



Sara Maria Moura Vaz Lopes

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Barragens de Aterro - Ábacos de pré-
-dimensionamento para diferentes
condições de esvaziamento**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana,
FCT-UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Mário Vicente da Silva
Arguente:	Prof. Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo
Vogal:	Prof. Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho, 2016

Barragens de Aterro- Ábacos de pré-dimensionamento para diferentes condições de esvaziamento

Copyright © Sara Maria Moura Vaz Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos à professora Teresa Santana, orientadora deste trabalho, sempre disponível, muito receptiva e interessada. Agradeço o apoio e conhecimento transmitido ao longo da realização da presente dissertação.

A todos os meus amigos e colegas de curso, em especial à Tânia, Sílvia, Isabel, Inês, Cláudia e Sandra, um muito obrigada pela vossa amizade e apoio prestado durante o meu percurso académico.

Às minhas amigas Rute e Inês Pina, que me acompanham desde sempre, agradeço imenso a vossa amizade.

Por último, dirijo um agradecimento especial a toda a minha família, pelo apoio incondicional, incentivo, carinho e paciência demonstrados. Obrigada por esta oportunidade.

Resumo

No pré-dimensionamento de barragens de aterro para diferentes condições de esvaziamento, são frequentemente utilizados ábacos considerando um talude homogêneo em regime estacionário. Contudo, para o pré-dimensionamento de barragens de aterro zonadas na fase de esvaziamento segundo um regime transitório, o problema é pouco abordado na bibliografia, sendo objeto do estudo desenvolvido. Recorre-se à análise acoplada tensão-deformação e percolação por elementos finitos, de modelos de estudo que consideram diferentes taludes, a fim de efetuar análises de estabilidade durante o esvaziamento, em regime transitório. A partir do modelo de estudo referente a uma barragem de aterro zonada, desenvolve-se uma análise paramétrica sendo realizadas alterações nas propriedades do solo dos maciços estabilizadores, na velocidade de esvaziamento da albufeira, no nível de água e na inclinação do paramento de montante, permitindo assim, avaliar a influência de cada parâmetro na estabilidade da estrutura para diferentes níveis de água. São analisados os resultados obtidos dos fatores de segurança para diferentes condições de esvaziamento e é determinado qual o talude crítico da barragem. Apesar de usualmente se considerar que o talude crítico, na situação de esvaziamento, é o de montante, dependendo das condições admitidas, pode ser o de jusante. Por último, apresenta-se uma proposta de ábacos de pré-dimensionamento aplicáveis a barragens de aterro zonadas, para diferentes condições de esvaziamento em regime transitório. Estes permitem determinar de forma expedita a inclinação do paramento de montante e ainda considerar até que nível de esvaziamento a segurança da barragem é garantida, para uma dada velocidade de rebaixamento do nível de água da albufeira.

Palavras chave:

barragem de aterro, esvaziamento, regime transitório, análise de estabilidade, Plaxis 2D.

Abstract

In the design of embankment dams, for different drawdown conditions, stability charts for earth slopes under steady seepage are frequently used. However, the case of embankment dams during drawdown conditions, under transient seepage, is rarely treated in the literature. Presenting some of these charts, for transient conditions, is the purpose of this study, considering fully coupled flow-deformation effects on the overall stability of different types of slopes. For a synthetic embankment dam model, a parametric analysis is performed, in which changes are being made to the effective friction angle, to the soil permeability, to the drawdown rate and to the upstream slope inclination, in order to evaluate the influence of each parameter in the dam stability, for different drawdown ratios. Although the drawdown problem usually leads to instability in upstream slopes, depending on the drawdown conditions considered, the critical slope may be the downstream one. Finally, a set of charts for the stability of some embankment dams, in drawdown conditions, is proposed as a design aid. From these charts the inclination of the upstream slope can be estimated and it is also possible to determine the maximum drawdown ratio with which the dam safety is ensured.

Keywords:

embankment dam, drawdown, transient seepage, stability analysis, Plaxis 2D.

Índice de Matérias

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento geral.....	1
1.2	Objetivo e organização da dissertação	2
1.3	Publicações.....	2
2	Esvaziamento em taludes genéricos.....	3
2.1	Introdução.....	3
2.2	Fenómeno de esvaziamento.....	4
2.2.1	Considerações gerais	4
2.2.2	Regime estacionário	5
2.2.3	Regime transitório	7
2.3	Revisão bibliográfica: Regime estacionário.....	8
2.3.1	Enquadramento.....	8
2.3.2	Problema de aplicação: talude homogéneo	9
2.3.3	Modelação do problema de aplicação no Plaxis e no Slope.....	17
2.3.4	Estudo comparativo	21
2.4	Revisão bibliográfica: Regime transitório.....	24
2.4.1	Enquadramento.....	24
2.4.2	Estudos de diferentes autores	25
2.4.3	Modelação do problema de aplicação no Plaxis.....	26
2.4.4	Estudo comparativo	27
3	Esvaziamento em barragens de aterro	29
3.1	Considerações gerais	29
3.2	Modelação	31

3.3	Influência do solo de fundação na estabilidade durante o esvaziamento	32
3.3.1	Regime estacionário	32
3.3.2	Regime transitório	33
3.4	Barragem de aterro homogénea e fundação	35
3.5	Barragem de aterro zonada e fundação	37
3.6	Observações finais.....	39
4	Estudo paramétrico do esvaziamento numa barragem de aterro zonada.....	41
4.1	Introdução.....	41
4.2	Influência da resistência ao corte do maciço estabilizador.....	43
4.3	Influência do coeficiente de permeabilidade do maciço estabilizador	45
4.4	Influência da velocidade de esvaziamento da albufeira	47
4.5	Influência do nível de água inicial na albufeira.....	49
4.6	Influência da inclinação do talude de montante	51
4.7	Observações finais.....	53
5	Proposta de Ábacos de Pré-dimensionamento	57
5.1	Introdução.....	57
5.2	Ábacos de pré-dimensionamento	58
5.3	Exemplo de cálculo	63
6	Considerações Finais.....	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Desenvolvimentos Futuros	68
	Bibliografia	71
	Anexo A	73
	Anexo B	77
	Anexo C	79
	Anexo D	81
	Anexo E	85

