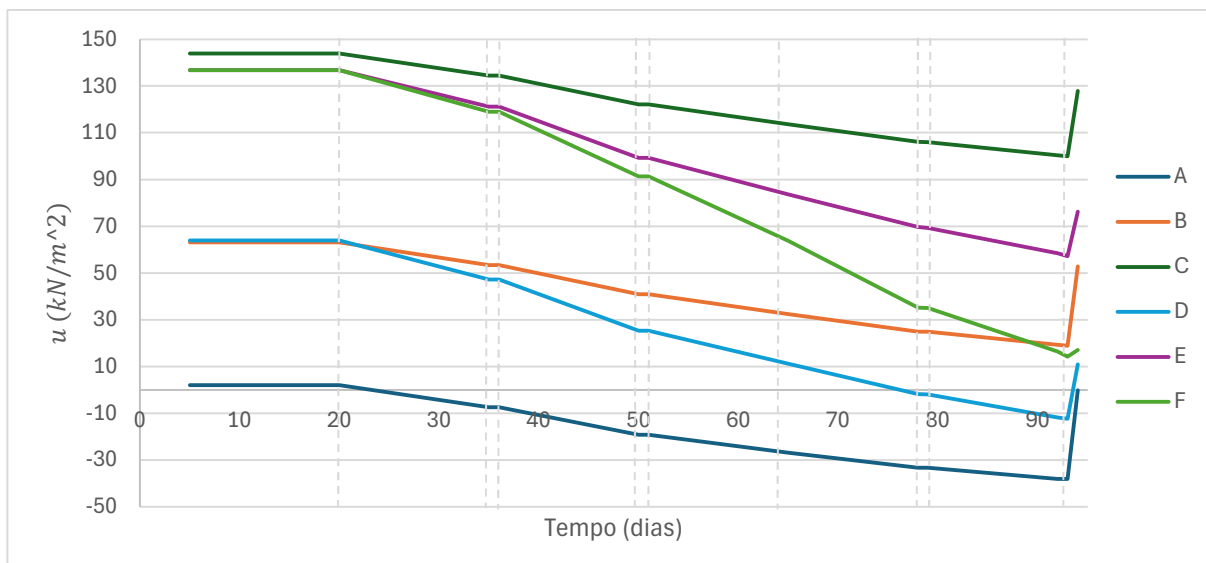


Gráfico 5.16- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração máxima diária

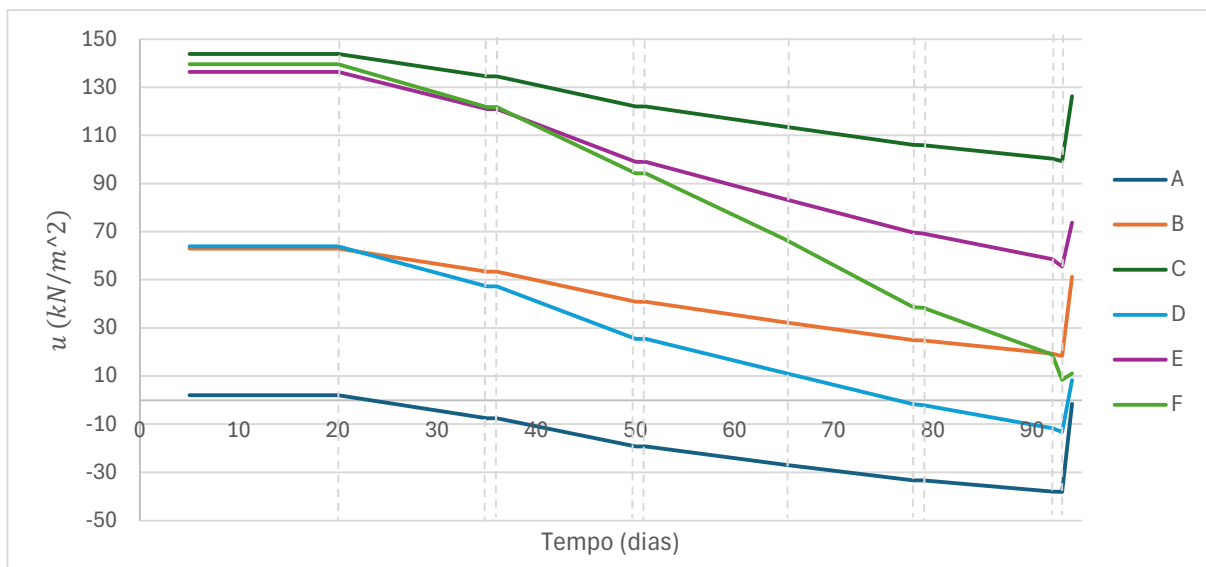


Gráfico 5.17- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária

5.2.3.6. Drenos de seis metros com precipitação máxima diária

Neste cenário que considera a drenagem mais extensa, a poropressão diminui em todas as fases de escavação, o que significa que drenos mais extensos conseguem captar melhor a água acumulada nas camadas mais profundas. Por sua vez, os drenos instalados na base de escavação e com maior extensão (Gráfico 5.19) apresentam a melhor performance global entre os testados. A redução da poropressão é consistente ao longo de todos os pontos, incluindo os mais críticos C, E e F. Resultando assim, numa drenagem mais eficaz nas camadas inferiores onde a água se acumula com maior intensidade, o que indica uma redução eficaz da saturação.

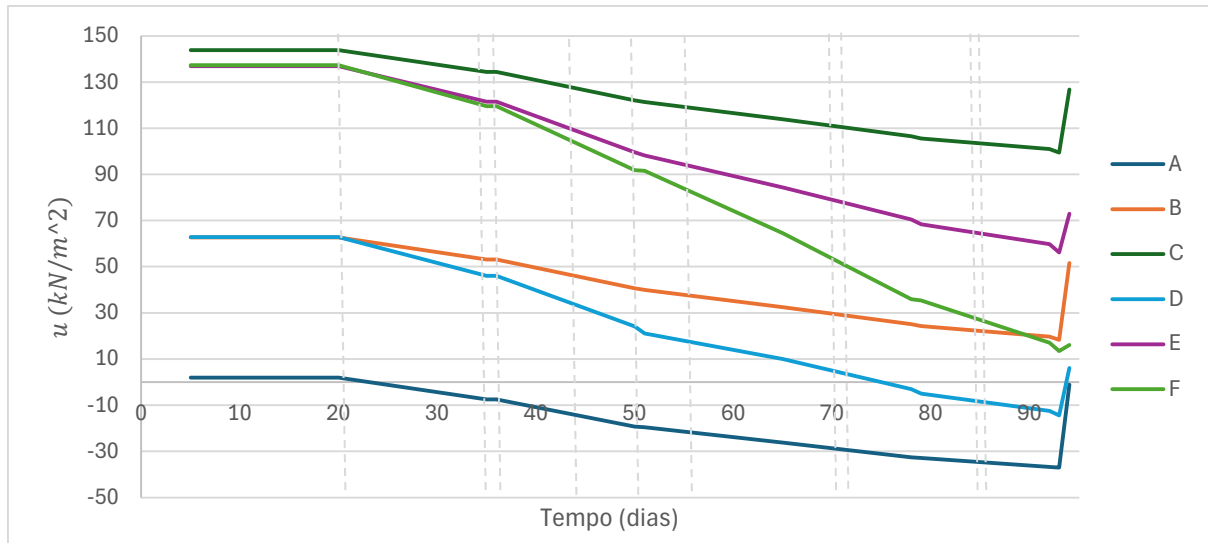


Gráfico 5.18- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração máxima diária

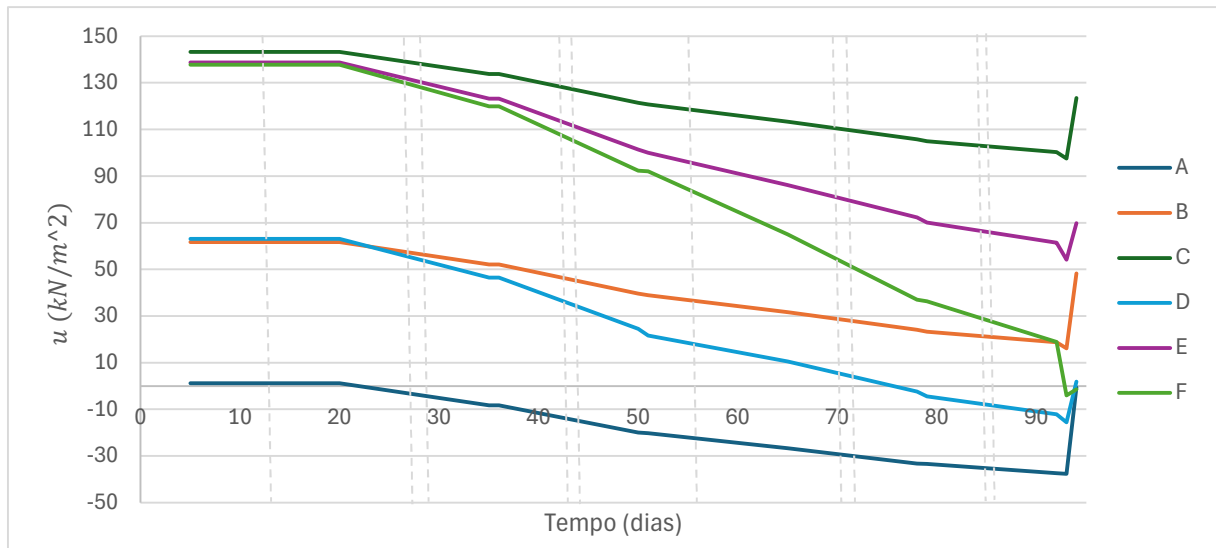


Gráfico 5.19- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária

5.2.4. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DRENAGEM SUJEITOS A DIFERENTES INFILTRAÇÕES

A inclusão de drenos no modelo produziu resultados favoráveis na dissipação das poropressões acumuladas tanto para a precipitação mensal, como para a precipitação máxima diária. Em cenários com drenos mais profundos e distribuídos mais eficientemente, observou-se uma redução clara da poropressão nas camadas críticas, promovendo a estabilização da frente de humidade.

Os modelos com menor número de drenos, mostraram menor eficiência, com zonas localizadas de poropressão elevada a persistirem em profundidade. Por outro lado, a geometria dos drenos com maior comprimento permitiu alcançar maior extensão de drenagem ao longo do talude, favorecendo a dissipação da água infiltrada ao longo do tempo.

Assim, mais uma vez os drenos de maior extensão e com um nível adicional na base de escavação, revelaram-se mais eficazes na redução de poropressão particularmente nos pontos situados nas zonas médias e inferiores do talude. Este comportamento configura a importância de garantir que o sistema de drenagem atinja as zonas mais saturadas, promovendo a dissipação das poropressões acumuladas mesmo em situações de precipitação extrema.

5.2.5. INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE E COESÃO NA DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO

5.2.5.1. Permeabilidade

Os cenários a representar são resultados de simulações feitas com diminuição da permeabilidade no segundo e terceiro estrato, onde é coincidente a localização de todos os pontos em estudo. Os gráficos seguintes demonstram a evolução da poropressão ao longo do tempo de simulação.

5.2.5.2. Faseamento da escavação com e sem infiltração

No cenário de escavação faseada sem infiltração em que foi reduzida a permeabilidade das camadas intermédias, a acumulação de água foi mais evidente, traduzindo-se em menor redução da poropressão com o avanço da escavação (Gráfico 5.20), o mesmo acontece quando se considera a infiltração (Gráfico 5.21), a acumulação de poropressão é mais pronunciada, devido à menor capacidade de escoamento vertical da água infiltrada, o que se traduz em picos de pressão mais elevados, particularmente nas zonas intermédias do talude, indicando maior suscetibilidade à saturação prolongada e, conseqüentemente, à perda de resistência efetiva. Assim, pode dizer-se que no cenário sem infiltração a poropressão se mantém mais contida, com variações suaves e profundidade, mas mostrando uma menor dissipação natural, devido à reduzida permeabilidade do meio. No cenário com infiltração, a poropressão aumenta de forma acentuada, como expectável, confirmando o risco acrescido de saturação em solos com baixa condutividade hidráulica.

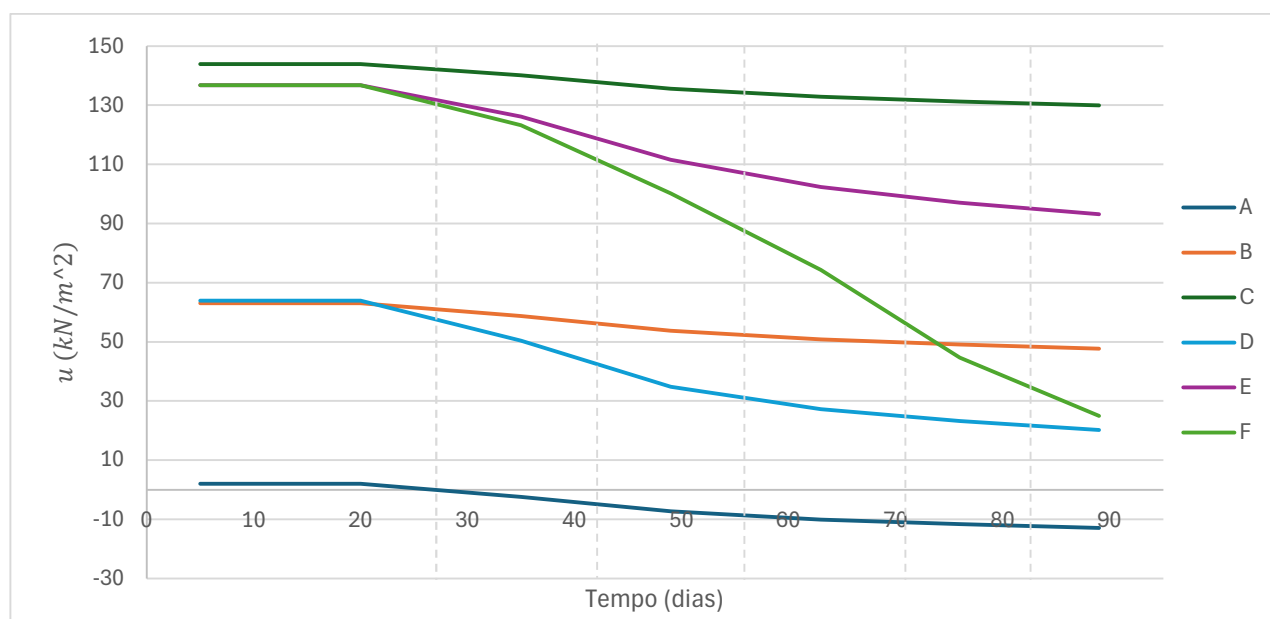


Gráfico 5.20- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação no cenário com menor permeabilidade

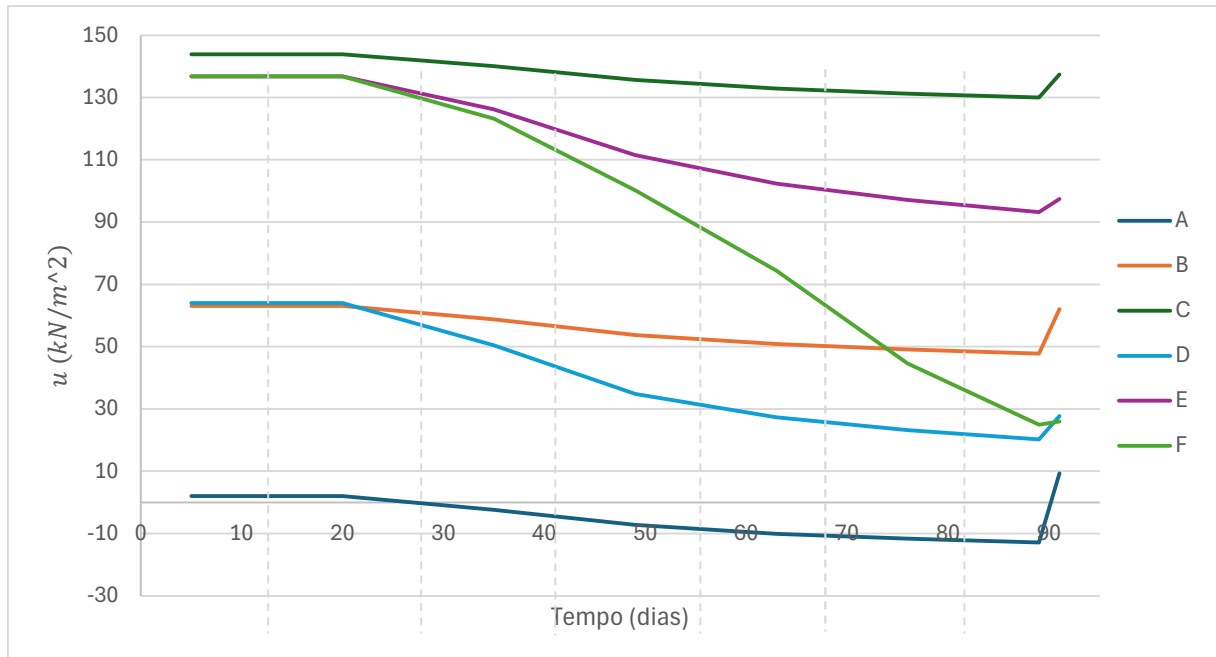


Gráfico 5.21- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada no cenário com menor permeabilidade

5.2.5.3. Drenos de três metros sem infiltração

Os drenos de 3 metros permitem uma ligeira dissipação da poropressão, especialmente nos níveis superiores (representados nos dias 36 e 51) (Gráfico 5.22), mas não atingem as zonas de maior acumulação, o acréscimo de um nível de drenos (Gráfico 5.23) traz vantagens para pontos com E e F que se situam perto da zona escavada. Em comparação com o cenário base sem alteração da permeabilidade, pode afirmar-se que a drenagem das duas configurações tem maior impacto nos níveis superiores pelo facto de o nível freático estar mais à superfície e estes serem capazes de captar parte da infiltração.

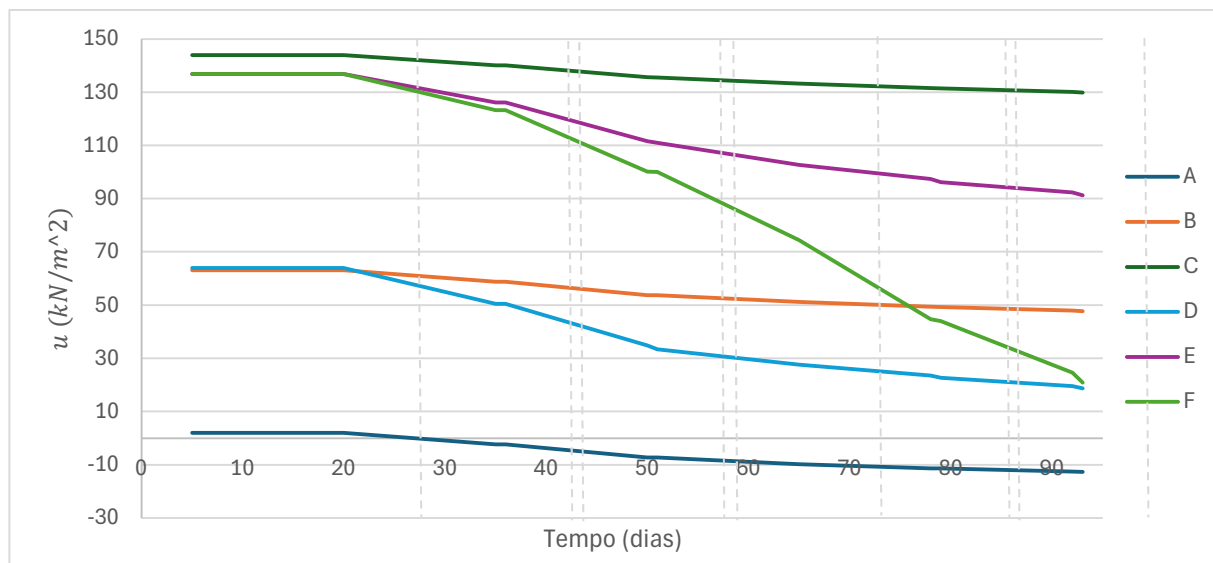


Gráfico 5.22-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis no cenário de menor permeabilidade

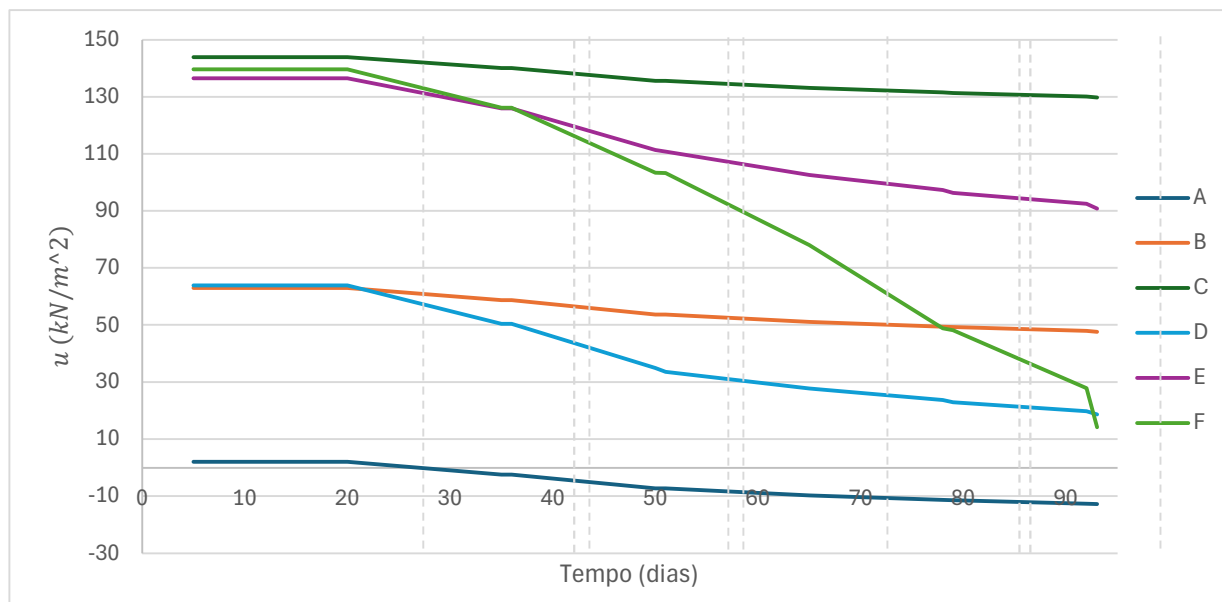


Gráfico 5.23- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis no cenário de menor permeabilidade

5.2.5.4. Drenos de seis metros sem infiltração

Com o aumento do comprimento dos drenos para o dobro, observa-se, mais uma vez, uma melhoria clara na redução da pressão neutra, os drenos mais profundos (representados nos dias 79 e 93) (Gráfico 5.24) conseguem captar parte da água acumulada nas zonas críticas, reduzindo o valor da poropressão em profundidade. A configuração de 5 níveis é mais eficaz (Gráfico 5.25), uma vez que permite a redução mais acentuada da poropressão em todos os pontos.