Índice de Figuras

Figura 2.1: Efeito de rebaixamento do nível de água da albufeira num maciço estabilizador de montante: (a) antes do esvaziamento; (b) após o esvaziamento; e (c) efeito do esvaziamento L (adaptado de Alonso e Pinyol, 2008).	4
Figura 2.2: Casos de esvaziamento considerados: (a) esvaziamento lento; (b) esvaziamento rápido; (c) esvaziamento intermédio considerando ΔL ; e (d) esvaziamento intermédio considerando apenas L_t	5
Figura 2.3: Representação da posição do nível freático no interior do talude para diferentes coeficientes r_u : (a) $L_t/H=0$, Esvaziamento rápido; (b) $L_t/H=0,5$, Esvaziamento intermédio; e (c) $L_t/H=1$, Esvaziamento lento.....	7
Figura 2.4: Posição do nível freático após o esvaziamento em regime de escoamento transitório.....	7
Figura 2.5: Problema de aplicação de um talude homogéneo.....	10
Figura 2.6: Ábaco de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido para um talude 1:2 e $c'/\gamma H=0.05$ (Morgenstern, 1963).	10
Figura 2.7: Gráfico para diferentes condições de esvaziamento, considerando um talude 1:2 (V:H), $\phi'=20^\circ$, $c'/\gamma H=0.05$ (Lane e Griffiths,2000).	11
Figura 2.8: Ábacos de estabilidade para taludes homogéneos (Michalowski,2002).....	12
Figura 2.9: Ábacos de estabilidade para um talude 1:2 (V:H) considerando diferentes casos de esvaziamento (Michalowski e Viratjandr, 2006).....	13
Figura 2.10: Fatores de segurança durante o esvaziamento para um talude 2:1 (H:V), $\phi'=20^\circ$, $c'/\gamma H=0.05$: (a) esvaziamento lento e (b) esvaziamento rápido (Nian <i>et al.</i> , 2011).....	14
Figura 2.11: Três tipos de superfície de rotura, superficiais, intermédias e profundas (Sun e Zhao, 2013).....	14
Figura 2.12: Ábaco de estabilidade para taludes homogéneos para diferentes r_u (esquerda) e considerando um esvaziamento lento (direita) (Sun e Zhao, 2013).	15
Figura 2.13: Ábaco de estabilidade para um talude homogéneo no nível $L_t/H=0,8$ ($r_u=0,1$) (Gao <i>et al.</i> , 2014).....	16
Figura 2.14: Ábaco de estabilidade para um talude homogéneo no nível $L_t/H=0,6$ ($r_u=0,2$) (Gao <i>et al.</i> , 2014).....	16
Figura 2.15: Ábaco de estabilidade para um talude homogéneo no nível $L_t/H=0,4$ ($r_u=0,3$) (Gao <i>et al.</i> , 2014).....	17
Figura 2.16: Malha de elementos finitos usada no programa Plaxis.....	17

Figura 2.17: Modelo utilizado no programa Slope.....	18
Figura 2.18: Modelação do caso de esvaziamento lento.	18
Figura 2.19: Modelação do caso de esvaziamento rápido.	18
Figura 2.20: Modelação do caso de esvaziamento intermédio considerando L_t	19
Figura 2.21: Modelação do caso de esvaziamento intermédio considerando ΔL	19
Figura 2.22: Fatores de segurança obtidos no Plaxis e no Slope para os diferentes casos de esvaziamento.	20
Figura 2.23: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento lento.	21
Figura 2.24: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento rápido.	22
Figura 2.25: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento intermédio ΔL	22
Figura 2.26: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento intermédio L_t	23
Figura 2.27: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=7\text{m}$ e 1:3 (V:H) (Berilgen, 2007).	25
Figura 2.28: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=14\text{m}$ e 1:3 (V:H) (Berilgen, 2007).	25
Figura 2.29: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude com $c'\gamma H=0,05$ e 1:2 (V:H) (Nian <i>et al.</i> , 2011).	26
Figura 2.30: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=6\text{m}$ e 1:2 (V:H) (López-Acosta <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 2.31: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando o problema de aplicação.	27
Figura 3.1: Modelos de estudo.	29
Figura 3.2: Malhas de elementos finitos.	31
Figura 3.3: Modelos 1 e 2: Influência do solo de fundação no fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento.	32
Figura 3.4: Modelos 1 e 2: Pontos plásticos no colapso para o caso de esvaziamento rápido estacionário no nível de esvaziamento $L/H=1,0$	33
Figura 3.5: Modelo 2: Fator de segurança ao longo do esvaziamento para diferentes combinações de R e k_h	34
Figura 3.6: Modelos 2 e 3: Fator de segurança ao longo do esvaziamento considerando diferentes combinações R e k_h	35
Figura 3.7: Modelo 3: Variação do FS ao longo do esvaziamento para diferentes velocidades de esvaziamento, considerando $k_h=5 \times 10^{-7} \text{m/s}$	36

Figura 3.8: Modelo 3: Pontos Plásticos no colapso para $R=4\text{m/d}$ e $k_h=1\times 10^{-7}\text{m/s}$	36
Figura 3.9: Modelos 3 e 4: Fator de segurança ao longo do esvaziamento considerando diferentes combinações R e k_h	37
Figura 3.10: Modelos 3 e 4: Variação do FS ao longo do esvaziamento para diferentes velocidades de esvaziamento, considerando $k_h=5\times 10^{-7}\text{m/s}$	38
Figura 3.11: Modelo 4: Pontos Plásticos no colapso para $R=1\text{m/d}$ e $k_h=1\times 10^{-7}\text{m/s}$	38
Figura 3.12: Pontos plásticos no colapso considerando as velocidades de esvaziamento analisadas. ..	39
Figura 4.1: Esquema ilustrativo do modelo base.....	41
Figura 4.2: Influência do ângulo de resistência ao corte do maciço no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$	43
Figura 4.3: Pontos Plásticos no colapso para $H=10\text{m}$ considerando $\phi'=25^\circ$	44
Figura 4.4: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{m}$ e os diferentes ϕ' considerados.	44
Figura 4.5: Influência do coeficiente de permeabilidade do maciço no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando uma velocidade de esvaziamento $R=1\text{m/d}$, para $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$	45
Figura 4.6: Posições da linha de saturação considerando esvaziamento total da albufeira $L/H=1,0$	46
Figura 4.7: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{m}$, considerando $k_h=5\times 10^{-6}\text{m/s}$ e $k_h=5\times 10^{-7}\text{m/s}$	46
Figura 4.8: Influência da velocidade de esvaziamento no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando um nível máximo de água $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$..	47
Figura 4.9: Posições da linha de saturação considerando o esvaziamento total da albufeira $L/H=0,1$ para as velocidades de esvaziamento R analisadas, considerando $k_h=5\times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1\times 10^{-7}\text{m/s}$	48
Figura 4.10: Pontos Plásticos no colapso para $H=10\text{m}$ e as diferentes R consideradas.	49
Figura 4.11: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{m}$ e as diferentes R consideradas.	49
Figura 4.12: Influência da altura da barragem no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H	50
Figura 4.13: Pontos Plásticos no colapso para os diferentes H considerados.	50
Figura 4.14: Influência da inclinação do talude de montante no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$	51
Figura 4.15: Pontos Plásticos no colapso para $H=10\text{m}$ e as diferentes inclinações consideradas.....	52
Figura 4.16: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{m}$ e as diferentes inclinações consideradas.....	52
Figura 4.17: Redução do fator de segurança para os diferentes níveis de água na albufeira, H , analisados.	53

Figura 4.18: Redução do fator de segurança verificada nos parâmetros analisados para $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$: (a) ângulo resistência ao corte ϕ' ; (b) coeficiente de permeabilidade horizontal k_h ; (c) velocidade de esvaziamento R ; e (d) inclinação do paramento de montante.	53
Figura 4.19: Redução máxima do fator de segurança.	54
Figura 4.20: Nível de esvaziamento a partir do qual o talude de montante passa a ser crítico para os diferentes níveis de água na albufeira, H , analisados.....	55
Figura 4.21: Nível de esvaziamento a partir do qual o talude de montante passa a ser crítico, considerando os parâmetros analisados para $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$: (a) ângulo resistência ao corte ϕ' ; (b) coeficiente de permeabilidade horizontal k_h ; (c) velocidade de esvaziamento R ; e (d) inclinação do paramento de montante.	55
Figura 4.22: Nível de esvaziamento crítico a montante, considerando apenas os valores dos parâmetros mais críticos.....	56
Figura 5.1: Geometria da barragem de aterro zonada.	58
Figura 5.2: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:3 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10\text{m}$; (b) $H=15\text{m}$; (c) $H=20\text{m}$; (d) $H=25\text{m}$	60
Figura 5.3: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:2,5 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10\text{m}$; (b) $H=15\text{m}$; (c) $H=20\text{m}$; (d) $H=25\text{m}$	61
Figura 5.4: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:2 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10\text{m}$; (b) $H=15\text{m}$; (c) $H=20\text{m}$; (d) $H=25\text{m}$	62

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Resumo dos ábacos de estabilidade analisados referentes ao regime estacionário.	9
Tabela 2.2: Fatores de Segurança obtidos pelos Ábacos de Michalowski (2002) para o caso de esvaziamento intermédio L_t , considerando um esvaziamento total da albufeira ($L/H=1$).	12
Tabela 2.3: Fatores de Segurança obtidos pelos Ábacos de Michalowski e Viratjandr (2006) para esvaziamento rápido estacionário, esvaziamento lento estacionário e esvaziamento intermédio estacionário.....	13
Tabela 2.4: Fatores de Segurança resultantes dos ábacos de Sun e Zhao (2013) para o caso de esvaziamento intermédio L_t	15
Tabela 2.5: Fatores de Segurança resultantes dos ábacos de Sun e Zhao (2013) para o caso de esvaziamento lento.	15
Tabela 2.6: Fatores de segurança obtidos nos ábacos apresentados por Gao <i>et al.</i> (2014).	16
Tabela 2.7: Resumo dos ábacos de estabilidade para taludes homogéneos referentes ao regime transitório.	24
Tabela 3.1: Parâmetros do solo.	31
Tabela 3.2: Velocidade de esvaziamento e coeficiente de permeabilidade considerados para o modelo 2.	33
Tabela 4.1: Valores adotados no estudo paramétrico.	42
Tabela 5.1: Valores adotados nos ábacos.	59
Tabela 5.2: Inclinações obtidas a partir dos ábacos mencionados na bibliografia.	64
Tabela 5.3: Aumento do volume de aterro comparativamente à solução obtidas no presente trabalho.	65

Lista de Símbolos

ϕ'_r	Ângulo de resistência ao corte reduzido
E_{50}^{ref}	Módulo de deformabilidade secante de referência, em estado triaxial, correspondente a 50% da tensão de rotura
E_{oed}^{ref}	Módulo de deformabilidade tangente de referência para carregamento edométrico primário
E_{ref}	Módulo de deformabilidade
L_t	Descida do nível de água no interior do talude
N^*	Número de estabilidade modificado
c'_r	Coesão efetiva do solo reduzida
k_h	Coefficiente de permeabilidade na direcção horizontal
k_v	Coefficiente de permeabilidade na direcção vertical
p^{ref}	Tensão efetiva média de referência
r_u	Parâmetro adimensional
γ_d	Peso volúmico seco
γ_{sat}	Peso volúmico do solo saturado
γ_w	Peso volúmico da água
σ'_n	Tensão efetiva normal
τ_r	Tensão de corte mínima para garantir o equilíbrio
ϕ'_{rotura}	Ângulo de resistência ao corte na rotura
ΔL	Variação entre o nível de água na albufeira e o nível de água no talude
Δu	Variação da pressão intersticial total
h	Altura da barragem
ϕ'	Ângulo de resistência ao corte
FS	Fator de segurança
H	Altura máxima de água
L	Descida do nível de água da albufeira
L/H	Nível de esvaziamento

N	Número de estabilidade
NPA	Nível de pleno armazenamento
R	Velocidade de esvaziamento
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
S	Grau de saturação
c'	Coesão efetiva do solo
k	Coeficiente de permeabilidade
m	Potência para a dependência da rigidez do solo
n	Porosidade
u	Pressão intersticial
z	Profundidade da superfície de rotura
ψ	Ângulo de dilatância
β	Inclinação do talude de montante
γ	Peso volúmico do solo
τ	Tensão de corte
ν	Coeficiente de Poisson

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

Uma das situações mais críticas para a estabilidade de uma barragem de aterro é o cenário de esvaziamento rápido. Neste caso, a redução da estabilidade da estrutura, que ocorre no maciço de montante, deve-se não só ao facto de deixar de existir a ação estabilizadora da água da albufeira, mas também devido ao excesso de pressão intersticial que permanece no maciço, quando se estabelece um escoamento para montante.

Idealmente, a velocidade a que o nível da água baixa na albufeira deve ser tal, que a linha de saturação no maciço acompanhe esta descida, sem nele ocorrer qualquer excesso de pressão intersticial, considerando-se o esvaziamento completamente lento. Quando a linha de saturação não acompanha a descida do nível de água da albufeira, a situação de esvaziamento é tanto mais penalizadora da estabilidade, quanto mais elevada permanece a linha de saturação. Este processo depende da velocidade de esvaziamento da albufeira e da condutividade hidráulica do solo do maciço, sendo que a análise do problema deve considerar um regime de escoamento transitório.

A análise de estabilidade de uma barragem de aterro, na fase de esvaziamento, foi abordada por diversos autores. Estes apresentam ábacos de estabilidade que permitem determinar o fator de segurança do talude de montante em função da posição relativa do nível de água da albufeira, durante o esvaziamento, mas apenas considerando um escoamento em regime estacionário. O estudo do problema em regime transitório é apenas abordado por um número restrito de autores que apresentam apenas casos de estudo para situações particulares.

De facto, o pré-dimensionamento para o cenário de esvaziamento rápido é ainda realizado hoje em dia com o recurso a ábacos em regime estacionário (Neves *et al.*, 2015), pelo que se julgou de todo o interesse dar esta contribuição com a apresentação de alguns ábacos em regime transitório.

1.2 Objetivo e organização da dissertação

O objetivo principal desta dissertação consiste assim na utilização do programa de cálculo automático Plaxis (2015) adotando uma análise acoplada da tensão-deformação e percolação em regime transitório, para a elaboração de ábacos de pré-dimensionamento do talude de montante de uma barragem de aterro zonada, considerando diferentes condições de esvaziamento.

A presente dissertação encontra-se organizada em seis Capítulos, o primeiro dos quais é a presente introdução.

No capítulo 2, realiza-se uma descrição sucinta das diferentes situações de esvaziamento para um regime estacionário e a simulação de algumas situações de regimes transitórios. Apresenta-se o estudo bibliográfico da temática em análise. É ainda analisado um exemplo simples de um talude homogéneo, procedendo-se à aplicação dos ábacos apresentados pelos autores estudados. Recorre-se aos programas de cálculo automático Plaxis (2015) e Slope (2014). Termina-se com o estudo comparativo entre as soluções obtidas pelos autores citados na revisão bibliográfica e as soluções obtidas no presente trabalho.

No capítulo 3, avalia-se em que medida os ábacos mencionados na bibliografia, relativos apenas a taludes homogéneos, podem ser aplicáveis a barragens de aterro. Para tal, procede-se ao estudo de quatro modelos, traduzindo a evolução de um talude homogéneo até uma barragem de aterro zonada, durante o esvaziamento da albufeira. Comparam-se os resultados obtidos referentes às diferentes estruturas.