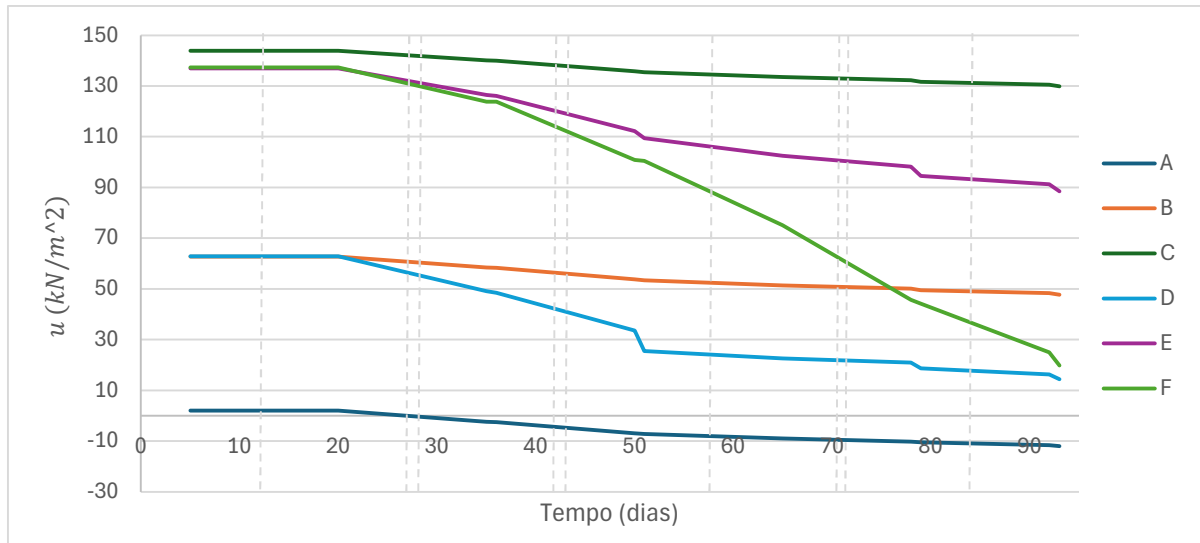


Gráfico 5.24- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis no cenário de menor permeabilidade

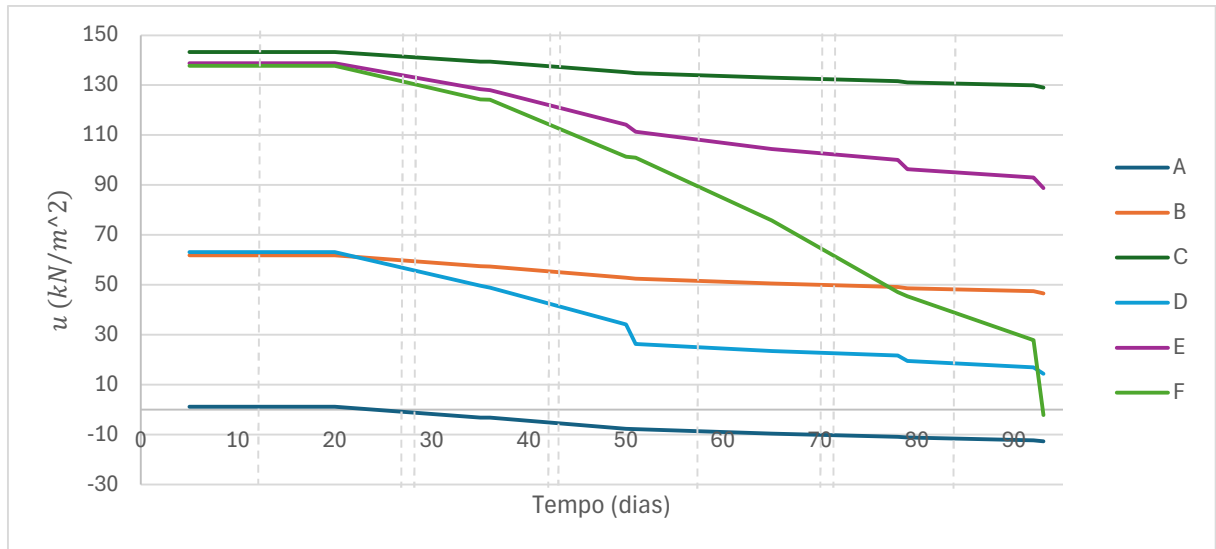


Gráfico 5.25- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis no cenário de menor permeabilidade

5.2.5.5. Drenos de três metros com infiltração moderada

Antes da infiltração a configuração de drenagem tem o mesmo impacto, já referido, no entanto, verificou-se que, apesar da permeabilidade das camadas críticas ter sido reduzida em relação ao cenário base, o acréscimo de poropressão após a infiltração foi superior. Este comportamento é coerente com a natureza dos solos de baixa permeabilidade, nos quais a infiltração da água ocorre de forma mais lenta, mas a dissipação do acréscimo de poropressões é também mais limitada. Assim, a água infiltrada permanece por mais tempo retida nos poros, promovendo uma acumulação localizada e sustentada de poropressão, sobretudo quando a análise é realizada imediatamente após a precipitação, antes de o sistema atingir um novo estado de equilíbrio.

Esta acumulação prolongada de poropressões reflete-se diretamente na posição da linha neutra, ou seja, a superfície conceptual que separa a zona ativa (com fator de segurança inferior a 1, indicadora de instabilidade) da zona passiva (com fator de segurança superior a 1, estabilizada). Nos cenários com menor permeabilidade, o aumento das poropressões favorece o alargamento da zona ativa, conduzindo a uma deslocação da linha neutra para zonas mais profundas e internas do maciço. Em contraste, no cenário base, a maior permeabilidade permitiu uma infiltração mais rápida, mas também uma dissipação mais eficaz da água, o que limitou o aumento da pressão neutra e restringiu a extensão da instabilidade.

Este comportamento tem implicações diretas no dimensionamento e eficácia dos sistemas de drenagem. Em taludes constituídos por solos de baixa permeabilidade, a capacidade natural de escoamento da água é reduzida, o que agrava a acumulação de poropressões após eventos de precipitação. Por conseguinte, a presença destes materiais não dispensa, a implementação de sistemas de drenagem adequados, nomeadamente soluções que promovam a dissipação interna das poropressões, como os drenos profundos horizontais simulados. Além disso, importa sublinhar que a eficácia da drenagem não depende apenas da limitação da infiltração, mas também da velocidade com que a água é removida do sistema. Em solos pouco permeáveis, o atraso no reequilíbrio hidráulico prolonga o tempo em que o talude permanece em condições críticas, comprometendo a sua estabilidade global, sendo por isso essencial a presença dos drenos (Gráficos 5.26 e 5.27), que tem maior capacidade se forem em maior número.

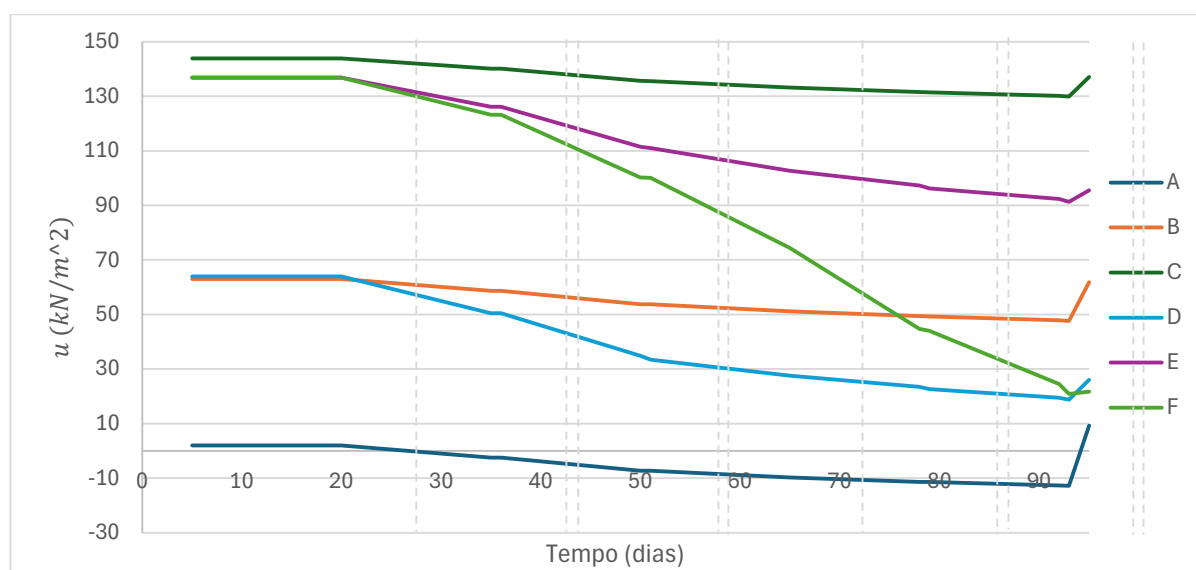


Gráfico 5.26- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade

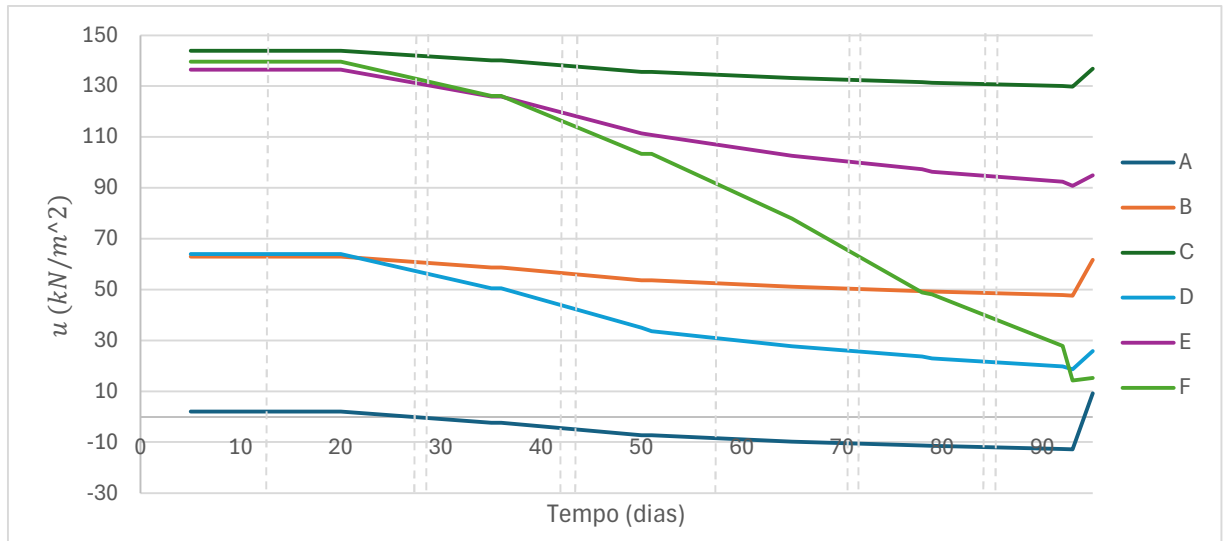


Gráfico 5.27-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade

5.2.5.6. Drenos de seis metros com infiltração moderada

O aumento da extensão dos drenos continua a ser mais favorável para um cenário de menor permeabilidade com sistema de drenagem e infiltração, visto que existe uma redução de poropressão mais acentuada tanto com a colocação dos níveis superiores como dos inferiores. Neste caso, aumentar o comprimento dos drenos melhora a dissipação da poropressão, mas não compensa totalmente o efeito de uma baixa condutividade hidráulica como se verifica pelos gráficos 5.28 e 5.29, uma vez que o acúmulo das poropressões tem implicações diretas na posição da linha neutra favorecendo o aumento da zona ativa e consequentemente uma redução da estabilidade.

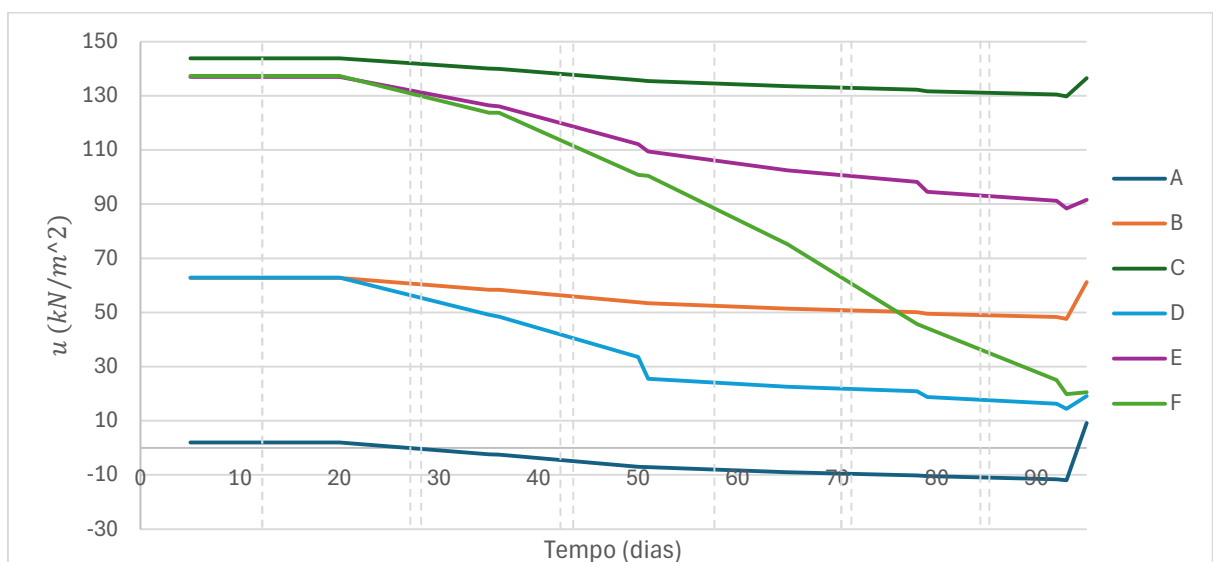


Gráfico 5.28- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade

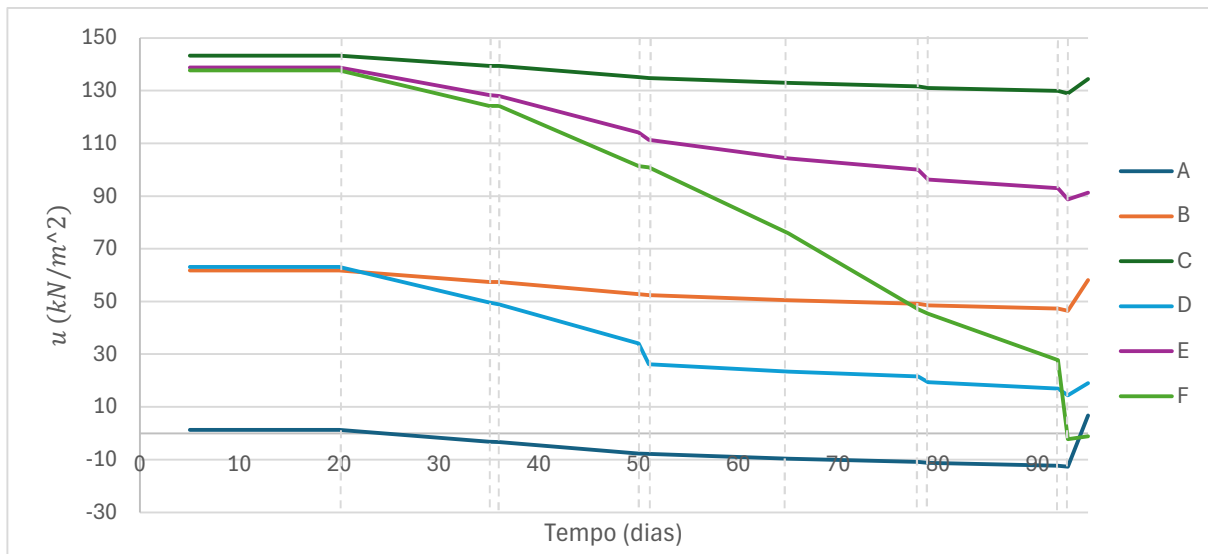


Gráfico 5.29- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade

5.2.5.7. Coesão

A coesão é um parâmetro fundamental para a pretendida análise. A sua manifestação varia conforme a natureza do solo e as condições hidráulicas presentes. De um modo geral, distinguem-se dois tipos de coesão efetiva que podem afetar a evolução da poropressão.

O primeiro tipo é a coesão efetiva característica dos solos cimentados ou consolidados, que está presente tanto na zona acima como abaixo do nível freático. Esta coesão é contínua no perfil do terreno e confere resistência permanente ao solo, independentemente da poropressão.

O segundo tipo é a coesão efetiva atribuída à sucção, que depende diretamente da variação da poropressão e é particularmente influente na zona não saturada acima do nível freático, onde a sucção eleva a resistência do solo, manifestando-se através da coesão efetiva devido à poropressão negativa.

Os resultados de seguida apresentados são consequência da hipótese de haver uma redução da coesão efetiva característica do solo para metade em todos os estratos e revelam a evolução da poropressão ao longo do tempo das simulações.

5.2.5.8. Faseamento da escavação com e sem infiltração

Neste caso de menor coesão, e comparando com o cenário inicial, o comportamento da poropressão mantém-se semelhante ao da condição base em termos de distribuição ao longo do tempo, tanto para o evento sem infiltração (Gráfico 5.30) como para o que conta com ela (Gráfico 5.31). No entanto, como a resistência ao corte global do solo foi reduzida, os mesmos valores de poropressão têm um impacto mais significativo na estabilidade, mesmo com infiltração moderada.