No capítulo 4, realiza-se uma análise paramétrica referente às propriedades do solo dos maciços estabilizadores da barragem de aterro zonada (ângulo de resistência ao corte e coeficiente de permeabilidade), à velocidade de esvaziamento da albufeira, ao nível de água na albufeira e à inclinação do paramento de montante da barragem de aterro zonada. Avalia-se a influência de cada parâmetro na estabilidade da estrutura, considerando diferentes níveis de esvaziamento.

No capítulo 5, apresenta-se a proposta de ábacos de pré-dimensionamento do paramento de montante de uma barragem de aterro zonada, considerando diferentes condições de esvaziamento em regime transitório. Analisa-se um exemplo de cálculo de uma dada barragem, procurando demonstrar a aplicabilidade dos ábacos apresentados, comparativamente aos ábacos existentes.

No capítulo 6, consideram-se as principais conclusões retiradas após a realização da presente dissertação e são mencionadas algumas sugestões de desenvolvimentos para futuros trabalhos.

1.3 Publicações

A presente dissertação permitiu entretanto, a realização do artigo Lopes e Santana (2016) com o título “Barragens de aterro – Análise de estabilidade para diferentes condições de esvaziamento em regime transitório”, que foi publicado no 15º Congresso Nacional de Geotecnia.

Capítulo 2

2 Esvaziamento em taludes genéricos

2.1 Introdução

O presente capítulo inicia-se apresentando uma breve descrição do fenómeno de esvaziamento do talude de montante de uma barragem de aterro. A análise de estabilidade desta estrutura, na fase de esvaziamento, pode ser abordada considerando um escoamento em regime estacionário e transitório. Para tal, são analisados cinco casos de esvaziamento consoante o regime adotado. Relativamente ao regime estacionário consideram-se os casos de esvaziamento lento, rápido e dois casos de esvaziamento intermédio. No que diz respeito ao regime transitório este corresponde ao caso de esvaziamento intermédio transitório.

Apresenta-se a revisão bibliográfica relativa a cada regime de escoamento, referindo diversos autores, organizados por ordem cronológica, que se dedicaram à análise de estabilidade de taludes na fase de esvaziamento. Considera-se a análise de um problema de aplicação de um talude homogéneo, permitindo aplicar os estudos apresentados pelos autores referidos, considerando os casos de esvaziamento contemplados pelos mesmos. De seguida, procede-se à modelação do mesmo problema, recorrendo-se aos programas de cálculo automático de elementos finitos Plaxis (2015) e equilíbrio limite Slope, para os diferentes casos de esvaziamento estudados, à exceção do caso de esvaziamento em regime transitório, em que se optou apenas por utilizar o Plaxis (2015). Por último, realiza-se o estudo comparativo face às soluções existentes na bibliografia e as soluções obtidas da modelação do problema em questão.

2.2 Fenómeno de esvaziamento

2.2.1 Considerações gerais

Numa barragem de aterro, a estabilidade de um talude de montante depende da sua geometria, das propriedades do solo constituinte e das forças a que este se encontra sujeito, sejam estas externas ou internas. Uma vez que a água que permanece no interior do talude e o nível de água da albufeira transmitem forças internas e externas que condicionam a estabilidade da estrutura, quando o talude se encontra parcialmente ou totalmente submerso, as forças a que este se encontra submetido são alteradas quando o nível de água muda. Dado que, a água da albufeira transmite um efeito estabilizador ao talude, que se opõem ao deslizamento e que deixa de se verificar após o esvaziamento.

O efeito da água da albufeira encontra-se esquematizado na figura 2.1, na qual o nível de água sofre uma descida L , de MO até $M'O'$. A figura 2.1 (a) refere-se à situação antes do esvaziamento, representando as pressões hidrostáticas a atuar no talude, OAB , e na base do maciço, $MNCB$. A figura 2.1 (b) refere-se a uma situação após o esvaziamento, com as pressões hidrostáticas a atuar depois do esvaziamento no talude, $O'A'B$, e na base do maciço, $M'N'CB$. A figura 2.1 (c) representa o efeito da alteração das pressões hidrostáticas, devido ao esvaziamento L , verificando-se uma descompressão constante na parte inferior do talude, BO' , e na base do maciço, CB , e uma variação linear na parte superior do talude, $O'O$. A diminuição da pressão intersticial, Δu , é dada por:

$$\Delta u = L \times \gamma_w \quad (2.1)$$

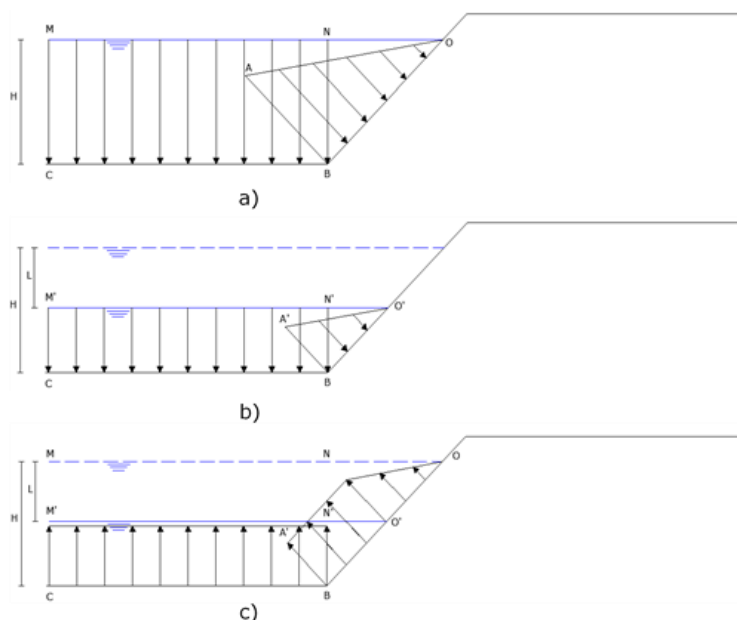


Figura 2.1: Efeito de rebaixamento do nível de água da albufeira num maciço estabilizador de montante: (a) antes do esvaziamento; (b) após o esvaziamento; e (c) efeito do esvaziamento L (adaptado de Alonso e Pinyol, 2008).

A mudança do nível de água da albufeira permite ainda que se desenvolvam pressões intersticiais no interior da barragem de aterro. A dissipação desta pressão intersticial durante o esvaziamento é um fator bastante significativo, visto que é este que determina o facto de o esvaziamento ser considerado rápido ou lento, dependendo da velocidade de esvaziamento e do coeficiente de permeabilidade do solo. Se a dissipação da pressão da água nos solos que constituem a barragem de aterro não acompanhar a descida do nível de água da albufeira, o esvaziamento é considerado rápido. Se não ocorrer qualquer excesso de pressão intersticial, ou seja, a dissipação da pressão da água nos solos acompanhar a descida do nível de água da albufeira, considera-se o esvaziamento lento.

Por outro lado, o grau de saturação do solo do maciço estabilizador de montante provoca também uma variação do peso do solo. Sendo γ o peso volúmico do solo, tem-se que:

$$\gamma = \gamma_d + Sn\gamma_w \quad (2.2)$$

em que γ_d o peso volúmico seco, S é o grau de saturação, n é a porosidade e γ_w é o peso volúmico da água.

2.2.2 Regime estacionário

O caso de esvaziamento em regime estacionário define-se quando a velocidade e a pressão, num determinado ponto do corpo da barragem, não variam com o tempo. Assume-se que o solo se encontra saturado e que as partículas sólidas e a água contida nos vazios são incompressíveis.

Considere-se H o nível de água na albufeira, que coincide com a altura do talude, L a descida do nível de água da albufeira, L_t a descida do nível de água no talude e ΔL a variação entre L e L_t . Na figura 2.2, apresentam-se os casos de esvaziamento usualmente considerados num problema de esvaziamento de um talude, em regime estacionário. Estes casos encontram-se descritos como a seguir indicado.

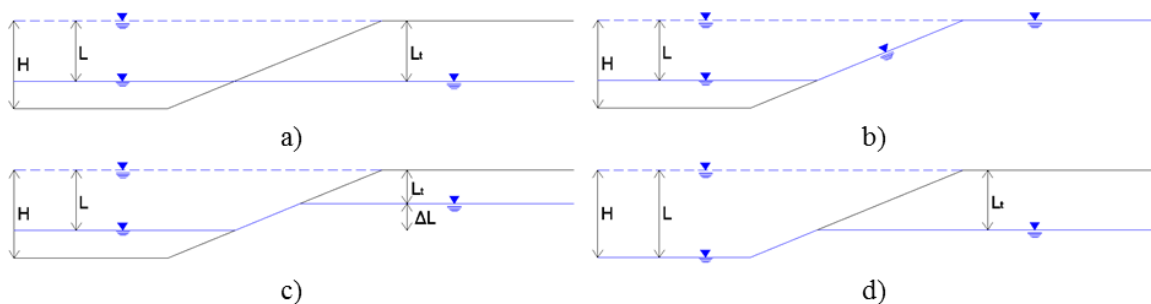


Figura 2.2: Casos de esvaziamento considerados: (a) esvaziamento lento; (b) esvaziamento rápido; (c) esvaziamento intermédio considerando ΔL ; e (d) esvaziamento intermédio considerando apenas L_t .

- a) no caso de esvaziamento lento admite-se que o solo apresenta um comportamento drenado, sendo que o nível freático no interior do talude e o nível de água na albufeira se mantêm sempre à mesma cota, durante o esvaziamento. É assumido que a pressão intersticial, no interior do talude, se encontra em condição hidrostática;

- b) no caso de esvaziamento rápido, o solo apresenta um comportamento não drenado, uma vez que a pressão intersticial não se dissipa ao mesmo tempo que o nível de água da albufeira se altera. Neste caso o nível freático no interior do talude mantém-se na condição inicial durante do esvaziamento. Na zona do paramento do talude o nível freático não é considerado horizontal. Este é o caso que provoca uma maior diminuição da estabilidade do talude, podendo mesmo levar à sua rotura. Verifica-se que a pressão intersticial no interior do talude mantém-se constante e igual à pressão intersticial inicial, visto que o nível freático não se altera durante o esvaziamento, não permitindo assim a dissipação da pressão intersticial;
- c) no caso de esvaziamento intermédio considera-se o rebaixamento do nível da água da albufeira L e do nível de água no talude L_t , para uma dada variação constante ao longo do esvaziamento de $\Delta L = L - L_t$;
- d) no caso de esvaziamento intermédio procede-se apenas ao rebaixamento do nível de água no talude L_t , sendo que a albufeira se encontra totalmente vazia ($L=H$).

A determinação do nível de água no talude, L_t , é muito complexa devido a ser necessário conhecer uma larga gama de variáveis. Neste sentido, alguns autores como Michalowski (2002), Sun e Zhao (2013) e Gao *et al.* (2014), utilizam o coeficiente adimensional r_u de modo a estimar a pressão intersticial no interior do talude de uma forma aproximada, sendo este coeficiente dado por:

$$r_u = \frac{u}{\gamma z} \quad (2.3)$$

sendo, u a pressão intersticial no interior do talude, γ o peso volúmico do solo e z a profundidade da superfície de rotura desde o coroamento. Admitindo uma superfície de rotura superficial $z=H$ e a altura de água no interior do talude é $H - L_t$, tem-se que

$$r_u = \frac{\gamma_w \times (H - L_t)}{\gamma \times H} \quad (2.4)$$

Assumindo um peso volúmico da água de 10kN/m^3 e um peso volúmico do solo de 20kN/m^3 , obtém-se:

$$r_u = 0.5 \times \left(1 - \frac{L_t}{H}\right) \quad (2.5)$$

Se for considerada uma altura de água no interior do talude igual à altura do mesmo ($L_t/H=0$) resulta $r_u=0,5$, ou seja, corresponde à situação de esvaziamento rápido após o esvaziamento total da albufeira ($L/H=1$). Se for considerada uma altura de água nula ($L_t/H=1$), o coeficiente r_u toma o valor de 0, ou seja, refere-se à situação de esvaziamento lento após o esvaziamento total ($L/H=1$). Por último, se for considerado $r_u=0,25$, resulta a relação $1 - \frac{L_t}{H}=0,5$, ou seja, corresponde à situação de esvaziamento intermédio para $L_t/H = 0,5$ (50% do esvaziamento). Na figura 2.3 apresentam-se estes resultados.

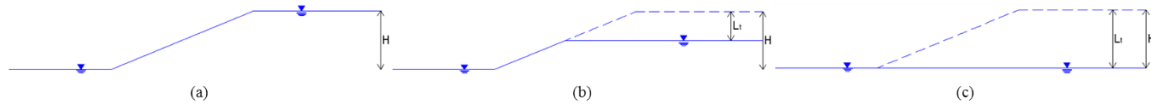


Figura 2.3: Representação da posição do nível freático no interior do talude para diferentes coeficientes r_u : (a) $L_t/H=0$, Esvaziamento rápido; (b) $L_t/H=0,5$, Esvaziamento intermédio; e (c) $L_t/H=1$, Esvaziamento lento.

Outra definição para considerar a pressão intersticial no talude durante o esvaziamento é estimada assumindo uma relação da pressão intersticial, \bar{B} , que é admitido como sendo unitário durante o esvaziamento, traduzindo uma estimativa conservativa. Morgenstern (1963) considera este parâmetro.

2.2.3 Regime transitório

O caso de esvaziamento em regime transitório considera que o nível freático se altera com o tempo, envolvendo solos parcialmente saturados. Neste caso, o nível freático no talude após o esvaziamento assume uma trajetória curvilínea, como ilustrado na figura 2.4, sendo que depende da velocidade de esvaziamento do nível de água na albufeira, R , e do coeficiente de permeabilidade do solo, k .

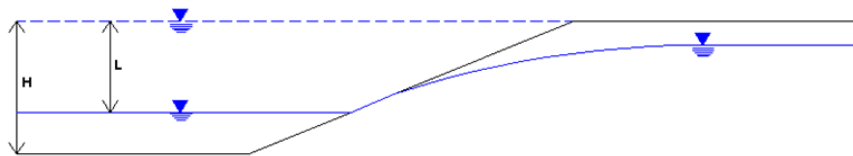


Figura 2.4: Posição do nível freático após o esvaziamento em regime de escoamento transitório.

Se a velocidade de esvaziamento for suficiente lenta, de modo a permitir que a pressão intersticial acompanhe o rebaixamento do nível de água, então as pressões intersticiais no interior do maciço e a ação hidrostática na superfície do maciço mantêm-se em equilíbrio, não havendo problemas de estabilidade. Para velocidades de esvaziamento mais elevadas, as pressões intersticiais não se dissipam de modo a acompanhar o rebaixamento do nível de água da albufeira, provocando deste modo um excesso de pressão intersticial.