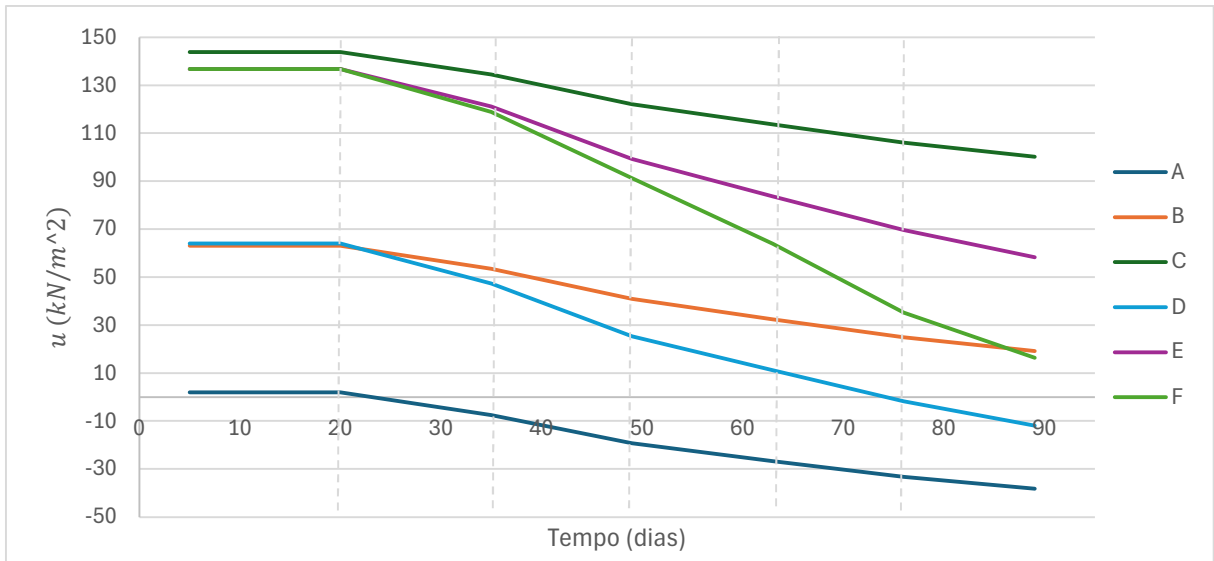


Gráfico 5.30-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação no cenário com menor coesão

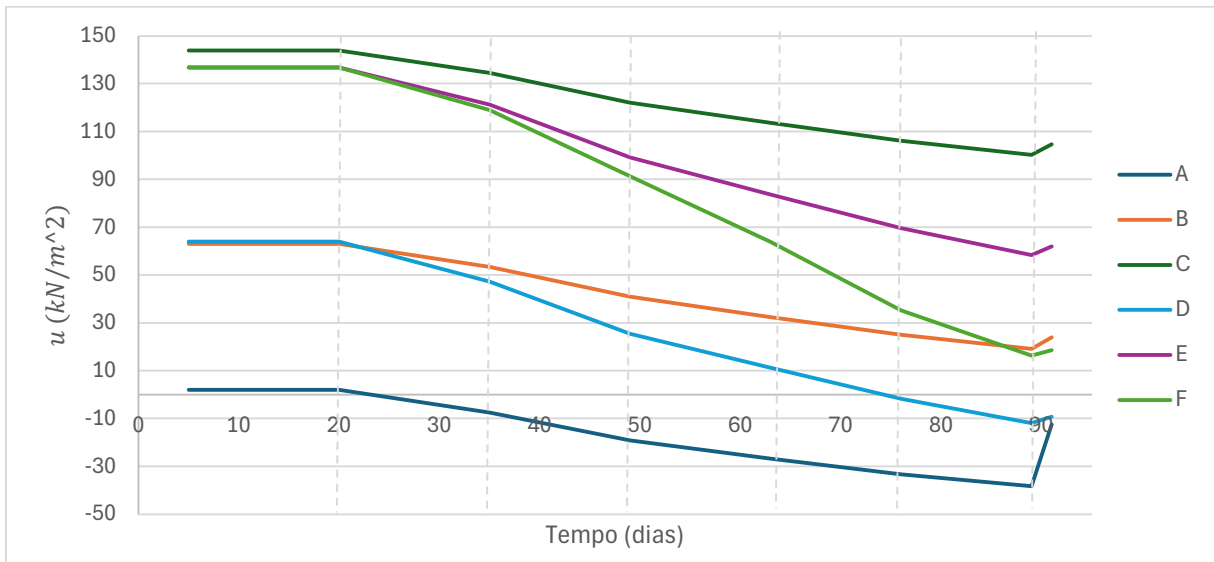


Gráfico 5.31-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada no cenário com menor coesão

5.2.5.9. Drenos de três metros sem infiltração

À semelhança do que se verificou no cenário base, os drenos mais curtos não conseguem captar as zonas mais profundas afetadas pela infiltração, existindo apenas uma redução parcial da poropressão nas zonas mais perto da zona de escavação, como se pode verificar pela observação dos gráficos que se seguem.

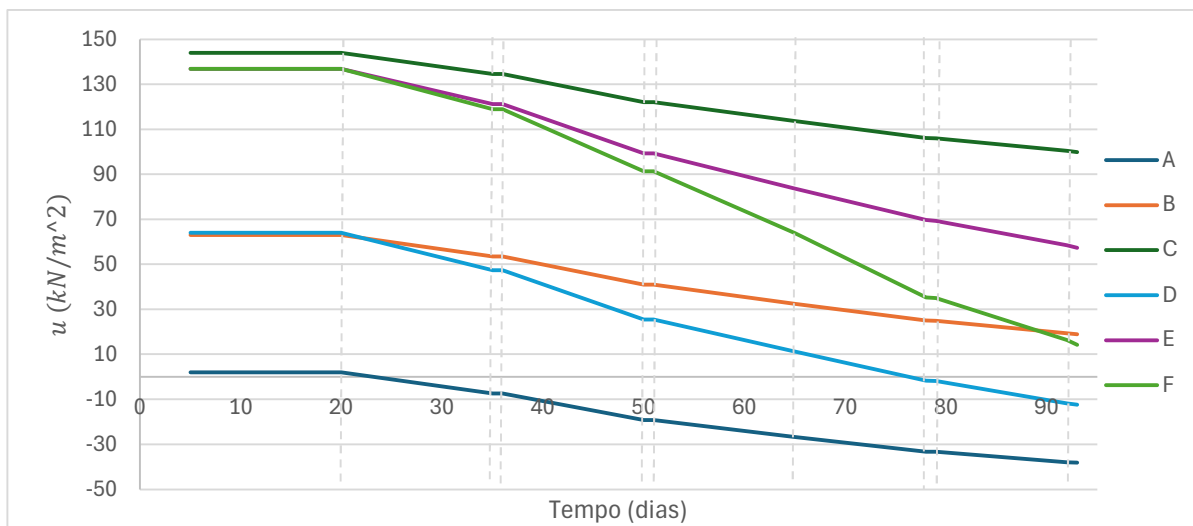


Gráfico 5.32- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis no cenário de menor coesão

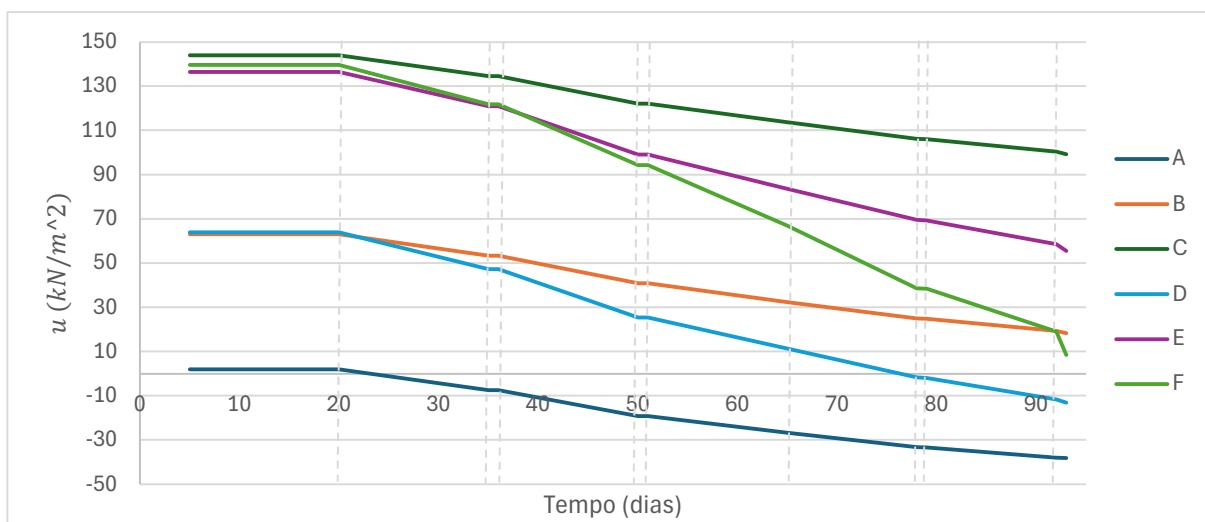


Gráfico 5.33- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis no cenário de menor coesão

5.2.5.10. Drenos de seis metros sem infiltração

Em conformidade com os outros cenários, os drenos de 6 metros em 5 níveis (Gráfico 5.35) mostram o melhor desempenho, contribuindo para a redução da poropressão de todos os pontos em estudo, por outro lado os de 4 níveis não têm um contributo tão eficaz (Gráfico 5.36).

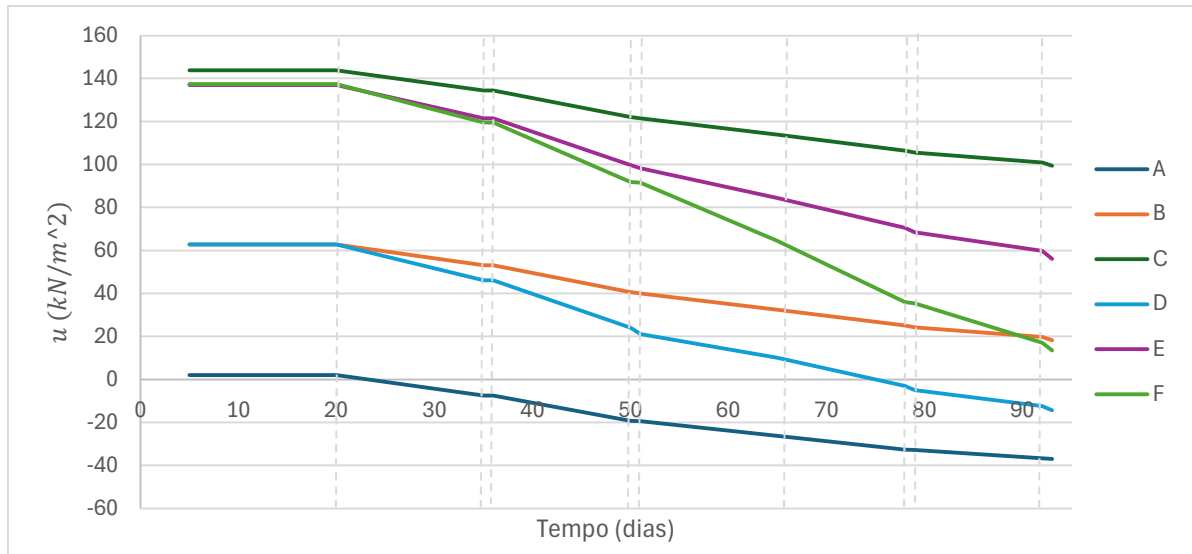


Gráfico 5.34-Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis no cenário de menor coesão

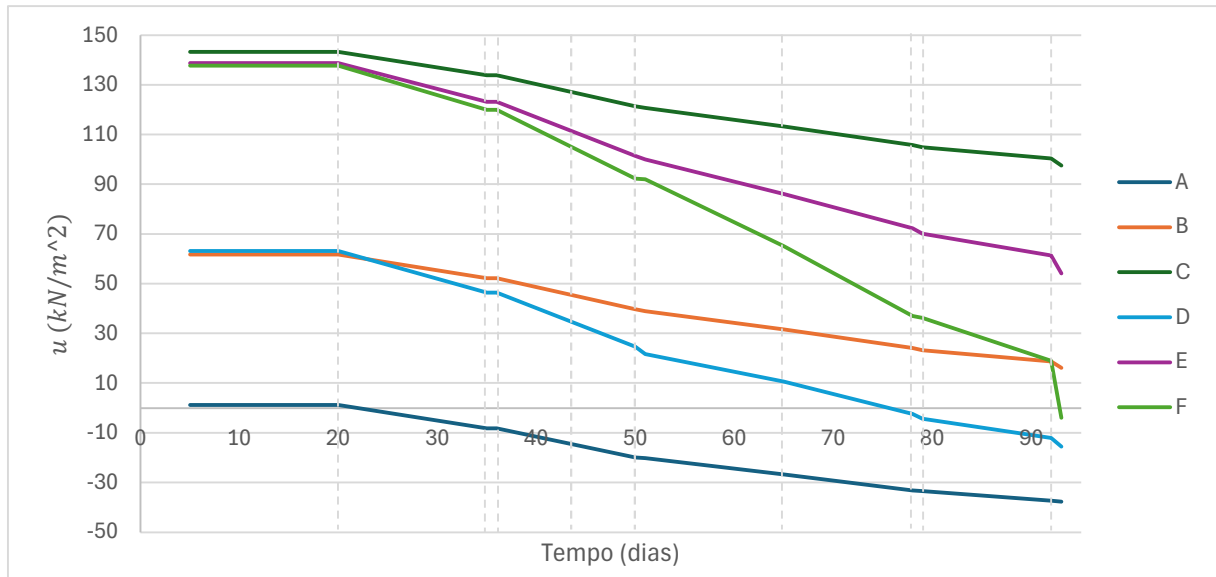


Gráfico 5.35- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis no cenário de menor coesão

5.2.5.11. Drenos de três metros com infiltração moderada

Como se verificou para a condição base, a instalação de drenos de 3 metros na presença de infiltração só contribui para a sua redução eficaz nos pontos perto da zona de escavação, zona esta perto do local de drenagem, especialmente nos drenos distribuídos em 4 níveis (Gráfico 5.36), o acréscimo de um nível de drenos é mais benéfico, mas não compensa em todos os pontos os efeitos da infiltração (Gráfico 5.37).

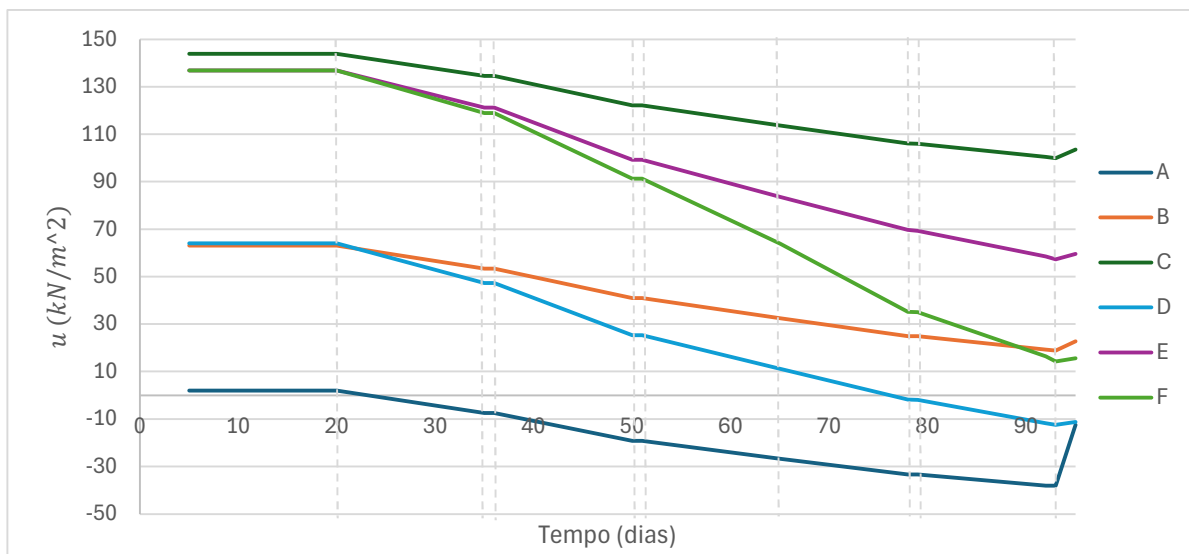


Gráfico 5.36- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão

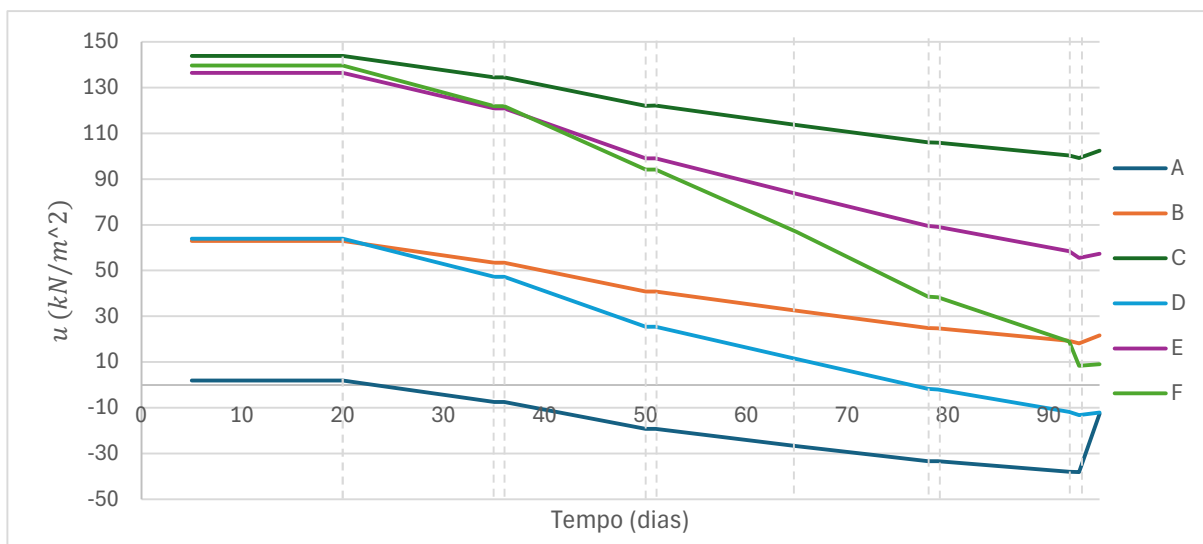


Gráfico 5.37- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão

5.2.5.12. Drenos de seis metros com infiltração moderada

Em comparação com o cenário base, e de todos os outros a opção de drenos de 6 metros em 5 níveis é a que melhor controla os aumentos da poropressão após a infiltração (Gráfico 5.39), não contribuindo apenas para o ponto mais próximo da superfície que é afetado pela subida do nível freático.

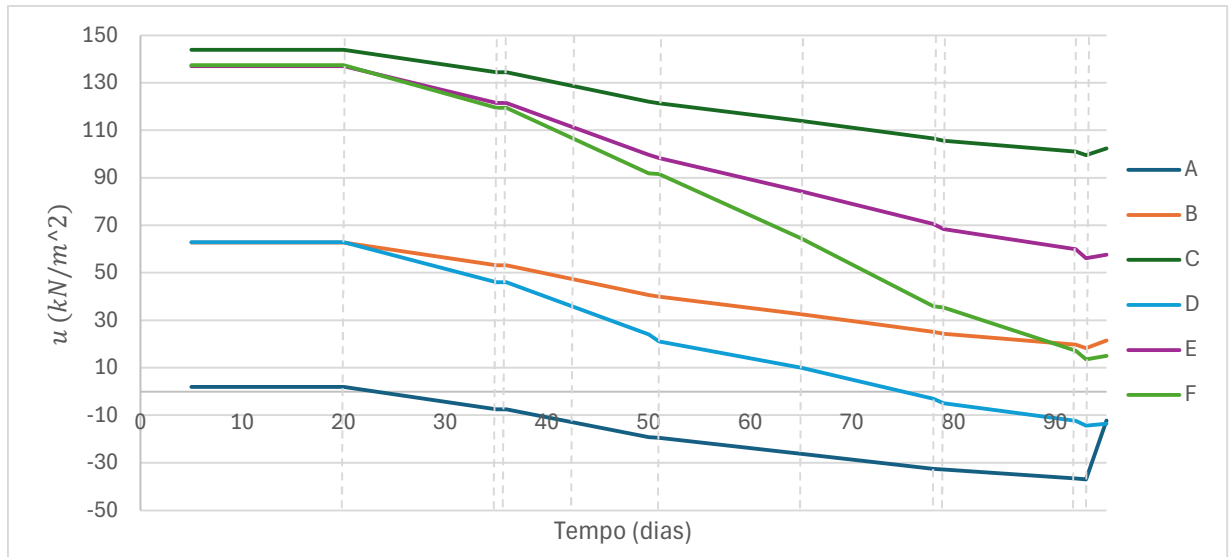


Gráfico 5.38- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão

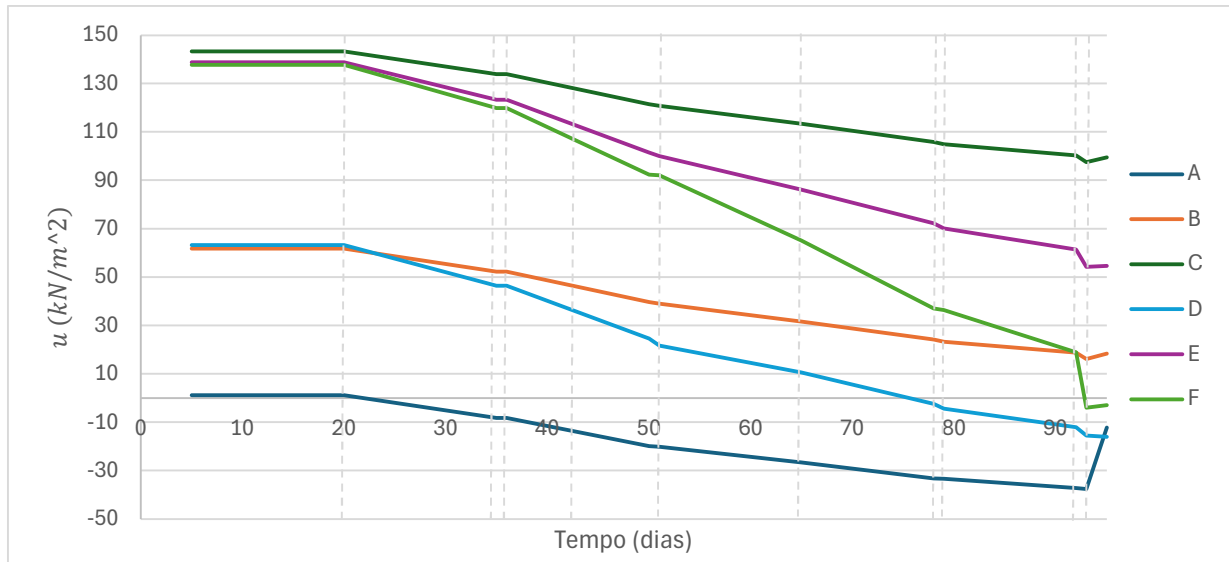


Gráfico 5.39- Evolução da poropressão ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada no cenário de menor coesão

5.2.6. DISCUSSÃO CRÍTICA

A análise da evolução das poropressões ao longo do tempo mostra que a sua variação é altamente sensível à presença de água, sendo fortemente influenciada pela intensidade da precipitação, pelas propriedades hidráulicas dos solos e pela presença (ou ausência) de sistemas de drenagem. A elevação das poropressões em camadas específicas pode desencadear mecanismos de instabilização progressiva, mesmo em situações onde o fator de segurança inicial é elevado, uma vez que, a acumulação de poropressões reduz a resistência efetiva do solo ao corte. Esta redução compromete gradualmente o equilíbrio interno, especialmente em materiais pouco permeáveis, onde a dissipação da poropressão é lenta, favorecendo fenômenos como a formação de superfícies de rotura e o deslizamento progressivo ao longo de planos de fraqueza.

A análise comparativa entre os diferentes cenários evidencia a importância crítica da configuração do sistema de drenagem, na redução da poropressão, particularmente em contextos onde as propriedades do solo foram degradadas.

A diminuição da permeabilidade promove acumulação severa de poropressão, sendo necessária uma drenagem mais profunda e em maior número, para alcançar resultados mais eficazes. No entanto, estas soluções implicam um aumento dos custos de execução, que pode ser evitado através de uma caracterização rigorosa da permeabilidade dos solos, permitindo otimizar o tipo, a profundidade e a disposição dos sistemas de drenagem.

A diminuição da coesão efetiva não altera a evolução da poropressão, já que o que condiciona a rede de fluxo é a permeabilidade que em medida, pouco condicionada pela parte cimentícia. No entanto, a redução da coesão aumenta o impacto dos valores da poropressão mesmo que moderados, exigindo igualmente sistemas de drenagem robustos para mitigar os riscos.

Em todos os casos os drenos de 6 metros com 5 níveis foram mais eficazes a reduzir a poropressão nas zonas críticas, tanto antes como após a infiltração.

Este conjunto de resultados indica que, em taludes sujeitos a infiltração intensa ou prolongada, a eficácia da drenagem depende diretamente da sua profundidade e extensão, especialmente quando o solo possui características que favorecem a acumulação de água ou perda de resistência.

5.3. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA SUCÇÃO COM A PROFUNDIDADE DE ESCAVAÇÃO

A sucção matricial, resultante da diferença entre a pressão do ar e a pressão da água nos poros do solo, representa uma componente fundamental no comportamento mecânico de solos não saturados. Esta sucção contribui para a coesão aparente e, por conseguinte, para a resistência ao corte. A sua variação ao longo do tempo e com a infiltração de água da chuva influencia significativamente a estabilidade dos taludes, especialmente em materiais de baixa coesão natural.

Tal como na análise da poropressão, a evolução da sucção foi acompanhada para seis pontos distintos do perfil do talude, distribuídos por diferentes profundidades. Esta abordagem permitiu compreender como a frente de humidade se propaga verticalmente no maciço e quais os efeitos da escavação e da precipitação simulada sobre o regime de sucção.

Para além disso, a análise da evolução da sucção ao longo do tempo permite complementar a interpretação dos resultados obtidos com a evolução da poropressão. Ambas as variáveis são fundamentais para entender o comportamento do talude em condições não saturadas, especialmente quando sujeito a infiltrações ou a intervenções de drenagem. A sucção matricial está diretamente relacionada ao teor em água do solo, e, portanto, à sua capacidade resistente. Quando ocorre infiltração, espera-se uma diminuição da sucção e, consequentemente, uma redução da resistência ao corte do solo.

Os gráficos a representar de seguida vão apresentar a evolução da sucção ao longo do tempo das simulações.

5.3.1. COMPORTAMENTO DA SUCÇÃO EM CONDIÇÕES SECAS E COM INFILTRAÇÃO

Com o avanço das fases de escavação, registou-se um ligeiro aumento da sucção nas zonas mais próximas da superfície escavada, resultado da descompressão do maciço e da alteração do regime de tensões. No entanto, a sucção manteve-se globalmente elevada nos pontos acima do nível freático, até à introdução da infiltração no modelo (Gráfico 5.40).

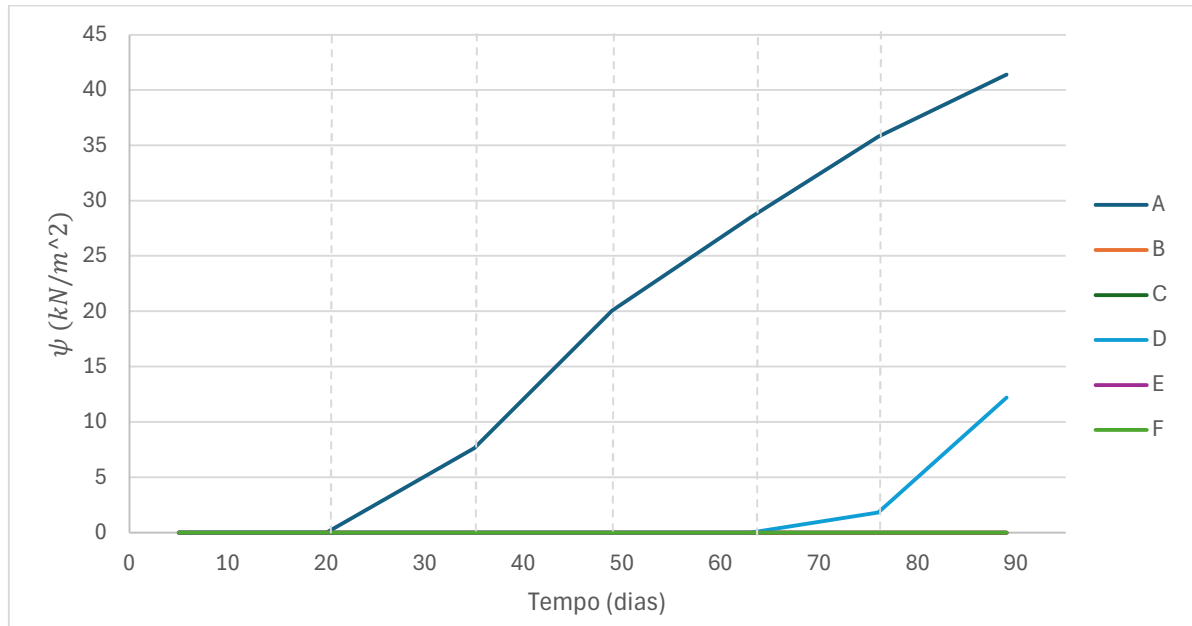


Gráfico 5.40- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação

Nas fases iniciais, antes da ocorrência de precipitação, os valores de sucção mostram-se elevados nas camadas superiores do perfil, indicando um estado de não saturação pronunciado. Este comportamento é típico de materiais expostos à atmosfera e sujeitos a evaporação, particularmente em solos mais finos como siltes ou solos residuais graníticos alterados.

O gráfico seguinte evidencia a perda acentuada de sucção mesmo com infiltração moderada, que é mais marcada nos pontos próximos do nível freático (A e D), refletindo a subida de água no maciço, este comportamento é coerente com o observado na evolução da poropresão, onde havia um aumento desses valores após a infiltração.

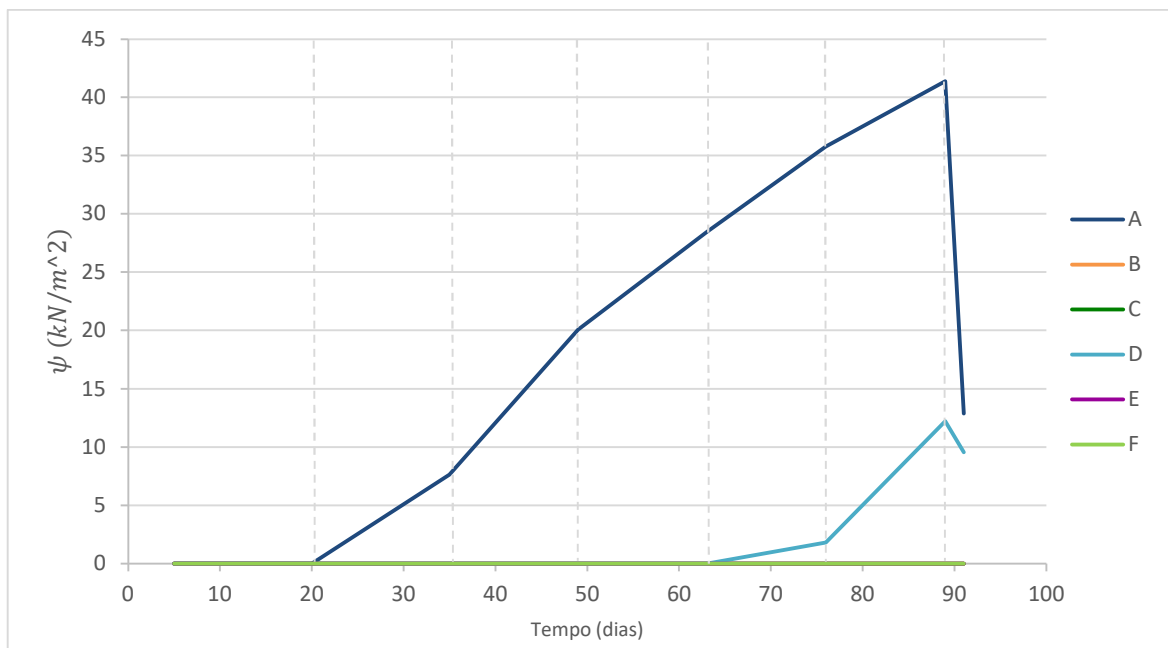


Gráfico 5.41- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada

5.3.2. INFLUÊNCIA DOS DRENOS NA CONSERVAÇÃO DA SUCÇÃO

Como se verificou na avaliação da evolução da poropressão a melhor opção de drenagem é a de drenos de 6 metros distribuídos em 5 níveis, estando a evolução da sucção para esse caso representada nos gráficos 5.42 e 5.43. A introdução de drenos apresenta um efeito significativo na manutenção da sucção nos diferentes níveis de profundidade. Verifica-se que os drenos reduzem em parte o impacto da infiltração, sobretudo quando são mais extensos e distribuídos em mais um nível, assim a sucção mantém-se mais elevada e estável ao longo da escavação. Este efeito demonstra a eficiência do sistema de drenagem em preservar a condição não saturada do solo, reduzindo a perda de resistência por subida do nível freático.

Comparando diferentes geometrias de drenos, verificou-se que as configurações com maior cobertura vertical e maior extensão longitudinal mantiveram níveis mais estáveis de sucção em profundidade, contribuindo assim para uma maior segurança global do talude.

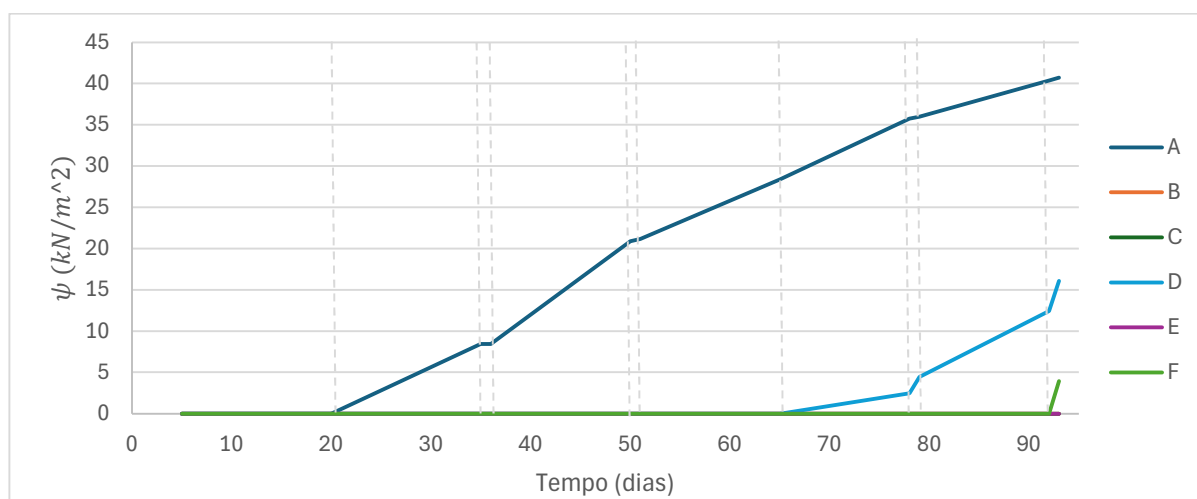


Gráfico 5.42-Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

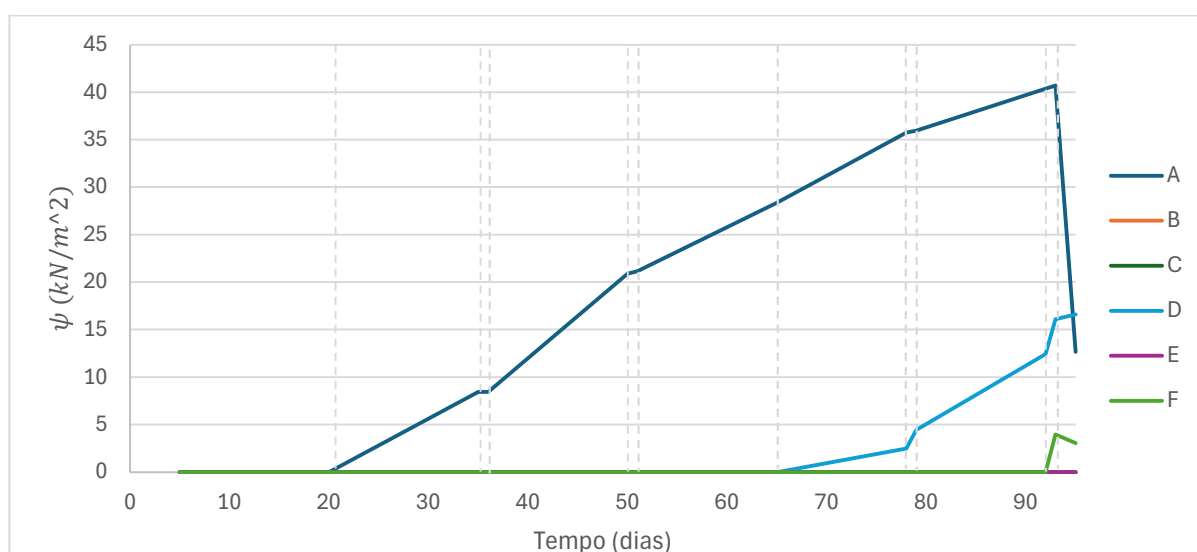


Gráfico 5.43- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada

5.3.3. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA SUCÇÃO

A variação da precipitação tem um impacto direto na sucção matricial do solo, afetando a sua resistência e, por conseguinte, a estabilidade dos taludes. A simulação de diferentes cenários de infiltração permite perceber o comportamento do solo face a diferentes intensidades e frequências de precipitação, bem como avaliar a eficácia das soluções de drenagem implementadas.

O gráfico 5.44 representa a evolução da sucção ao longo do tempo com a instalação de drenagem, sujeita posteriormente a uma infiltração mensal. Verifica-se que, com a progressão da escavação, a sucção aumenta significativamente, especialmente no ponto A, como reflexo do alívio das tensões e da manutenção do estado não saturado. Após o início da infiltração, nota-se uma variação acentuada dos valores de sucção, com oscilações que refletem a resposta do solo à variação do nível freático, parcialmente mitigada pela presença dos drenos. Não foi possível representar graficamente o cenário com a precipitação mensal sem drenagem, uma vez que o programa não convergiu, reforçando, indiretamente a instabilidade associada à ausência de medidas de controlo hidráulico.

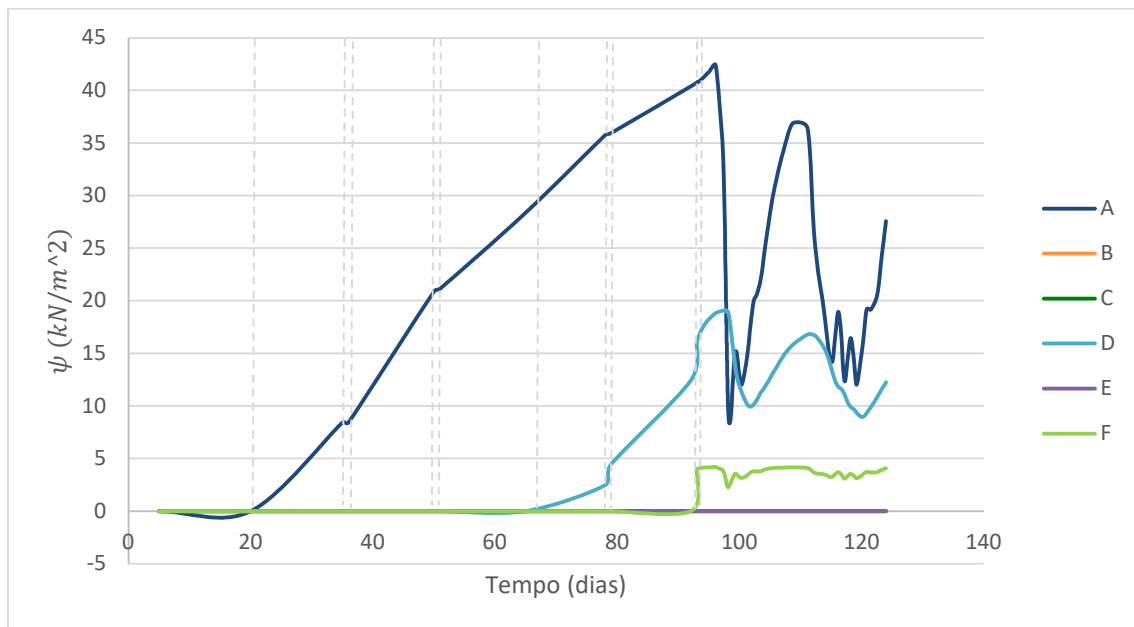


Gráfico 5.44- Evolução da sucção ao longo do tempo de simulação para o faseamento de escavação com drenos de 6m em 5 níveis e posterior infiltração mensal

Os gráficos apresentados de seguida são a representação da evolução da sucção ou longo do tempo de escavação e posterior simulação da precipitação máxima diária, o gráfico 5.45 expressa a evolução sem presença de drenagem e o gráfico 5.46 mostra a evolução com instalação drenos de 6 metros distribuídos em 5 níveis.

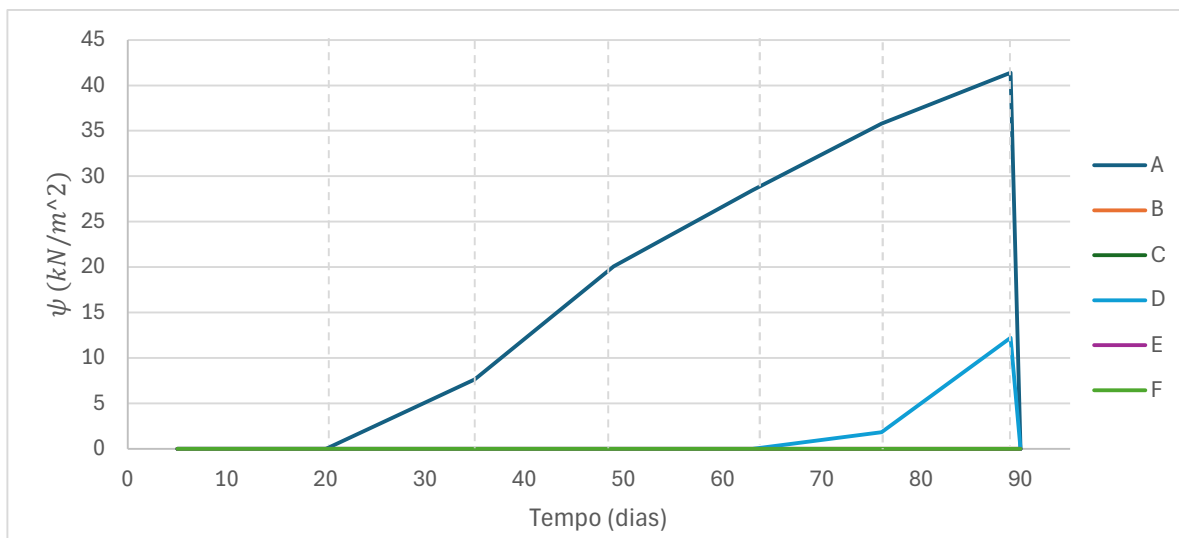


Gráfico 5.45- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração máxima diária

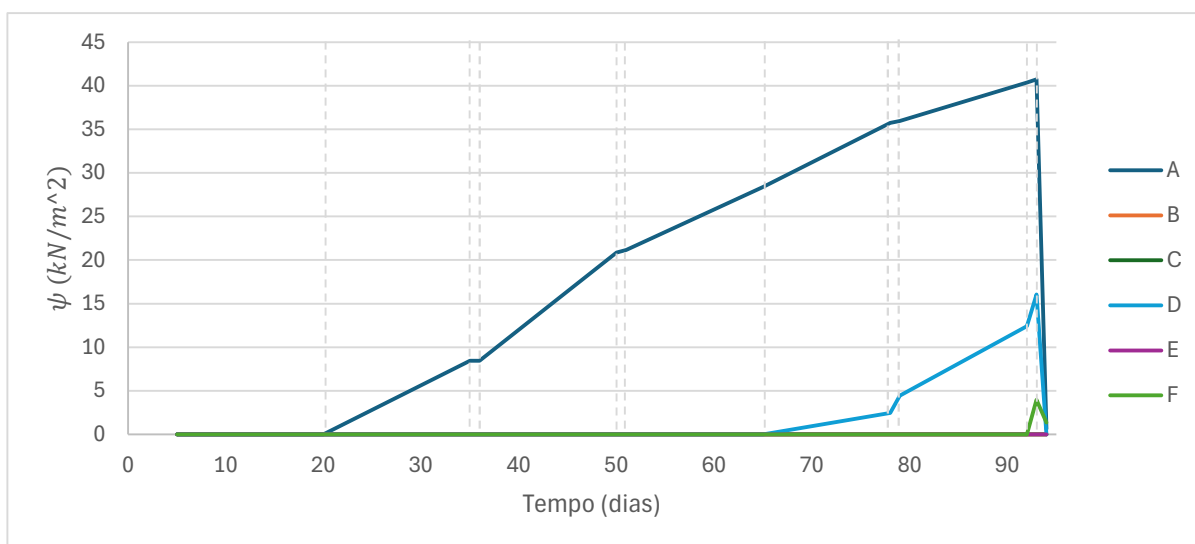


Gráfico 5.46- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração máxima diária

A comparação entre estes gráficos mostra claramente que, na ausência de drenagem, a sucção reduz-se de forma acentuada nas zonas mais profundas, especialmente perto da zona de infiltração, a perda de sucção para este caso de precipitação é mais acentuada do que para o cenário de precipitação moderada, mostrando que a precipitação mais intensa e de menor duração contribui mais para a perda de sucção em pontos consideravelmente afastados da zona de infiltração, como o ponto D.