Relativamente ao coeficiente de permeabilidade, este determina a capacidade do solo dissipar o excesso de pressão intersticial: quanto mais permeável for o material que constitui o maciço estabilizador de montante, mais facilidade existirá para que se dissipem as pressões intersticiais que permanecem no seu interior. No entanto, se o maciço for muito permeável, considerar uma velocidade maior ou menor para o rebaixamento do nível de água da albufeira torna-se pouco relevante, já que o maciço continuará a ter capacidade de dissipar o excesso de pressões intersticiais.

2.3 Revisão bibliográfica: Regime estacionário

2.3.1 Enquadramento

A análise de estabilidade de taludes sujeitos a um escoamento em regime estacionário, para os diferentes casos de esvaziamento mencionados na secção 2.2.2., foi abordada por diversos autores. De entre as soluções disponíveis na bibliografia, referem-se apenas os autores que apresentam ábacos de estabilidade referentes a taludes homogêneos. Estes ábacos permitem resolver um problema de um talude de inclinação β e altura H (correspondente ao nível máximo de água), com um solo caracterizado por um peso volúmico γ , ângulo de resistência ao corte ϕ' e coesão c' . Considera-se uma descida do nível de água L desde o nível máximo de água e determina-se o fator de segurança FS para diferentes níveis de esvaziamento L/H , sendo que $L/H=0$ representa a situação de pleno armazenamento e $L/H=1$ a condição de esvaziamento total.

O fator de segurança, FS , representa uma medida global de segurança e ignora a natureza progressiva da maioria dos processos de falha onde o estado limite é alcançado sequencialmente na estrutura. É definido em função da resistência do solo, pelo critério de Mohr-Coulomb em função da coesão, c' , e do ângulo de resistência ao corte, ϕ' , sendo que resulta da relação entre a resistência do solo e a tensão de corte necessária para garantir o equilíbrio limite:

$$FS = \frac{c'}{c'_r} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_r} \quad (2.6)$$

sendo c'_r e ϕ'_r parâmetros de resistência do solo necessário apenas para garantir que a estrutura se encontra em equilíbrio limite. Estes parâmetros são independentes do método utilizado, pois não são verdadeiros parâmetros do solo, a análise considera um mecanismo de colapso fictício que não deve ser interpretado como um modelo real de colapso.

Alguns dos ábacos apresentados consideram o número de estabilidade N , dado por:

$$N = \frac{c'}{\gamma H} \quad (2.6)$$

sendo, γ o peso volúmico do solo, H a altura do talude e c a coesão do solo. O talude com combinação crítica de c' , γ e H (ou seja, $c'/\gamma H=N$) apresenta um $FS=1$.

Contudo, Michalowski (2002), Michalowski e Viratjandr (2006) e Gao *et al.* (2014) consideram a proposta de Bell (1966) adotando o número de estabilidade modificado N^* :

$$N^* = \frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} \quad (2.7)$$

sendo, ϕ' o ângulo de resistência ao corte.

Na tabela 2.1, apresenta-se um resumo dos ábacos de estabilidade considerados neste estudo, sendo que os trabalhos se encontram organizados por ordem cronológica. São indicados os casos de esvaziamento considerados por cada autor (ver figura 2.2), os níveis de esvaziamentos

L/H analisados, o método de cálculo adotado, os parâmetros considerados por cada autor e os casos estudados pelos mesmos.

Tabela 2.1: Resumo dos ábacos de estabilidade analisados referentes ao regime estacionário.

Autor	Casos de esvaziamentos (ver figura 2.2)	L/H	Método de cálculo	Parâmetros dos ábacos	Casos estudados
Morgenstern (1963)	Esvaziamento rápido	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0	Equilíbrio Limite	$\frac{c'}{\gamma H}$, β , ϕ' , FS	$\frac{c'}{\gamma H}=0,0125; 0,025; 0,05$ 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 (V:H) $\phi'=20, 30, 40^\circ$
Lane e Griffiths (2000)	Esvaziamento rápido e lento	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0	Elementos Finitos	$\frac{c'}{\gamma H}$, β , ϕ' , FS	$\frac{c'}{\gamma H} = 0,0125; 0,025; 0,05$ 1:2, 1:3, 1:4 (V:H) $\phi' = 12, 20, 25, 30, 40^\circ$
Michalowski (2002)	Esvaziamento rápido ($L_t/H=0$), lento ($L_t/H=1$) e intermédio ($L_t/H=0,5$)	1,0; 0,5	Análise limite do teorema da região superior	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}$, β , r_u , FS $\tan \phi'$	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} = [0;3]$ $\beta=15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ $r_u = 0; 0,25; 0,5$
Michalowski e Viratjandr (2006)	Esvaziamento rápido, lento e intermédio (L_t e ΔL)	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	Análise limite do teorema da região superior	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}$, β , FS $\tan \phi'$	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} = [0;0,8]$ 1:1, 2:3, 1:2, 1:3 (V:H)
Nian <i>et al.</i> (2011)	Esvaziamento rápido e lento	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0	Elementos Finitos e Equilíbrio Limite (Slope, método de Bishop)	$\frac{c'}{\gamma H}$, β , ϕ' , FS	$\frac{c'}{\gamma H}=0,05$ 1:2 (V:H) $\phi'=20^\circ$
Sun e Zhao (2013)	Esvaziamento lento Esvaziamento rápido ($L_t/H=0$), lento ($L_t/H=1$) e intermédio ($L_t/H=0,5$)	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 1,0; 0,5	Equilíbrio Limite (SLOPE/W, método de Morgenstern-Price)	$\frac{c'}{\gamma H}$, β , $\tan \phi'$ $\frac{c'}{\gamma H}$, β , r_u , $\tan \phi'$	$\frac{c'}{\gamma H}=[0;0,25]$ $\beta=15, 30, 45, 60^\circ$ $r_u = 0; 0,25; 0,5$ (considera diferentes tipos de rotura)
Gao <i>et al.</i> (2014)	Esvaziamento intermédio ($L_t/H=0,4; 0,6; 0,8$)	0,4; 0,6; 0,8	Análise limite do teorema da região superior	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}$, r_u , $\tan \phi'$ FS	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} = [0,01;3,00]$ $r_u = 0,1; 0,2; 0,3$ (considera diferentes tipos de rotura)

2.3.2 Problema de aplicação: talude homogéneo

De forma a aplicar os ábacos de estabilidade apresentados pelos autores referidos na secção anterior, para os diferentes casos de esvaziamento em regime estacionário, analisa-se de seguida um problema de aplicação comum entre os mesmos.

Considera-se assim, um talude homogéneo com uma inclinação de 1:2 (V:H), $c'/\gamma H=0,05$, ângulo de resistência ao corte $\phi'=20^\circ$ e o coeficiente de Poisson $\nu=0.3$. Foi ainda necessário considerar um módulo de Young de $E=10^5$ kPa. Na figura 2.5 apresenta-se uma representação esquemática do problema em questão.