O cenário com drenagem revela-se mais estável. A sucção mantém-se em níveis mais elevados ao longo de toda a profundidade, inclusive após o início da infiltração, confirmando a eficiência dos drenos na limitação da propagação da água infiltrada e na preservação das condições de resistência do talude.

5.3.4. EFEITOS DA DIMINUIÇÃO DA PERMEABILIDADE E COESÃO NA SUÇÃO

5.3.4.1. Permeabilidade

Através da análise dos gráficos 5.47 e 5.48 pode confirmar-se que os valores de sucção para um estrato menos permeável do que o do cenário base são bastante mais reduzidos, passando o extremo do valor no ponto A de 41.40 kN/m^2 para 13.27 kN/m^2 . A redução da permeabilidade, utilizada como medida conservadora, tem um efeito direto sobre a redistribuição de água no interior do maciço. Ao dificultar o escoamento da água infiltrada, promove a acumulação de água nas zonas superiores do perfil, especialmente junto à superfície, esta acumulação local de água conduz a um aumento do grau de saturação nessas regiões, o que por sua vez se traduz numa redução da sucção matricial.

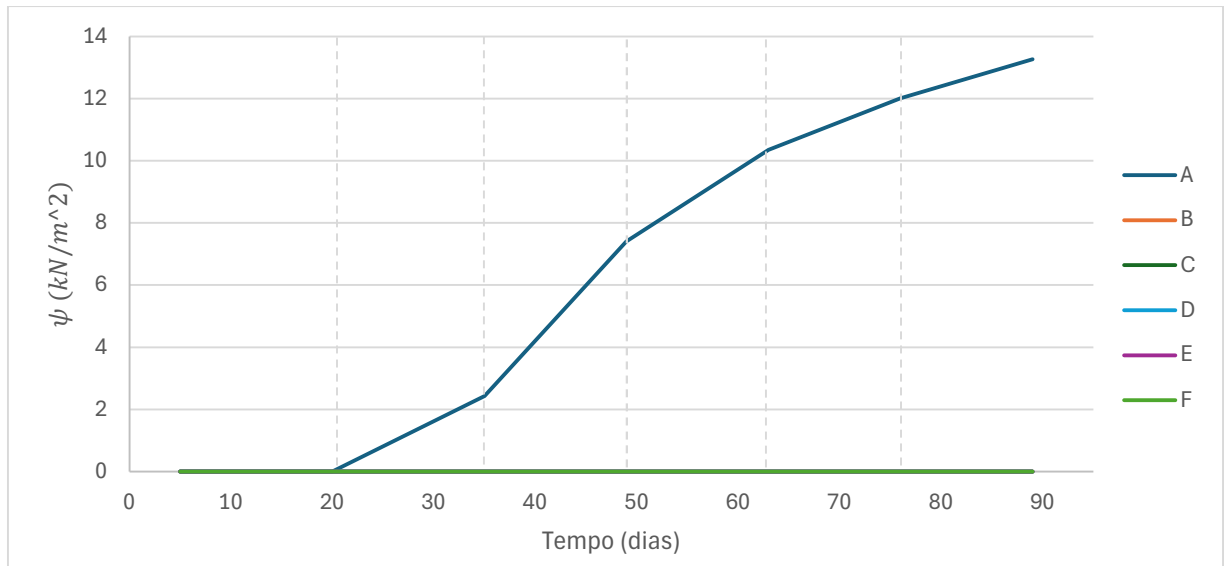


Gráfico 5.47-Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação no cenário de menor permeabilidade

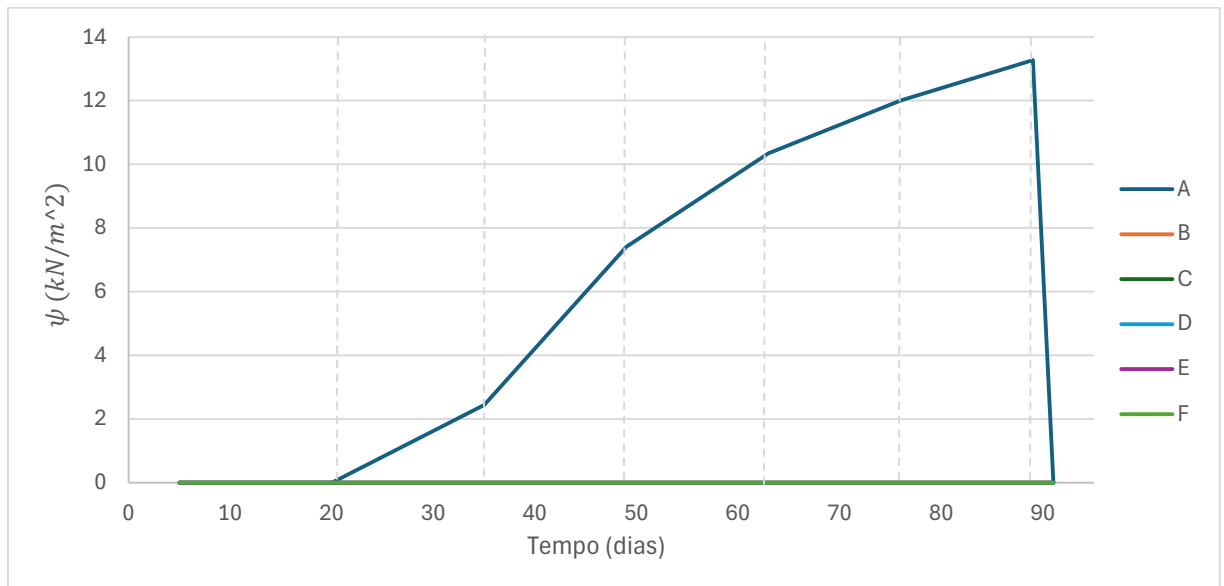


Gráfico 5.48- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade

Assim, embora a água infiltre mais lentamente, a sua drenagem torna-se um pouco menos eficiente, favorecendo a persistência de condições húmidas em determinadas zonas. Este comportamento é

evidenciado pela redução mais acentuada da sucção observada nos gráficos relativos aos cenários com menor permeabilidade, refletindo a maior retenção de água e a menor capacidade de o solo recuperar o estado não saturado após a infiltração.

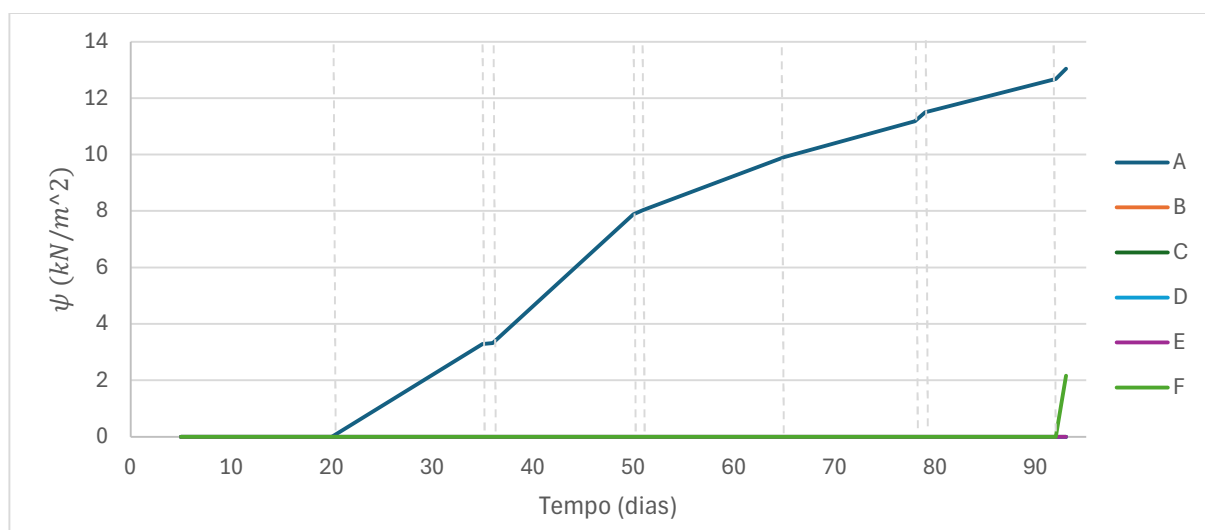


Gráfico 5.49- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis para o cenário de menor permeabilidade

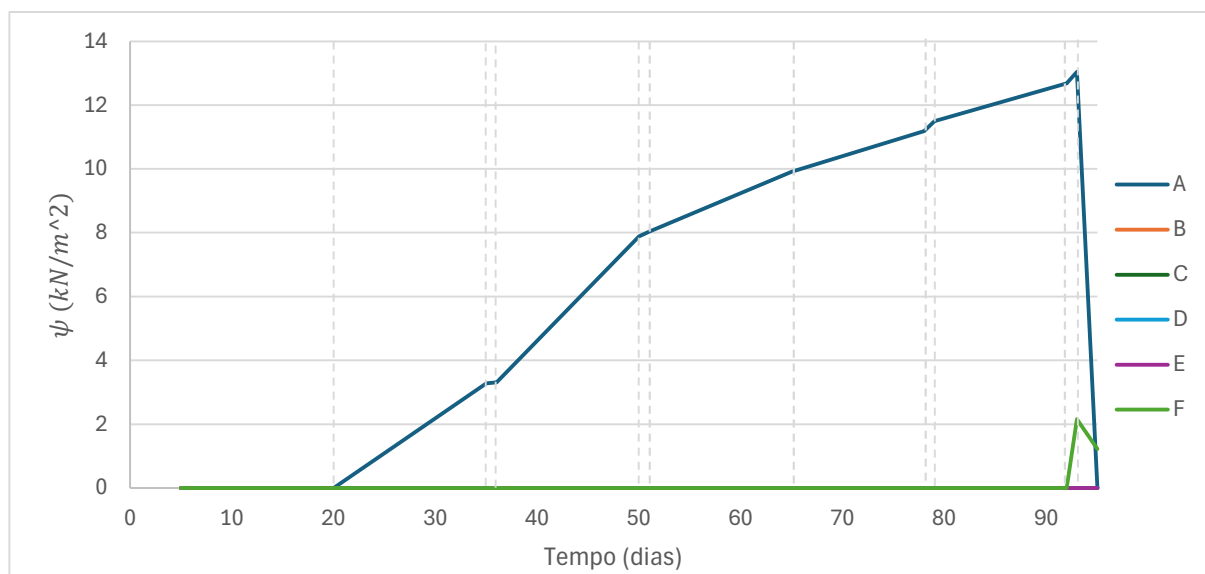


Gráfico 5.50- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade

A sensibilidade da sucção à infiltração revelou-se mais acentuada em materiais de baixa permeabilidade (Gráfico 5.50), onde a água tende a acumular-se acima das interfaces, provocando uma redução localizada da sucção em zonas-chave para a estabilidade. Quando estes materiais apresentam também baixos valores de coesão, o risco de perda de resistência torna-se mais significativo, podendo conduzir a mecanismos de rotura progressiva.

O facto de se ter reduzido a permeabilidade favoreceu a um maior acumulo de água na superfície do talude (Figura 5.3) e uma subida do nível freático mais acentuada na presença de precipitação.

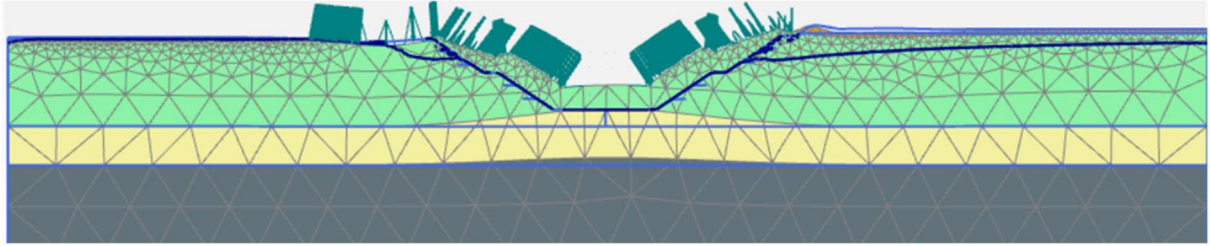


Figura 5.3- Representação do nível freático e do acumulo de água à superfície após um evento infiltração moderada para o cenário de menor permeabilidade

5.3.4.2. Coesão

Nos cenários com solos menos coesivos, a perda de sucção tem maior impacto, a persistência de água infiltrada a longo prazo pode comprometer a estabilidade se não forem implementadas soluções de drenagem adequadas.

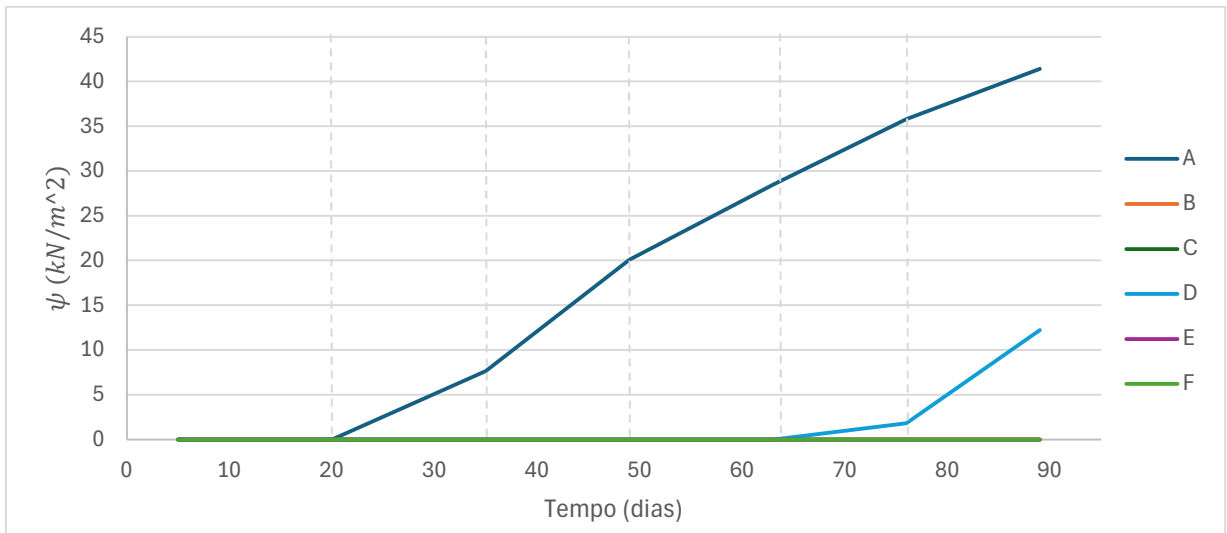


Gráfico 5.51- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação para o cenário de menor coesão

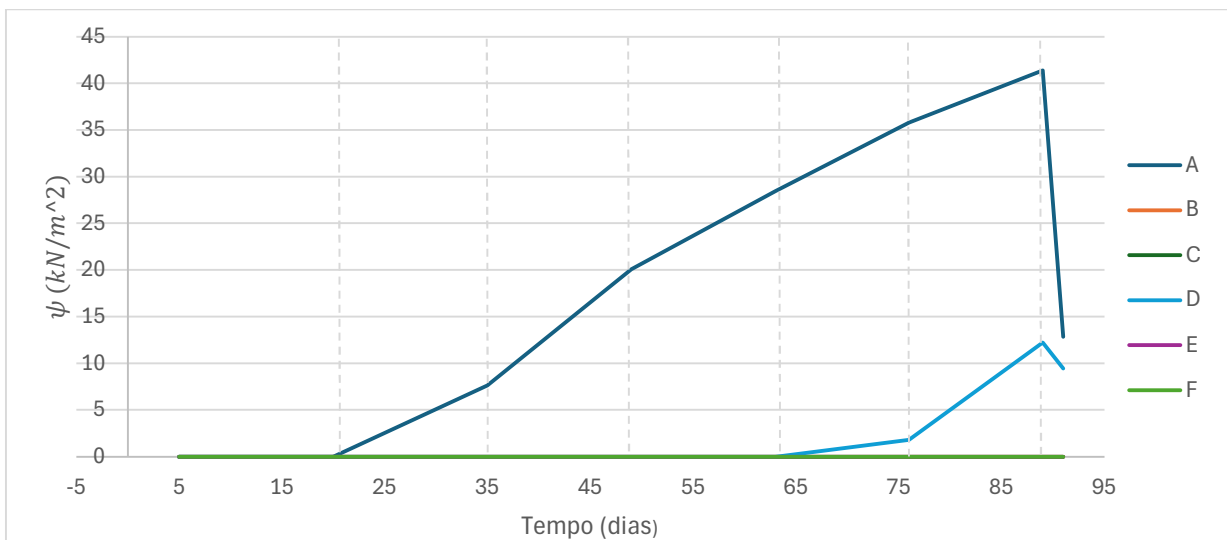


Gráfico 5.52- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação e posterior infiltração moderada para o cenário de menor coesão

A análise do cenário com redução da coesão do solo mostrou que esta alteração não teve impacto significativo nos valores da sucção quando comparado com o cenário base (Gráficos 5.51 e 5.52). Esta condição deve-se ao facto de a coesão ser um parâmetro mecânico, associado à resistência ao corte do solo, e não afetar diretamente as suas propriedades hidráulicas. Sendo assim, à semelhança do cenário base os sistemas de drenagem são uma boa opção para melhorar a sucção do solo (Gráfico 5.53) mesmo em condições de precipitação (Gráfico 5.54).