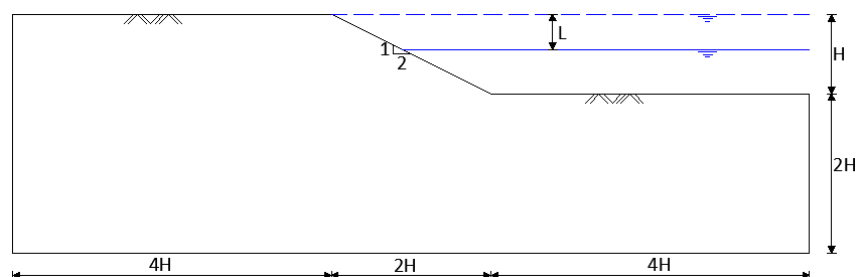


Figura 2.5: Problema de aplicação de um talude homogêneo.

Como nota prévia, refere-se que nos artigos estudados este problema foi considerado pelos autores admitindo o parâmetro $c'/\gamma H=0,05$, sendo que não é dado um valor específico de c' , γ ou H . Deste modo, assume-se um peso volúmico do solo de 20kN/m^3 e para os restantes parâmetros foram analisadas várias conjugações, sendo que se optou por considerar $c'=9\text{kPa}$ e $H=9\text{m}$, visto resultarem em valores mais próximos dos autores.

Para a resolução do problema, referem-se em seguida apenas os ábacos, relativos a cada autor, que dizem apenas respeito a aplicação do problema em questão. Os restantes ábacos encontram-se em anexo.

Morgenstern (1963) analisa apenas o caso de esvaziamento rápido (ver figura 2.2 (b)), apresentando os fatores de segurança, FS , para os diferentes níveis de esvaziamento L/H , como se apresenta na figura 2.6. Da análise da figura em questão, para $\phi'=20^\circ$, verifica-se uma diminuição do fator de segurança no decorrer do esvaziamento, apresentando um valor máximo de 1,84 antes do esvaziamento ($L/H=0$) e um valor mínimo de 0,85 após o esvaziamento total ($L/H=1,0$).

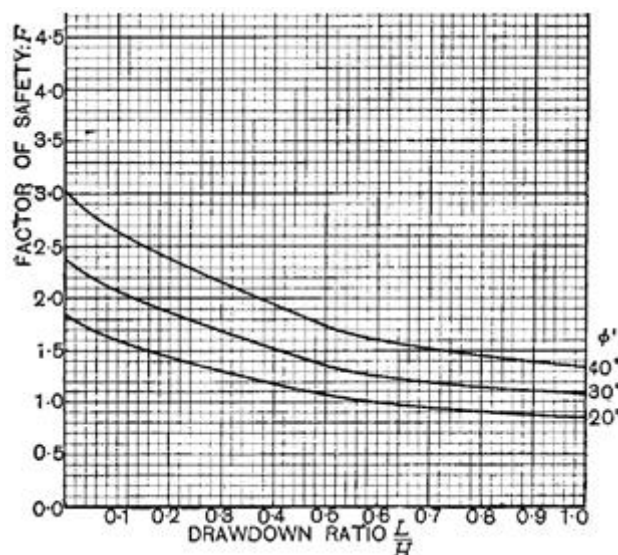


Figura 2.6: Ábaco de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido para um talude 1:2 e $c'/\gamma H=0,05$ (Morgenstern, 1963).

Lane e Griffiths (2000) apresentaram diretamente os resultados do fator de segurança para o problema de aplicação, considerando o caso de esvaziamento lento (ver figura 2.2 (a)) e rápido (ver figura 2.2 (b)). Na figura 2.7, são apresentados estes mesmos resultados, para os dois casos de esvaziamento analisados, correspondentes à curva (i) e (ii), respetivamente. Note-se que este ábaco apresenta um caso de esvaziamento não abordado até então, sendo este referente ao caso de esvaziamento rápido a partir de um nível L/H até $L/H=1,0$. É ainda indicado um fator de segurança mínimo de 1,2.

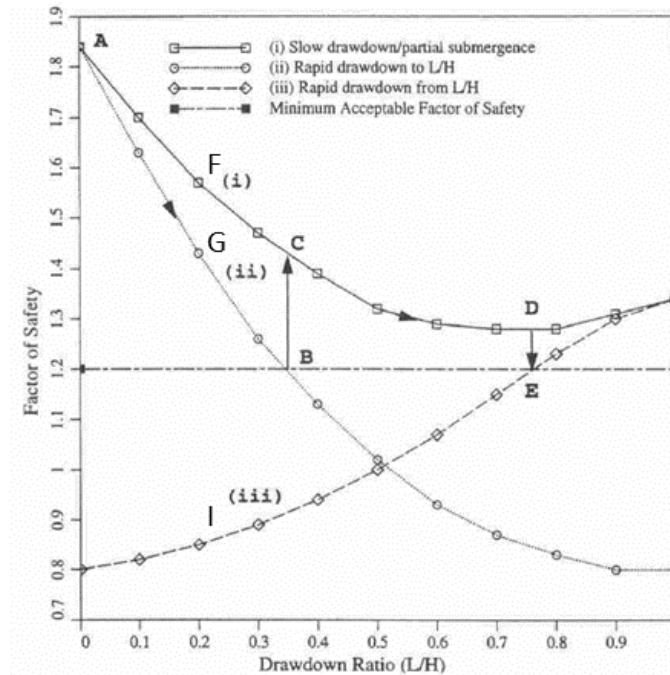


Figura 2.7: Gráfico para diferentes condições de esvaziamento, considerando um talude 1:2 (V:H), $\phi'=20^\circ$, $c'/\gamma H=0,05$ (Lane e Griffiths,2000).

Considerando o caso de esvaziamento lento, verifica-se um valor mínimo do FS de 1,28, entre o nível de esvaziamento $L/H=0,7$ e $L/H=0,8$, sendo que para o esvaziamento total ($L/H=1,0$), o FS aumenta para 1,34. Já para o caso de esvaziamento rápido, o FS diminui ao longo do esvaziamento, sendo inicialmente ($L/H=0$) de 1,84 e após o esvaziamento total ($L/H=1$) de 0,8, apresentando valores muito menores que o caso anterior. Observa-se ainda que, se for considerado um esvaziamento rápido total a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,2$ (Ponto F), o fator de segurança diminui de 1,57 (esvaziamento lento) para 1,43 (esvaziamento rápido, Ponto G).

Considerando agora um FS mínimo de 1,2, o caso de esvaziamento rápido pode ser considerado até ao nível $L/H=0,35$ (Ponto B). Quando estabilizar, ou seja, corresponder ao caso de esvaziamento lento, verifica-se um aumento do FS (Ponto C). Verifica-se também que, para garantir este valor mínimo do FS , apenas se pode proceder ao esvaziamento rápido total, a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,75$ (Ponto E).

Michalowski (2002) analisa apenas o caso de esvaziamento intermédio em que se procede ao rebaixamento do nível de água no talude L_t , considerando a albufeira totalmente vazia ($L/H=1$). Note-se que $L_t/H=1$ corresponde ao caso de esvaziamento lento total, $L_t/H=0$ ao caso de esvaziamento rápido total e $L_t/H=0,5$ ao caso de esvaziamento intermédio considerando L_t . Na figura 2.8 são indicados os ábacos apresentados pelo autor, determinando-se os valores de $F/\tan \phi'$. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.2.