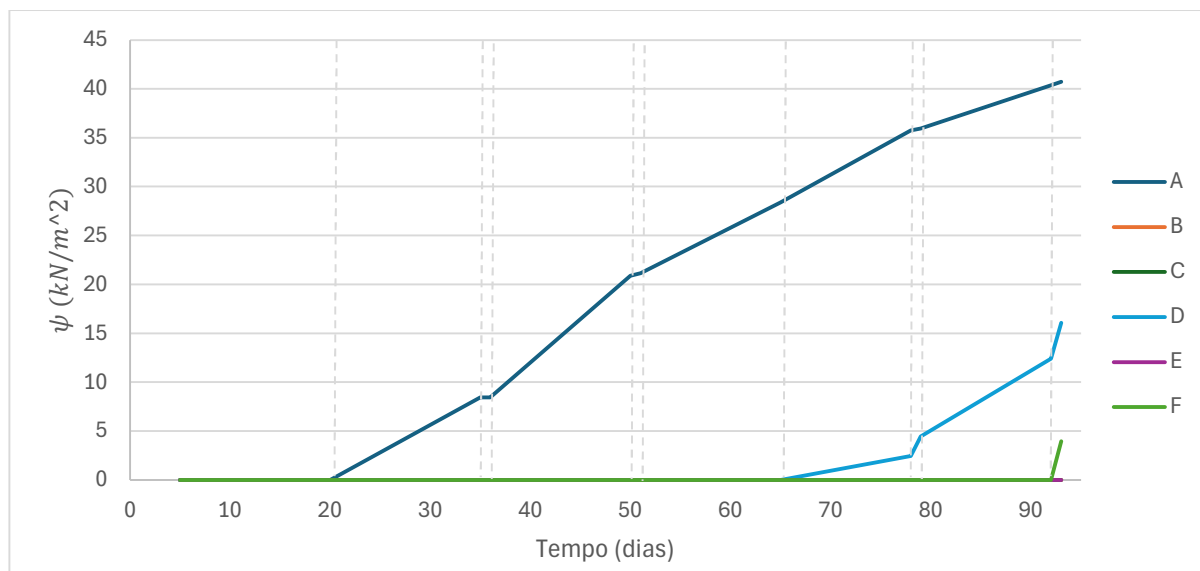


Gráfico 5.53- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis para o cenário de menor coesão

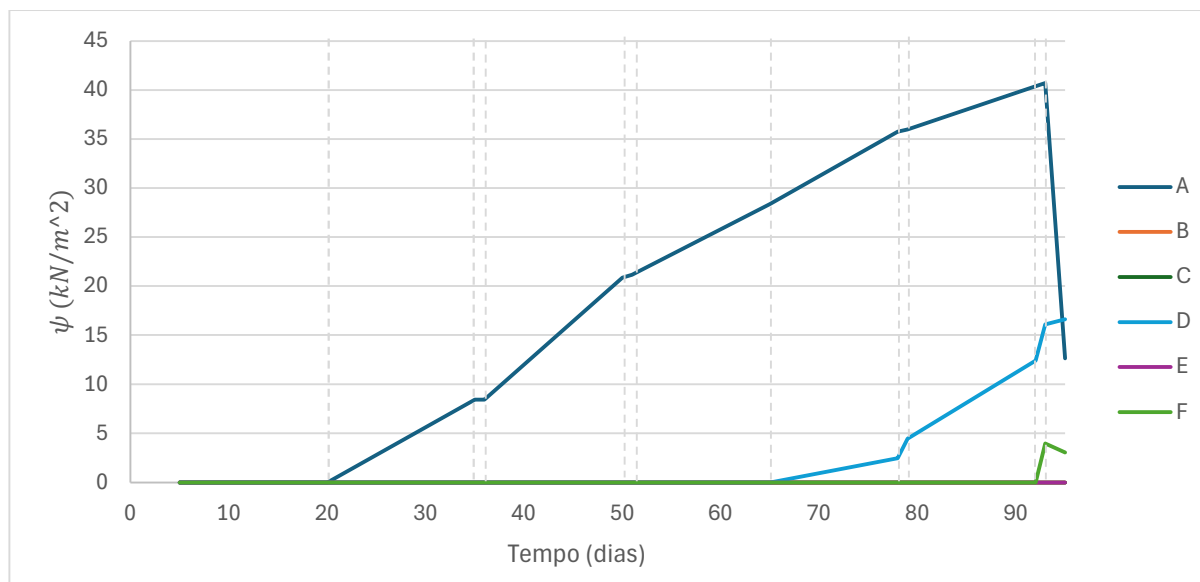


Gráfico 5.54- Evolução da sucção ao longo do tempo de escavação com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração moderada para o cenário de menor coesão

5.3.5. DISCUSSÃO CRÍTICA

A análise da evolução da sucção confirmou a sua importância como parâmetro determinante na estabilidade de taludes em solos não saturados. A variação deste parâmetro está intrinsecamente ligada à intensidade e duração da precipitação, à capacidade de infiltração do solo e à eficiência dos sistemas de drenagem.

Esta análise confirma os padrões observados na evolução da poropressão. A infiltração provoca uma redução significativa da sucção, sobretudo nos níveis inferiores, o que contribui para a desestabilização do talude. No entanto, a instalação de drenos demonstrou ser eficaz na mitigação desse efeito, mantendo a sucção e, consequentemente a resistência do solo. A utilização de parâmetros conservadores, como a redução da permeabilidade, também revelou um papel relevante na contenção da humidade, reforçando a importância do controlo hidráulico na segurança do talude. Quanto à intensidade da precipitação, pode dizer-se que nos cenários com chuva intensa, os valores de sucção reduziram-se até se anularem localmente, indicando transição para condições próximas da saturação. Esta perda de sucção traduz-se diretamente numa redução da coesão aparente e da resistência ao corte, aumentando o risco de instabilidade do talude.

5.4. EVOLUÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA AO LONGO DO TEMPO

O fator de segurança é o principal indicador da estabilidade global de um talude, expressando a razão entre as resistências disponíveis e os esforços mobilizados ao longo de uma possível superfície de rotura. Neste estudo, a sua evolução foi acompanhada ao longo das fases de escavação e das diferentes condições simuladas, permitindo avaliar o impacto da infiltração, das soluções de drenagem e da variação dos parâmetros geotécnicos na segurança do talude. O FS foi calculado automaticamente pelo *Plaxis 2D* através do método de redução de resistência (*Strength Reduction Method*).

Para além da análise pontual do fator de segurança, a sua evolução ao longo do tempo revela-se particularmente relevante em estudos que envolvem a infiltração de água. Uma vez que a precipitação altera gradualmente as poropressões no solo, refletindo-se na redução da sucção e, consequentemente, na diminuição da resistência ao corte, é essencial acompanhar como estas variações influenciam a estabilidade global do talude. Assim, o gráfico de evolução do fator de segurança ao longo do tempo permite identificar os momentos críticos em que o talude se aproxima de condições de instabilidade, fornecendo uma visão durante e após os eventos de chuva. Este tipo de análise é fundamental para a avaliação da eficácia de soluções de drenagem e previsões de possíveis movimentos tardios.

5.4.1. ESCAVAÇÃO FASEADA COM E SEM INFILTRAÇÃO

Nos cenários iniciais, que consideram apenas o faseamento construtivo sem precipitação, os valores de FS mantiveram-se elevados em todas as fases de escavação, com valores geralmente superiores a 1,5. Este comportamento indica um estado de estabilidade global positivo, mesmo após a remoção de solo nas camadas superiores, o que indica que não são necessárias medidas adicionais de reforço como betão projetado ou pregagens.

A escavação sequencial provocou uma ligeira redução do FS a cada fase, refletindo o alívio de tensões e a modificação da geometria do talude. No entanto, a ausência de fatores externos como infiltração ou variações de parâmetros hidráulicos impediu que a segurança fosse significativamente afetada nesta fase.

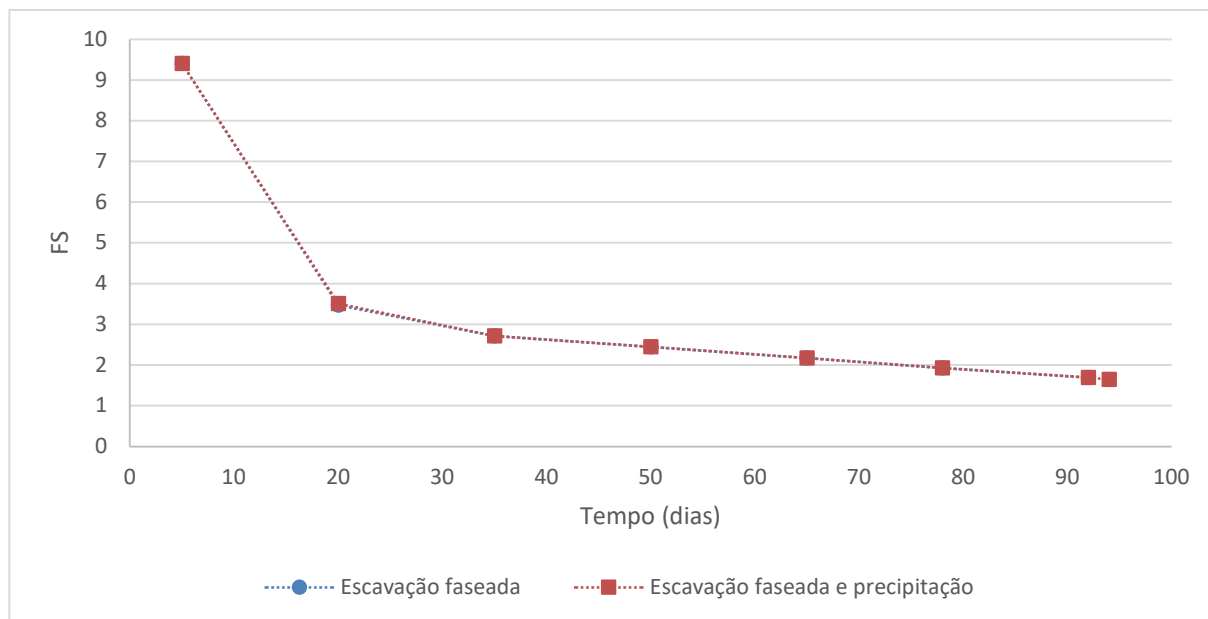


Gráfico 5.55- Evolução do fator de segurança no tempo para a condição base com e sem infiltração

A introdução de precipitação na superfície do talude resultou numa redução do FS no fim da escavação (após os 89 dias) (Gráfico 5.55). A infiltração da água alterou as condições de saturação dos solos, reduziu a sucção matricial e promoveu o aumento da poropressão, como observado nas secções anteriores.

Esta combinação de efeitos conduziu a uma redução da resistência ao corte e, por conseguinte, a uma diminuição da estabilidade do talude. A localização da superfície de falha simulada como a apresentada na figura 5.4 coincide com zonas de acumulação de água ou transição litológica entre camadas com diferentes permeabilidades.

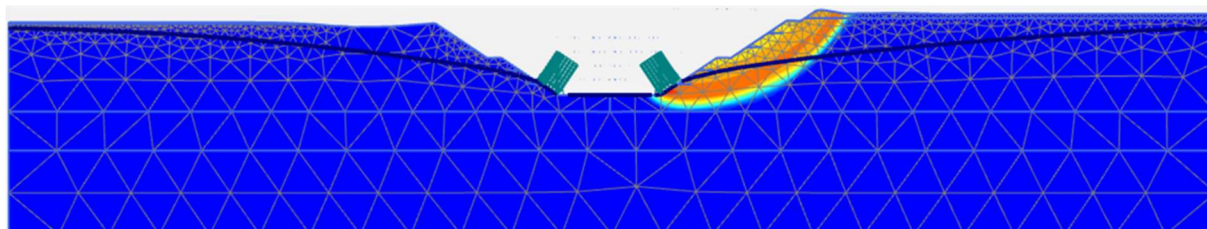


Figura 5.4- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação moderada

5.4.2. INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM SEM PRECIPITAÇÃO

A implementação de sistemas de drenagem em cenários sem precipitação permite avaliar de forma isolada o impacto destas soluções na estabilidade do talude após o faseamento construtivo. Esta análise é particularmente relevante para verificar se a instalação de drenos pode melhorar a resposta do talude apenas devido à redistribuição interna da poropressão provocada pela escavação, mesmo na ausência de infiltração superficial.

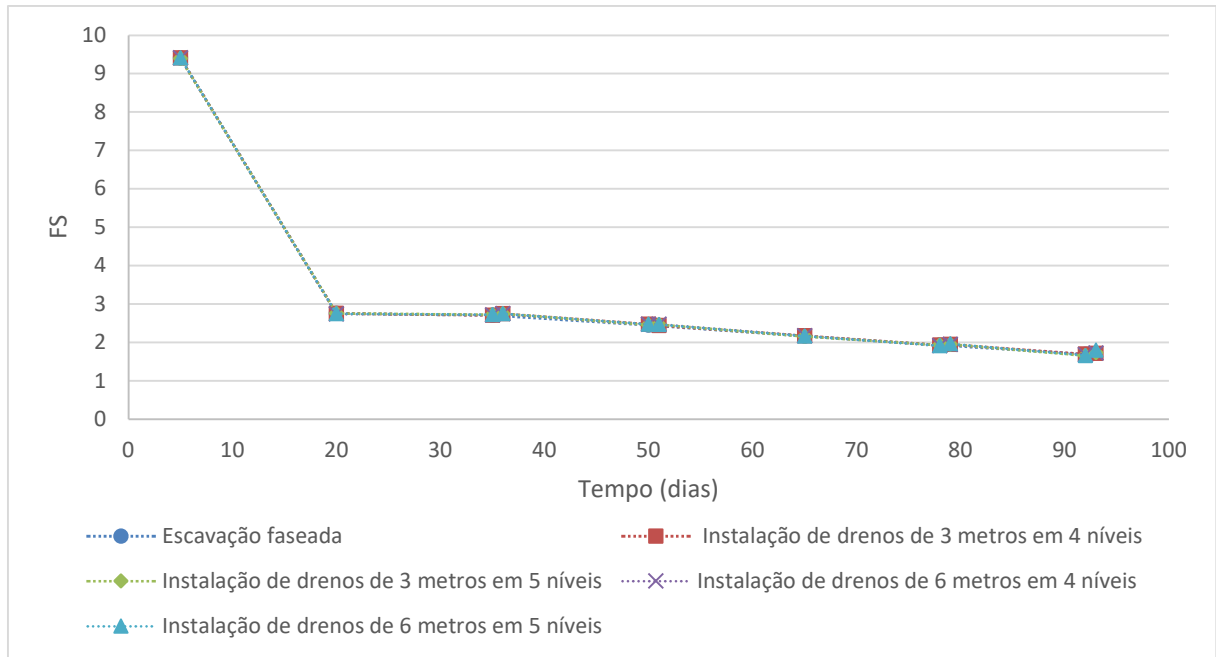


Gráfico 5.56- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem

Os resultados indicam que, após a escavação faseada, os valores de fator de segurança (FS) mantêm-se elevados em todos os cenários com drenagem, evidenciando um estado de estabilidade global. A introdução de drenos inclinados mostrou-se eficaz na atenuação das pequenas reduções de FS provocadas pela escavação, reforçando a resistência global do talude mesmo sem a presença de água adicional.

No gráfico 5.56 apresenta-se a evolução do FS ao longo do tempo para diferentes geometrias de drenagem. Observa-se que:

- A instalação de drenos de 3 metros em 4 e 5 níveis conduziu a um aumento discreto do FS em comparação com o cenário sem drenagem, sendo que para o caso dos 5 níveis proporcionou o aumento do FS de 1.649 (sem drenagem) para 1.729 (com drenagem de 3 metros em 5 níveis)
- A aplicação de drenos de 6 metros, sobretudo no cenário com 5 níveis, resultou no maior incremento de FS, atingindo um valor final de 1.797, face aos 1.649 obtidos no cenário base sem drenagem.

Este aumento do FS reflete a melhoria nas condições de drenagem interna do talude, promovida pela instalação dos drenos, que permite a dissipação de eventuais poropressões residuais e a manutenção de condições não saturadas ao longo do perfil. Embora não exista infiltração externa, a própria escavação pode induzir redistribuições de tensões e humidade internas que justificam a eficácia dos drenos.

5.4.3. INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM COM PRECIPITAÇÃO

A análise da eficácia dos sistemas de drenagem sob condições de precipitação permite avaliar a sua real capacidade de mitigar os efeitos negativos da infiltração na estabilidade do talude. Nos cenários simulados com chuva, observou-se uma redução significativa do fator de segurança (FS), consequência direta do aumento da poropressão e da perda de sucção, fenómenos que comprometem a resistência ao corte dos solos.

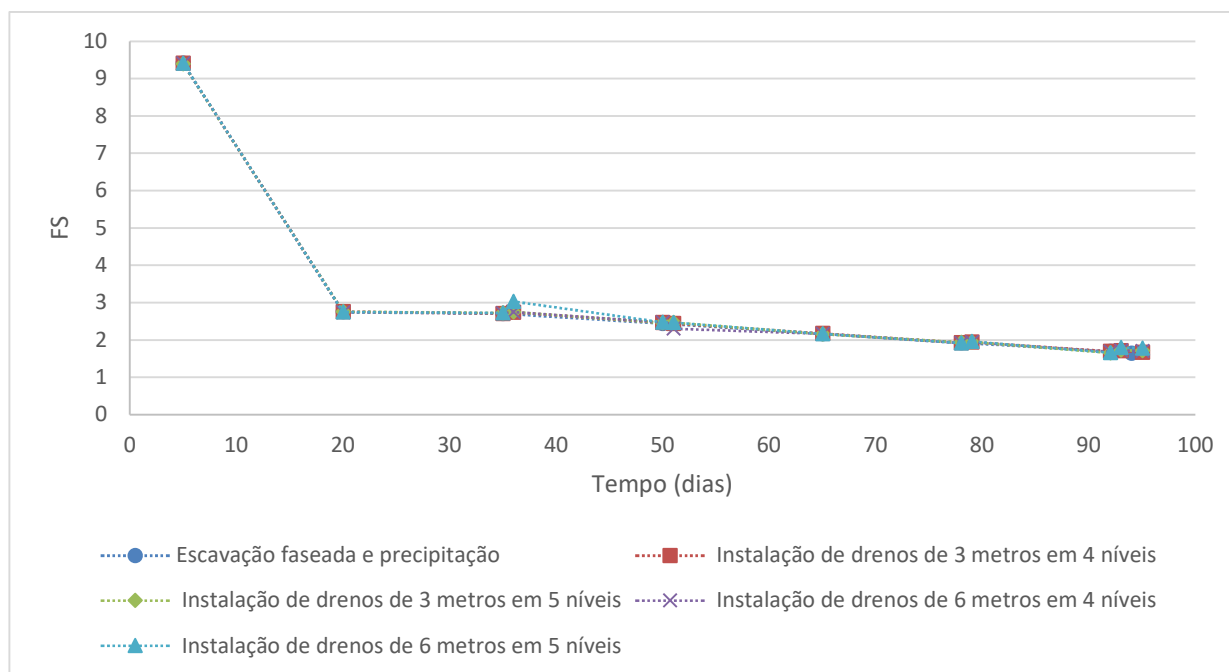


Gráfico 5.57- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração

Com a introdução de diferentes configurações de drenos inclinados, verificou-se uma melhoria clara dos valores de FS ao longo do tempo, ainda que com variações consoante a geometria do sistema de drenagem adotado. Os dados indicam que:

- As soluções com drenos de 3 metros, tanto em 4 como em 5 níveis, proporcionaram um aumento moderado do FS, com recuperação após o evento de precipitação.
- A instalação de drenos de 6 metros, especialmente em 5 níveis, revelou-se mais eficaz, permitindo uma recuperação total da estabilidade inicial, superando os valores registados no cenário sem precipitação.

O gráfico 5.57 ilustra a evolução do FS ao longo do tempo para as várias tipologias de drenagem. Nota-se que os sistemas mais profundos e com maior número de níveis foram mais eficientes na rápida dissipação das poropressões induzidas pela infiltração da água da chuva. Tal eficiência traduziu-se numa recuperação mais acelerada do FS e num atraso na propagação da frente de saturação para níveis mais profundos.

Além disso, a análise das superfícies de rotura simuladas indica que, nos cenários com drenagem, estas ocorrem em profundidades menores e com menor extensão, o que reforça o papel dos drenos na redução do potencial de instabilidade global.

Conclui-se, assim, que os sistemas de drenagem desempenham um papel essencial na segurança de taludes sujeitos a eventos de precipitação. A sua presença não só limita os efeitos imediatos da infiltração, como também contribui para a recuperação da estabilidade após a chuva. Os resultados demonstram que, quanto mais profunda e numerosa for a rede de drenos, mais eficaz será a mitigação dos efeitos hidromecânicos adversos provocados pela precipitação.

A presença de drenagem também fez com que existisse uma redução da profundidade da superfície de deslizamento e que não existisse tanto acúmulo de água na superfície do talude, como se pode verificar pela figura 5.5 em comparação com a simulação sem drenagem (Figura 5.4).

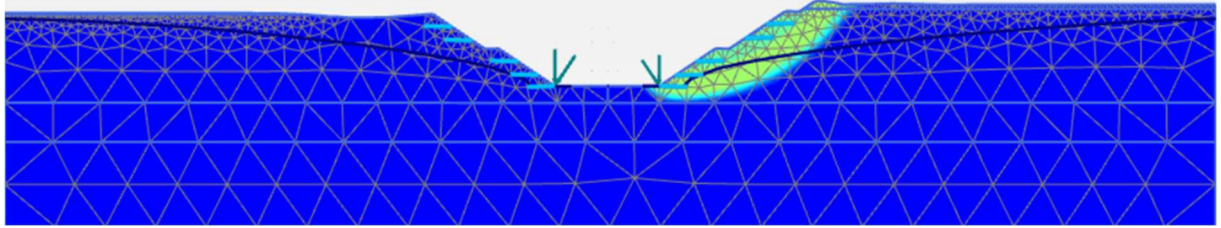


Figura 5.5- Superfície de ruptura do cenário base sujeito a precipitação moderada com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

5.4.4. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

A variação da intensidade e distribuição temporal da precipitação tem um impacto direto na estabilidade de taludes, especialmente em solos não saturados. Com o objetivo de avaliar essa influência, foram simulados dois cenários distintos: um com precipitação mensal moderada e outro com precipitação concentrada em um único dia (precipitação máxima diária). Ambas as análises foram realizadas sobre o talude previamente escavado e com diferentes configurações de sistemas de drenagem.

A comparação entre os dois cenários permitiu perceber de que forma a intensidade e o ritmo da infiltração afetam os parâmetros hidráulicos do solo, alterando as condições de sucção, poropressão e, consequentemente, o fator de segurança (FS).

5.4.4.1. Precipitação mensal

No cenário de precipitação mensal, a infiltração ocorre de forma progressiva ao longo de vários dias, promovendo um aumento gradual do teor em água no interior do talude. Esta condição favorece uma redistribuição lenta das pressões intersticiais, permitindo que os sistemas de drenagem atuem com maior eficácia na dissipação da água infiltrada.

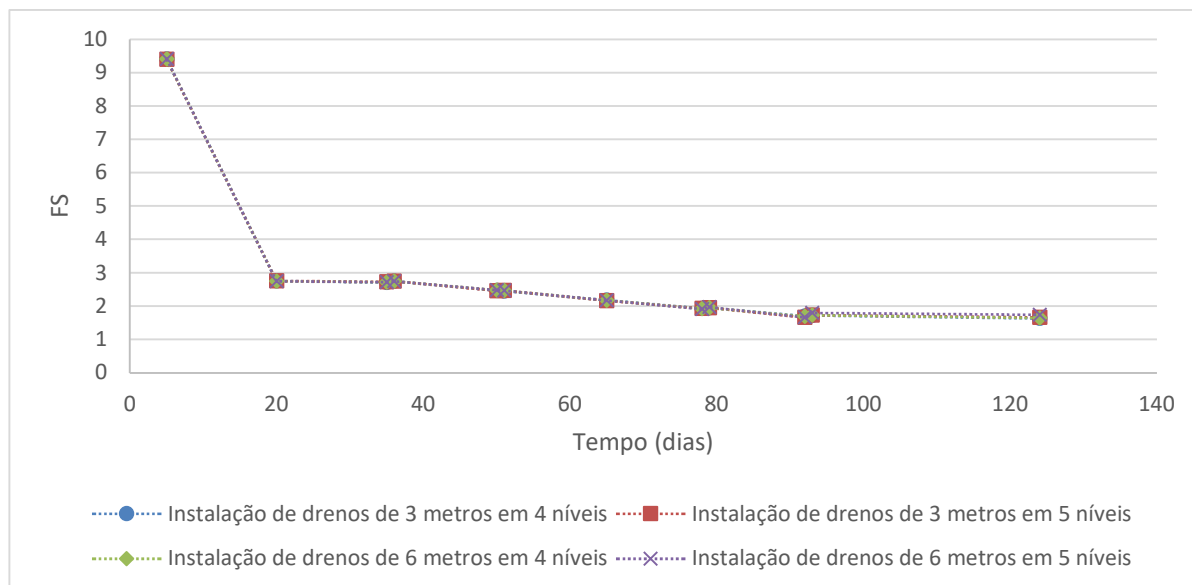


Gráfico 5.58- - Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração mensal

Como se observa no Gráfico 5.58, os valores de FS diminuem ligeiramente ao longo do tempo, especialmente nos cenários com drenagem menos eficiente. Contudo, mesmo nos casos mais desfavoráveis, o FS mantém-se acima dos limites de instabilidade, o que demonstra a capacidade das soluções de drenagem em mitigar os efeitos da chuva prolongada.

A análise das superfícies de rotura simuladas mostra que, na presença de drenos mais profundos (6 metros em 5 níveis), o talude mantém a estabilidade global, apresentando apenas deformações localizadas e sem propagação significativa da frente de saturação (Figura 5.6).

Assim, conclui-se que com uma precipitação de intensidade moderada distribuída ao longo do tempo os sistemas de drenagem apresentam uma resposta eficaz e conseguem controlar o aumento da poropressão.

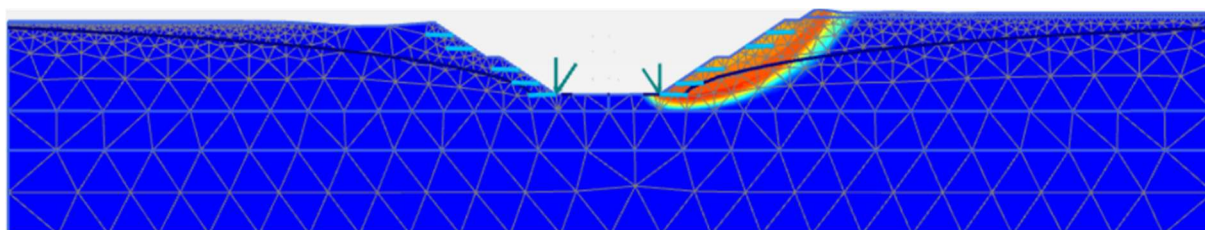


Figura 5.6- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação mensal com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

5.4.4.2. Precipitação máxima diária

O cenário com precipitação máxima diária representa uma condição mais crítica, uma vez que a elevada intensidade da chuva num curto intervalo de tempo gera uma infiltração rápida e intensa. Esta situação conduz a uma resposta abrupta do regime de poropressões, com consequente redução da sucção e aumento da poropressão nos horizontes mais superficiais.

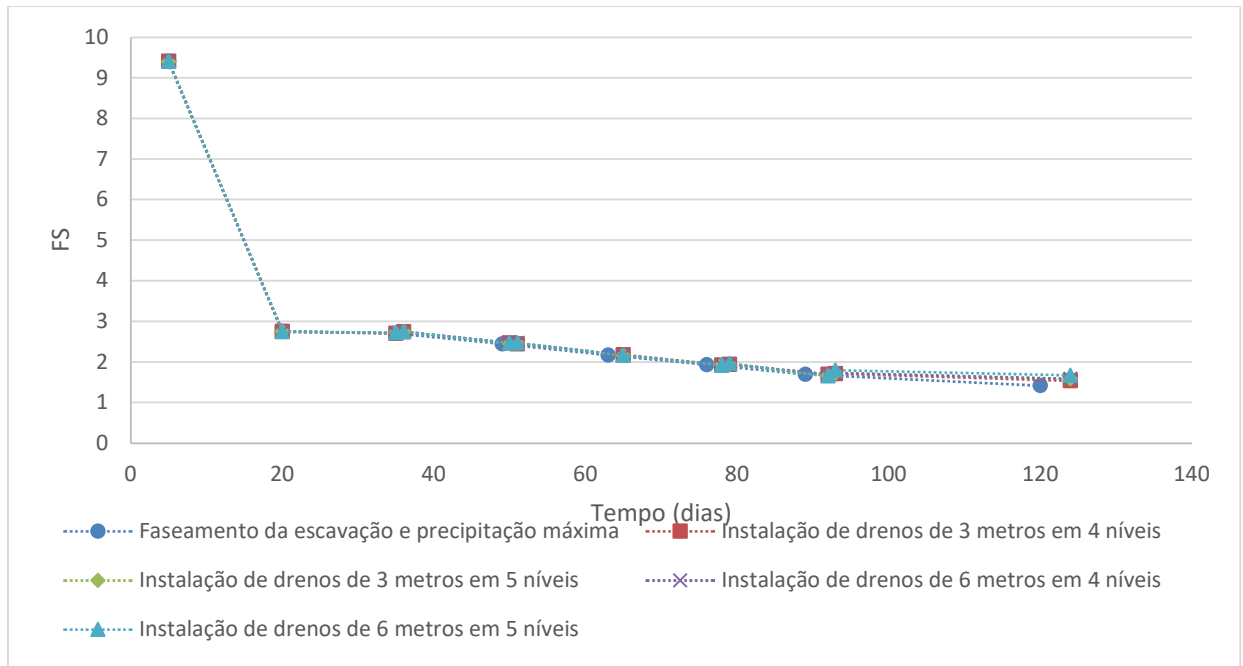


Gráfico 5.59- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração máxima diária

Os resultados indicam que, mesmo com a presença de drenagem, os valores de FS sofrem uma redução mais significativa do que no cenário de precipitação mensal (sendo que no caso de drenos de 6 metros em 5 níveis o FS para a precipitação mensal é de 1.736 e para a precipitação máxima diária é de 1.674). O Gráfico 5.59 evidencia este comportamento, mostrando que os taludes equipados com sistemas de drenagem menos extensos (ex.: drenos de 3 metros) não conseguem impedir a queda mais acentuada da estabilidade após o início da precipitação.

Contudo, os sistemas mais robustos, compostos por drenos de 6 metros distribuídos em 5 níveis, demonstram um desempenho superior, retardando o processo de saturação e permitindo uma recuperação mais rápida do FS após o evento crítico.

A Figura 5.7 apresenta a superfície de rotura simulada para este cenário, onde se pode observar que a instabilidade tende a iniciar-se nos pontos de maior concentração de água.

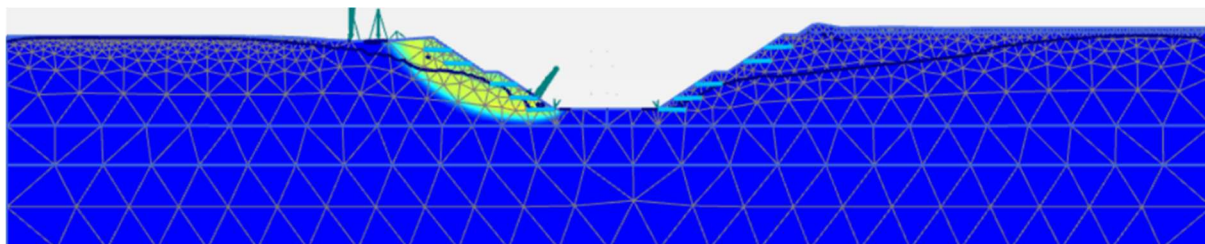


Figura 5.7- Superfície de rotura do cenário base sujeito a precipitação máxima diária com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

Em síntese, a precipitação intensa e concentrada constitui um fator de risco significativo para a estabilidade de taludes. A sua ocorrência exige sistemas de drenagem eficazes, capazes de responder de forma rápida e eficiente à infiltração repentina. A comparação entre os dois cenários evidencia a necessidade de dimensionar as soluções de drenagem tendo em conta não apenas o volume total de chuva, mas também a sua distribuição temporal.

5.4.5. EFEITOS DA PERMEABILIDADE E DA COESÃO NOS RESULTADOS

5.4.5.1. Permeabilidade

Os resultados obtidos para o cenário de menor permeabilidade demonstram que a diminuição da mesma apresenta um efeito ambíguo na evolução do fator de segurança. Por um lado, observou-se uma redução da taxa de infiltração durante os períodos de precipitação, o que contribuiu para a manutenção da sucção matricial nas camadas superficiais e um retardo na degradação da estabilidade global. Este efeito positivo deve-se à menor capacidade de entrada de água no sistema, especialmente nas fases iniciais da chuva.

No entanto, por outro lado, a redução da permeabilidade originou uma acumulação de água acima das interfaces menos permeáveis, levando à formação de zonas de elevada poropressão localizadas. Essa acumulação provocou, nas fases posteriores da simulação, uma redução mais acentuada do FS, uma vez que a água retida nessas zonas reduziu significativamente a resistência ao corte, sobretudo nos pontos de transição entre materiais.

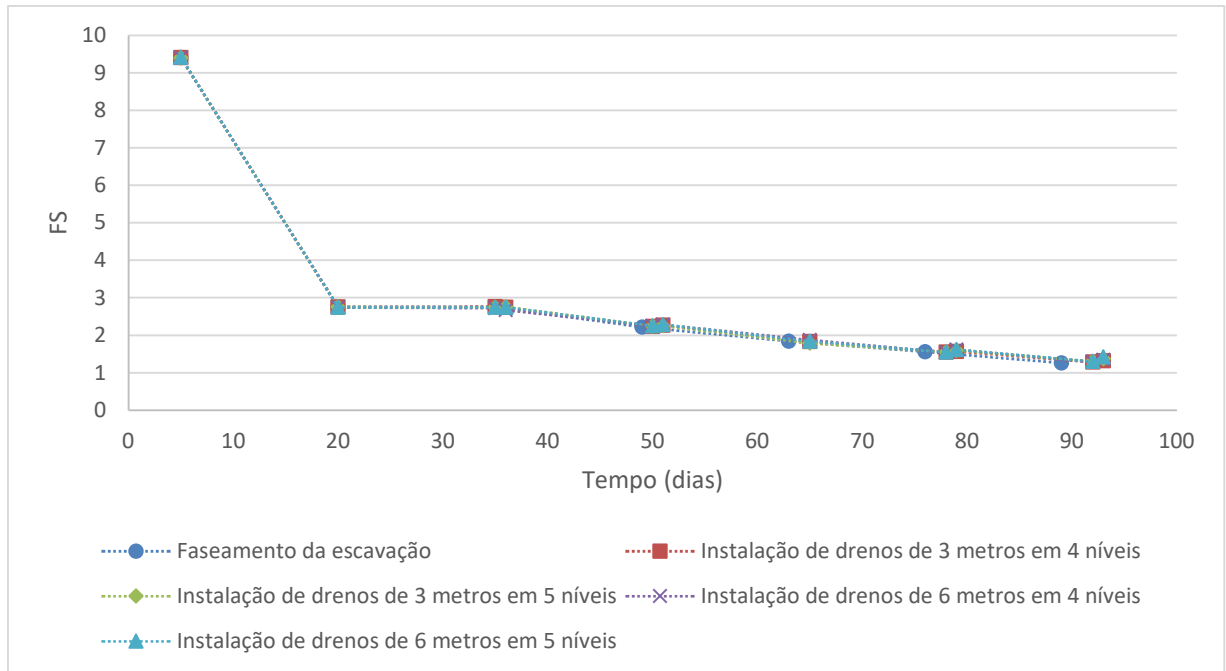


Gráfico 5.60- Evolução do fator de segurança no tempo para o faseamento da escavação e os diferentes tipos de drenagem no cenário de menor permeabilidade

Os gráficos 5.60 e 5.61 mostram a evolução do FS ao longo do tempo para os diferentes cenários, permitindo constatar que, embora a redução da permeabilidade tenha adiado o momento de instabilidade, acabou por acentuar os efeitos da saturação localizada em fases mais avançadas, fazendo com que o FS final fosse bastante abaixo do cenário base e que os sistemas de drenagem o conseguissem restabelecê-lo, mas de forma menos acentuada.

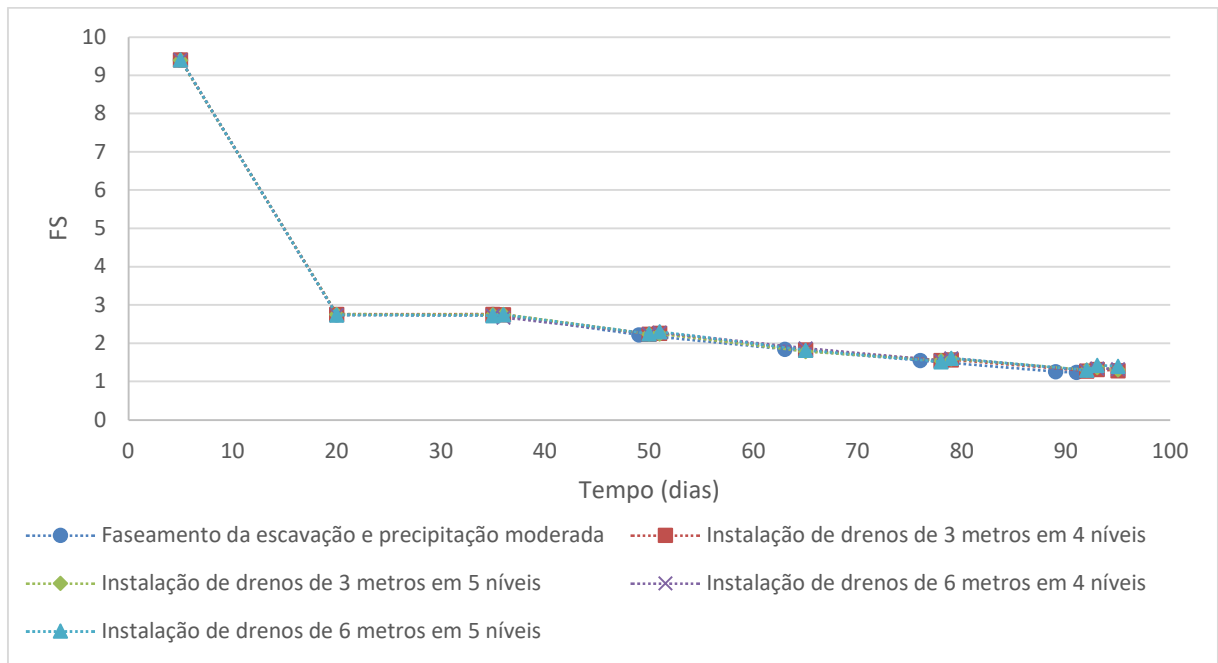


Gráfico 5.61- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração moderada no cenário de menor permeabilidade

As superfícies de ruptura geradas na simulação coincidem com as zonas onde ocorreu essa acumulação de água, indicando que a presença de camadas com baixa permeabilidade pode promover instabilidades tardias e profundas, mesmo quando a resposta inicial do talude parece segura (Figuras 5.8 e 5.9).

Conclui-se, assim, que a permeabilidade deve ser cuidadosamente caracterizada em estudos de estabilidade de taludes. A sua redução diminui o FS após a escavação, e pode tornar-se crítica quando associada a precipitações mais intensas ou prolongadas, exigindo soluções de drenagem bem dimensionadas para evitar acumulações internas perigosas.

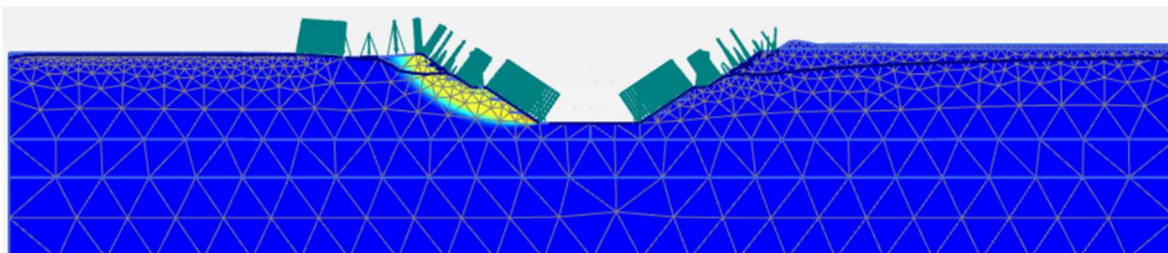


Figura 5.8- Superfície de falha do cenário com menor permeabilidade sujeito a precipitação moderada

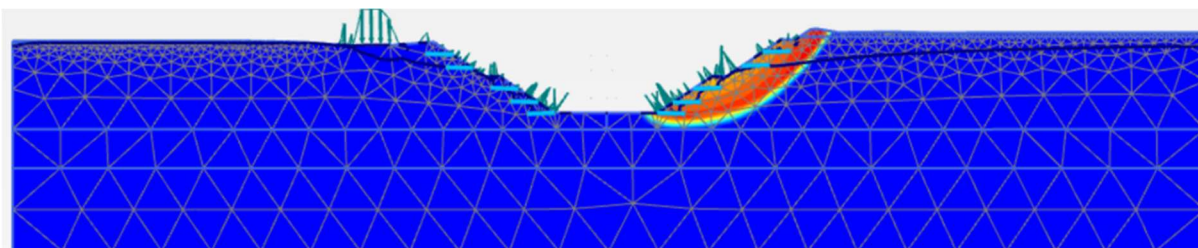


Figura 5.9- Superfície de falha do cenário com menor permeabilidade sujeito a precipitação moderada com instalação de drenos de 6 metros em 5 níveis

5.4.5.2. Coesão

Os resultados obtidos para a diminuição da coesão e representados nos gráficos seguintes, evidenciam uma relação direta e proporcional entre a coesão e o fator de segurança (FS). Valores mais elevados de coesão conduziram, naturalmente, a uma maior resistência interna e, consequentemente, a uma melhoria da estabilidade global do talude. Inversamente, a redução da coesão resultou numa diminuição expressiva do FS.

É visível que a perda de coesão tem um impacto mais severo em condições de saturação, uma vez que a sucção matricial (que contribui para a coesão aparente) é significativamente reduzida pela infiltração da água. Nessas circunstâncias, o FS atinge valores inferiores aos iniciais, indicando maior risco de instabilidade.

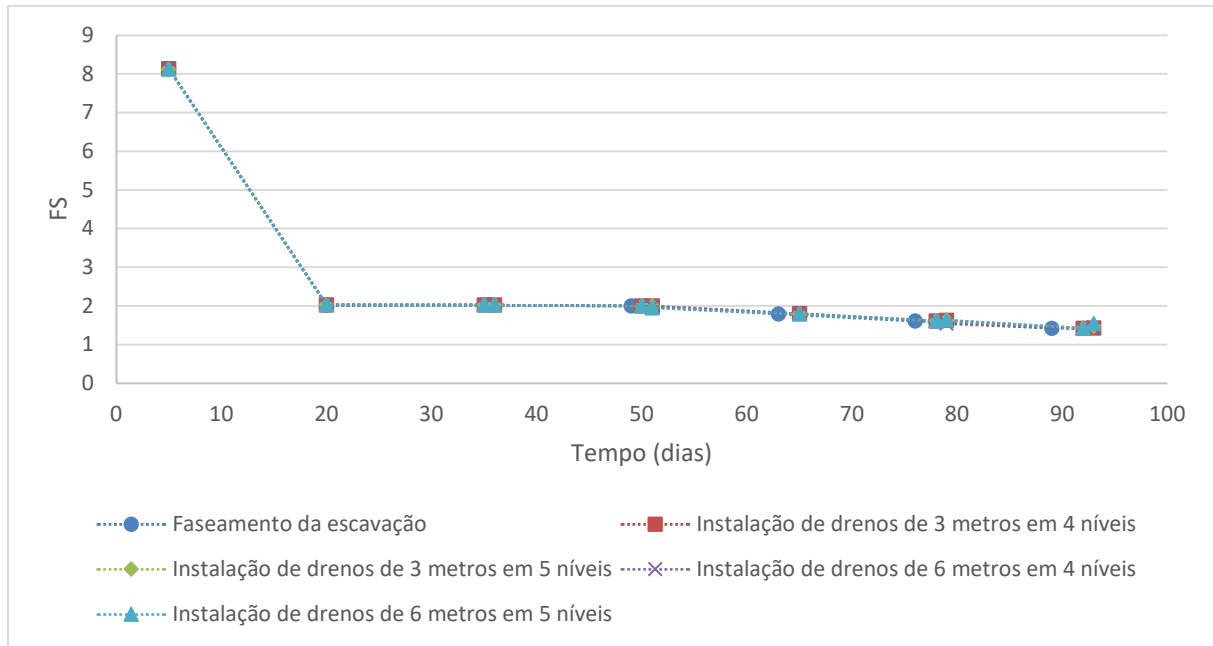


Gráfico 5.62- Evolução do fator de segurança no tempo para o faseamento da escavação e os diferentes tipos de drenagem no cenário de menor coesão

Estes resultados reforçam a importância de uma caracterização geotécnica precisa da coesão, tanto em laboratório como *in situ*. A sua subestimação pode conduzir a avaliações conservadoras, mas a sua sobrevalorização (sobretudo sem considerar a redução da sucção em condições húmidas) pode comprometer a fiabilidade da análise de estabilidade.

Conclui-se que a coesão, especialmente quando combinada com a variação do teor em água, constitui um parâmetro-chave para a previsão do comportamento dos taludes escavados. A sua influência deve ser sempre analisada em conjunto com os efeitos da infiltração, da sucção e da drenagem.

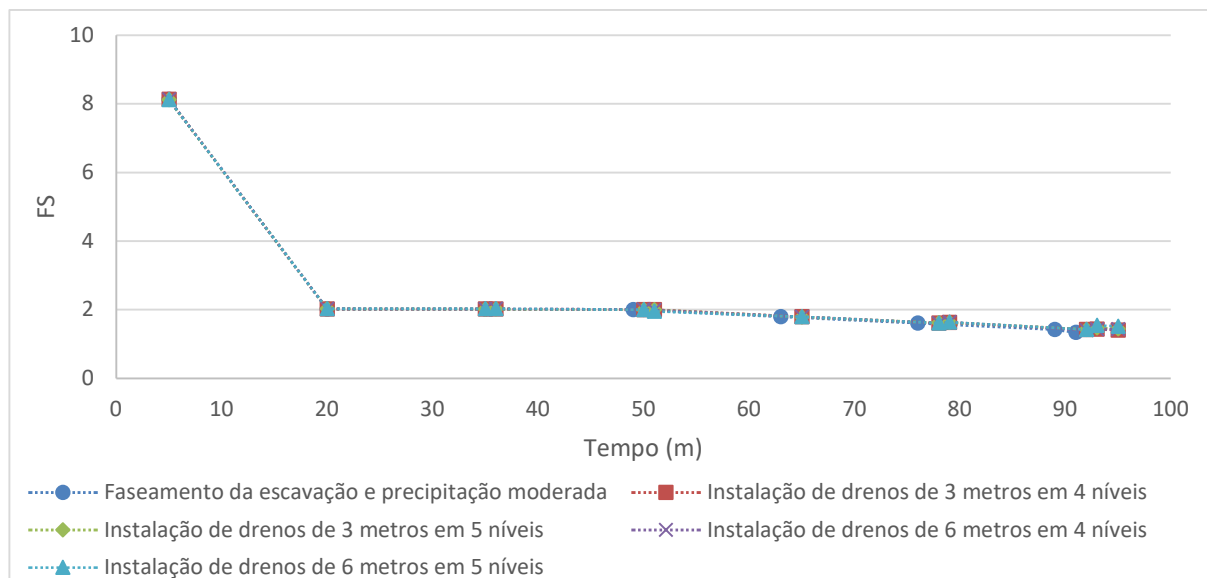


Gráfico 5.63- Evolução do fator de segurança no tempo para os vários tipos de drenagem sujeitos a infiltração moderada no cenário de menor coesão

5.4.6. DISCUSSÃO CRÍTICA

A análise do fator de segurança demonstra que a estabilidade de taludes escavados em solos não saturados é altamente sensível à ação da água e à variabilidade dos parâmetros do solo. Mesmo em taludes que apresentam segurança adequada em condições secas, a precipitação pode induzir situações de instabilidade, especialmente se não forem implementadas medidas de drenagem.

A modelação numérica permitiu observar o efeito combinado da geometria, da infiltração e das características hidráulico-mecânicas do solo, contribuindo para uma avaliação mais realista da segurança. As variações do FS ao longo das simulações serão complementadas, nas secções seguintes, com uma análise comparativa entre cenários, que permite identificar as configurações mais eficazes do ponto de vista da estabilidade.

A análise comparativa dos diferentes cenários modelados permitiu uma avaliação aprofundada da influência das condições hidráulicas, das propriedades dos solos e da eficácia dos sistemas de drenagem na estabilidade de taludes escavados. Através da evolução do fator de segurança (FS) ao longo do tempo, foi possível identificar os momentos críticos de instabilidade, quantificar o efeito de cada variável e fundamentar recomendações para a prática geotécnica. A tabela seguinte quantifica o fator de segurança final para cada cenário e respetivas simulações.

Tabela 5.3- Fator de segurança final para cada cenário e respectivas simulações

Cenário	Base	1	2.1	2.2	3.1	3.2
Faseamento da escavação	1.649				1.265	1.425
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 4 níveis		1.717			1.323	1.432
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 5 níveis		1.729			1.373	1.467
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 4 níveis		1.726			1.338	1.434
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 5 níveis		1.797			1.427	1.543
Faseamento da escavação com posterior infiltração	1.647		-	1.418	1.246	1.339
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 4 níveis e posterior infiltração		1.668	1.630	1.538	1.301	1.410
Faseamento da escavação com drenos de 3 metros em 5 níveis e posterior infiltração		1.711	1.662	1.584	1.315	1.443
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 4 níveis e posterior infiltração		1.705	1.644	1.586	1.360	1.435
Faseamento da escavação com drenos de 6 metros em 5 níveis e posterior infiltração		1.778	1.736	1.674	1.399	1.515

A análise crítica dos resultados confirma que a estabilidade dos taludes escavados depende fortemente da interação entre fatores hidrológicos, propriedades geotécnicas e soluções de engenharia adotadas. Mesmo taludes com geometrias estáveis em condições secas podem tornar-se instáveis sob ação da água, sendo a drenagem a principal barreira contra a degradação da segurança.

Destacam-se os seguintes pontos:

- A precipitação intensa e concentrada é mais prejudicial do que a infiltração prolongada;
- A drenagem profunda e bem distribuída é eficaz mesmo nos cenários mais críticos;
- A redução da permeabilidade, se mal gerida, pode induzir instabilidades tardias;
- A coesão é um parâmetro crítico, cuja subestimação ou perda por saturação reduz significativamente o FS.

A modelação numérica revelou-se uma ferramenta essencial para a previsão do comportamento do talude em condições reais, permitindo avaliar o desempenho de soluções antes da sua implementação em campo.

Em resumo, a aplicação de sistemas de drenagem em condições secas reforça a segurança do talude, funcionando como uma medida preventiva eficaz. Entre as opções analisadas, os drenos mais longos e em maior número de níveis demonstraram melhor desempenho, oferecendo um maior contributo para a estabilidade global da estrutura, mesmo em cenários sem precipitação.

Conclui-se, assim, que os sistemas de drenagem desempenham um papel essencial na segurança de taludes sujeitos a eventos de precipitação. A sua presença não só limita os efeitos imediatos da infiltração, como também contribui para a recuperação da estabilidade após a chuva. Os resultados demonstram que, quanto mais profunda e densa for a rede de drenos, mais eficaz será a mitigação dos efeitos hidromecânicos adversos provocados pela precipitação.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar, por via de modelação numérica, a influência da precipitação e de soluções de drenagem na estabilidade de taludes escavados, considerando ainda o impacto do faseamento construtivo. A investigação baseou-se num perfil geotécnico real, representativo de um troço da futura linha ferroviária de alta velocidade em Portugal, e envolveu a análise de diversos cenários com variação de parâmetros hidráulicos e mecânicos, dando particular ênfase à evolução do fator de segurança ao longo do tempo.

Importa referir que o processo de modelação não foi linear nem isento de obstáculos. Foram inicialmente tentadas simulações com a geometria completa do perfil fornecido, porém o tempo de cálculo era extremamente elevado e, em muitas ocasiões, as simulações não convergiam, impossibilitando a obtenção de resultados consistentes. Apesar das limitações impostas pelo desempenho computacional, a adoção de alguma simplificação, mas não desvirtuando da realidade geomecânica e geométrica permitiu reconhecer o que se obtém na elaboração de um modelo realista e o que esse nível de detalhe poderia trazer à análise. A simplificação adotada, compensou ainda assim essa limitação com um esforço rigoroso de calibração e definição de condições de contorno realistas, o que implicou um longo processo de ajustes até se alcançar estabilidade numérica e resultados fiáveis.

Os resultados obtidos evidenciaram que a presença de água no interior do maciço é um fator determinante na instabilização dos taludes. No cenário base, correspondente apenas ao faseamento da escavação e sem qualquer infiltração ou sistema de drenagem, o fator de segurança foi de 1.649, representando uma situação estável. Com a introdução de precipitação máxima diária, esse valor desceu para 1.418, correspondendo a uma redução de 14%, o que ilustra claramente o efeito desestabilizador da infiltração intensa, ainda que de curta duração.

Nos cenários em que se aplicaram sistemas de drenagem na ausência de precipitação, verificou-se um aumento generalizado da estabilidade. O sistema mais eficaz, composto por drenos inclinados de 6 metros, dispostos em 5 níveis, o último colocado no fundo da escavação, permitiu elevar o FS de 1.649 para 1.797, traduzindo um aumento de 9%. Estes resultados evidenciam que a drenagem profunda tem

potencial para redistribuir eficazmente as poropressões, mesmo na ausência de fluxos externos significativos.

Quando combinadas as condições de precipitação com sistemas de drenagem, os efeitos benéficos das soluções propostas mantiveram-se expressivos. No cenário de infiltração moderada, o FS aumentou de 1.647 para 1.778, o que representa uma melhoria de 8%. No cenário mais crítico, sob precipitação intensa concentrada num único dia, o FS subiu de 1.418 para 1.674 com a instalação dos mesmos drenos, correspondendo a um acréscimo de 18,1%, demonstrando a sua capacidade de mitigar situações potencialmente instáveis.

A análise de parâmetros geotécnicos mais sensíveis, como a permeabilidade e coesão, permitiu avaliar o impacto das suas variações. A redução da permeabilidade revelou um comportamento particularmente desfavorável, com reduções do FS de 23,3% apenas considerando o faseamento da escavação, e de 24,3% quando associada a precipitação. Por contraste, a instalação de drenos nos mesmos cenários compensou parcialmente essas perdas, com aumentos no FS de 12,8% sem precipitação e 12,3% com infiltração.

A redução da coesão mostrou-se ligeiramente menos crítica, resultando numa queda de 13,6% no FS para a escavação faseada, quando comparado com o cenário base. Contudo, a presença de precipitação agrava substancialmente o efeito, conduzindo a uma redução de 18,7%. A resposta da drenagem foi aqui mais moderada: um acréscimo de 8,3% na ausência de infiltração e de 13,1% quando esta estava presente. Isto ocorre porque a coesão efetiva inclui tanto a coesão mecânica, responsável pela resistência intrínseca nas zonas ativa e passiva, como a coesão adicional fornecida pela sucção, que é particularmente relevante em solos parcialmente saturados. A redução da coesão diminuiu diretamente a resistência ao corte na zona ativa, enquanto a perda de sucção por infiltração reduz a resistência da zona passiva, enfraquecendo a capacidade do solo e agravando a instabilidade global do talude.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram inequivocamente que a estabilidade de taludes escavados em solos residuais e heterogêneos está fortemente condicionada pela presença de água e pela capacidade de dissipação do sistema. A análise acoplada fluxo-deformação revelou-se uma ferramenta robusta e indispensável para prever o comportamento hidromecânico do solo e fundamentar soluções de engenharia ajustadas a contextos reais. A eficácia das soluções de drenagem foi amplamente comprovada, não apenas como meio de prevenir infiltrações futuras, mas também como mecanismo de estabilização de tensões efetivas internas desencadeadas pelo próprio processo de escavação. Torna-se, portanto, evidente a importância de integrar soluções de drenagem desde as fases iniciais do projeto, em consonância com a geologia local, os parâmetros do solo e os padrões de precipitação previstos para a região de inserção da obra.

Importa reconhecer que a precisão das simulações depende da representatividade dos parâmetros hidráulicos e mecânicos considerados, os quais foram em parte estimados a partir da bibliografia e de estudos anteriores. A ausência de calibração laboratorial para curvas SWCC específicas do perfil em estudo representa uma limitação, ainda que minimizada pela análise paramétrica realizada. Esta limitação não compromete a validade global dos resultados, mas aponta para a necessidade de investigação complementar.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando as limitações assumidas neste trabalho e os resultados obtidos, propõem-se diversas linhas de investigação futuras com vista ao aprofundamento do conhecimento nesta área.

É determinante a boa definição das propriedades hidrogeomecânicas dos maciços envolvidos pelos taludes formados em estudos experimentais *in situ*, começando por mais ensaios de campo, tais como os de geofísica sísmica e elétrica, e ensaios com implementações estáticas com requisitos de poropressão como o ensaio CPTu ou SCPTu.

Adicionalmente, a instrumentação de taludes reais, de forma a recolher dados contínuos sobre a evolução da sucção, poropressões e deslocamentos ao longo do tempo. Estes dados serviriam como base de validação para os modelos numéricos, permitindo aferir com maior precisão a adequação dos parâmetros utilizados.

Outra vertente promissora reside na integração de cenários climáticos extremos, nomeadamente considerando projeções associadas a alterações climáticas. A avaliação da resposta de taludes a eventos de precipitação mais intensa ou mais frequente pode tornar-se essencial para garantir a segurança das infraestruturas no médio e longo prazo.

Propõe-se ainda uma análise mais aprofundada da relação custo-benefício das diferentes soluções de drenagem testadas, bem como a investigação de alternativas baseadas na natureza, como coberturas com vegetação ou técnicas de bioengenharia, que poderão representar opções viáveis do ponto de vista técnico, económico e ambiental.

E por fim, por ser mais rara a necessidade em obras de linha, a realização de modelações tridimensionais, que permitiriam captar efeitos fora do plano, frequentemente relevantes em geometrias complexas ou em contextos de heterogeneidade num espaço 3D.

BIBLIOGRAFIA

- BENTLEY SYSTEMS. Plaxis 2D- Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Versão 2023. Países Baixos: Bentley Systems, 2023. Software.
- IP-Infraestruturas de Portugal. (2023)-GR.IT.GEO.011- Conceção e dimensionamento da infraestrutura e da plataforma da via (1ª edição). Departamento de Engenharia e Ambiente (DEA), Infraestruturas de Portugal
- IPMA- Instituto Português do mar e da atmosfera. Dados de precipitação diária para a estação de Viana do Castelo (2024-2024). Dados fornecidos por email, Lisboa: IPMA, 2024
- IPQ - Instituto Português da Qualidade (2010). NP EN 1997-1:200- Eurocódigo 7- Projeto geotécnico- Parte 1: Regras gerais. Lisboa: IPQ
- IPQ - Instituto Português da Qualidade (2010). NP EN 1997-1:200- Eurocódigo 7 - Projeto Geotécnico - Parte 2: Pesquisas e Ensaios de Campo. Lisboa: Instituto Português da Qualidade., 2010
- IPQ - Instituto Português da Qualidade (2013). Agregados para balastros ferroviários. Lisboa:
- IPQ- Instituto Português da Qualidade (2019). Especificações Técnicas para Construção e Manutenção de Vias-Férreas. Lisboa: IPQ.
- BISHOP A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7-17., 1955.
- BOWLES J.E. (1996). "Foundation Analysis and Design." McGraw-Hill., 1996.
- BRINKGREVE R.B.J., ENGIN E., & SWOLFS W.M. (2023). PLAXIS 2D Material Models Manual. Delft, Netherlands: Plaxis bv., 2023.
- BRINKGREVE R.B.J., ENGIN E., & SWOLFS W.M. (2023). PLAXIS 2D Reference Manual. Delft, Netherlands: Plaxis bv., 2023.
- BRINKGREVE R.B. J., ENGIN E., & SWOLFS W.M. (2023). PLAXIS 2D Scientific Manual. Delft, Netherlands: Plaxis bv., 2023.
- BRINKGREVE R.B.J., KUMARSWAMY S., SWOLFS W.M. (2019). "PLAXIS 2D 2019- Material Models Manual." Bentley Systems, 2019.
- CAVALCANTI M.M. (2016). Estabilização de encostas com proteção superficial e drenagem superficial e profunda. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- CHU L.M. & LEONG, E. C. (2001). Effectiveness of horizontal drains in slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 405-419., 2001.
- CRAIG R.F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (7th ed.). Spon Press., 2004.
- DAS B.M. (2010). "Principles of Geotechnical Engineering." 7th Ed. Cengage Learning, 2010.
- FONSECA V.d.A., & SANTOS, J. (2008). "Caracterização e comportamento de aterros e solos não saturados.", 2008.
- FONSECA V.d.A. (1996). Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto., 1996.
- FONSECA V.d.A. (2003). Characterising and deriving engineering properties of a saprolitic soil from granite, in Porto. In Tan, T.S., Phoon, K.K., Hight, D.W., & Leroueil, S. (Eds.), *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils* (pp. 1341-1362). Lisse: Swets & Zeitlinger., 2003.

- FONSECA V.d.A. et al. (2002). "Geotechnical site characterization using engineering geophysics and geotechnical tests - a case study.", 2002.
- FONSECA V.d.A. et al. (2013). "Geotechnical Characterization of Weathered Granite: Some practical considerations.", 2013.
- FREDLUND D.G., & RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, 1993.
- FREDLUND D.G., & XING A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(4), 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>, 1994.
- FREDLUND D.G., MORGENSTERN N.R., & WIDGER R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 15(3), 313-321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>, 1978.
- FREDLUND D.G., RAHARDJO H., & FREDLUND M.D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons., 2012.
- FREDLUND D.G., ZHANG F., & WANG Y. (2012). The relationship of the unsaturated soil shear strength criteria. Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 1-8., 2012.
- GENUCHTEN V.M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898., 1980.
- GOMES T.A. (2008). Poços Elípticos pelo Método de Escavação Sequencial. O caso do Metro do Porto. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- LEE S. et al. (2013). Application of real rainfall data for slope failure prediction using numerical methods. Landslides, 10(4), 473-484., 2013.
- LEPORE C. et al. (2020). Integrated drainage systems for slope stabilization in transport infrastructure. Engineering Geology, 271, 105608., 2020.
- LU N. & LIKOS W.J. (2004). Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons., 2004.
- MARQUES J. (2001). "Mecânica dos Solos e das Rochas." FEUP Edições., 2001.
- MUALEM Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>, 1976.
- NG C.W.W., & SHI Q. (1998). Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 31(2), 105-113., 1998.
- PINTO C., SILVA R., & GOMES R. (2019). Modelação da instabilidade de taludes em solos graníticos usando o PLAXIS 2D. Revista de Geotecnia, 147, 31-46., 2019.
- RAHARDJO H., LEONG E. C., & NG Y.S. (2007). Factors affecting stability of residual soil slopes. Computers and Geotechnics, 34(3), 112-123., 2007.
- RAHARDJO H., LIM T.T., LEE T.S. & LEONG E.C. (2007). Effect of rainfall on stability of residual soil slopes. Engineering Geology, 87(3-4), 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.06.005>, 2007.
- RAHARDJO H., ONG T.H., REZAUR R.B. & LEONG E.C. (2005). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. Geotechnique, 55(5), 313-322., 2005.
- RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L., & SAXTON K.E. (1982). Estimating soil water properties. Transactions of the ASAE, 25(5), 1316-1320., 1982.
- SILVA A.J., & FONSECA V.d.A (2015). Influence of water infiltration on the stability of unsaturated soil slopes. Soils and Rocks, 38(3), 265-279., 2015.

TERZAGHI K., Peck R.B., & MESRI G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.). John Wiley & Sons., 1996.

VALLEJO G.d.L.I. (2002). Ingeniería geológica (1.ª ed.). Madrid: Alhambra., 2002.

VANAPALLI S.K., FREDLUNG D.G., PUFAHL D.E. & CLIFTON A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 33(3), 379-392.

CAZZOLA S. Geotechnical and slope stability of Douro wineries terracing. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

FERNANDES T.R.P.T. A influência das chuvas na estabilidade de um talude natural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

GEOTECNIA, G. -. G. d. E. Relatórios técnicos e perfis-tipo de via férrea para alta velocidade (comunicação técnica interna, 2024)., 2024.

GERSCOVICH D. Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro: Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, jan. 2009.

INDRARATNA B., SALIM W. & RUJIKIATKAMJORN C. (2011). Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track. CRC Press., 2011.

RAMALHO J.d.A. Influência do teor de humidade dos terrenos na estabilidade de encostas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

RODRIGUES G.P. Efeito da penetração da chuva na estabilidade de encostas argilosas: o caso da Linha do Norte. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

SELIG E.T. & WATERS J.M. (1994). Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford Publishing., 1994.

SILVA C.M.C.d. Estudo de soluções para estabilização de uma grande fortificação muralhada sobre aterros de grande altura em cedência progressiva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