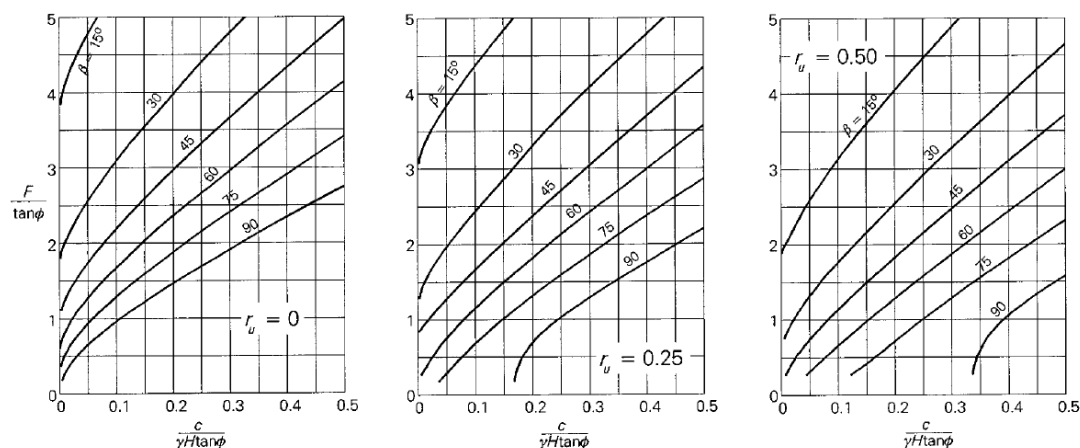


Figura 2.8: Ábacos de estabilidade para taludes homogéneos (Michalowski,2002).

Tabela 2.2: Fatores de Segurança obtidos pelos Ábacos de Michalowski (2002) para o caso de esvaziamento intermédio L_t , considerando um esvaziamento total da albufeira ($L/H=1$).

Nível de esvaziamento no interior do talude	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}$	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	FS
$L_t/H=0$ ($r_u=0,5$)		2,2	0,8
$L_t/H=1$ ($r_u=0$)	0,14	3,5	1,27
$L_t/H=0,5$ ($r_u=0,25$)		2,8	1,02

Observe-se que, após o esvaziamento total da albufeira ($L/H=1,0$), se for considerado um esvaziamento lento, obtém-se um fator de segurança superior ($FS=1,27$), comparativamente ao esvaziamento rápido ($FS=0,8$). Para o caso de esvaziamento intermédio, considerando $L_t/H=0,5$, verifica-se um valor do FS de 1,02, sendo este um valor intermédio comparativamente aos casos de esvaziamento anteriores.

Michalowski e Viratjandr (2006) consideram todos os casos de esvaziamento ilustrados na figura 2.2, sendo o autor mais completo analisado. Na figura 2.9, apresentam-se os ábacos de estabilidade para estes casos de esvaziamento. Os resultados referentes ao problema são apresentados na tabela 2.3.

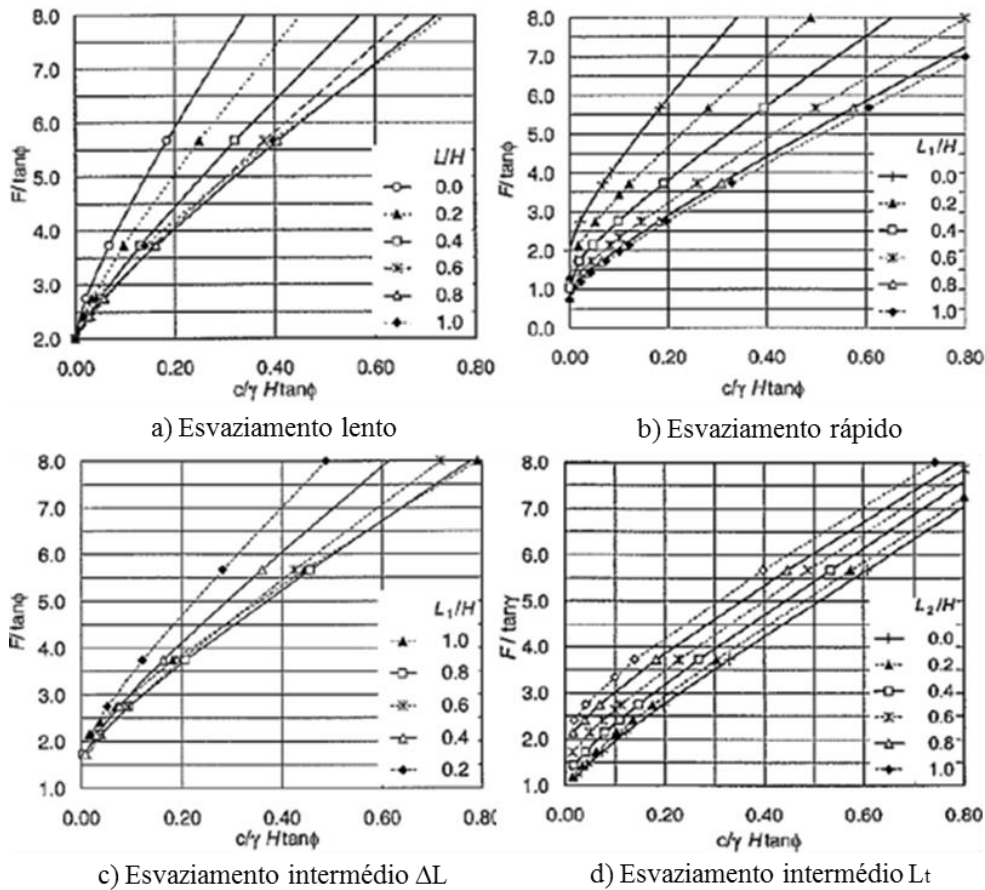


Figura 2.9: Ábacos de estabilidade para um talude 1:2 (V:H) considerando diferentes casos de esvaziamento (Michalowski e Viratjandr, 2006).

Tabela 2.3: Fatores de Segurança obtidos pelos Ábacos de Michalowski e Viratjandr (2006) para esvaziamento rápido estacionário, esvaziamento lento estacionário e esvaziamento intermédio estacionário.

L/H	Esvaziamento Rápido		Esvaziamento Lento		Esvaziamento Intermédio			
					Variação apenas L_t		$\Delta L=0,2H$	
	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	FS	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	FS	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	FS	$\frac{FS}{\tan \phi'}$	FS
0	4,97	1,81	5,00	1,82	2,26	0,82	—	—
0,2	3,96	1,44	4,31	1,57	2,43	0,88	4,00	1,46
0,4	3,19	1,16	3,85	1,40	2,70	0,98	3,60	1,31
0,6	2,72	0,99	3,74	1,36	2,97	1,08	3,30	1,20
0,8	2,45	0,89	3,54	1,29	3,31	1,20	3,20	1,16
1,0	2,75	0,83	3,54	1,29	3,71	1,35	3,42	1,24

Como anteriormente referido, no caso de esvaziamento intermédio considerando apenas o rebaixamento do nível de água no interior do talude L_t , sendo que o reservatório se encontra vazio ($L/H=1,0$), verifica-se que considerando o nível $L_t/H=0$, esta situação corresponde ao esvaziamento rápido total e considerando o nível $L_t/H=1,0$, corresponde ao esvaziamento lento total. Para estes casos, verifica-se que os valores dos fatores de segurança são relativamente próximos.

Nian *et al.* (2011) considerou o problema de aplicação e obteve os resultados apresentados na figura 2.10, para o caso de esvaziamento lento (figura 2.2 (a)) e rápido (figura 2.2 (b)).

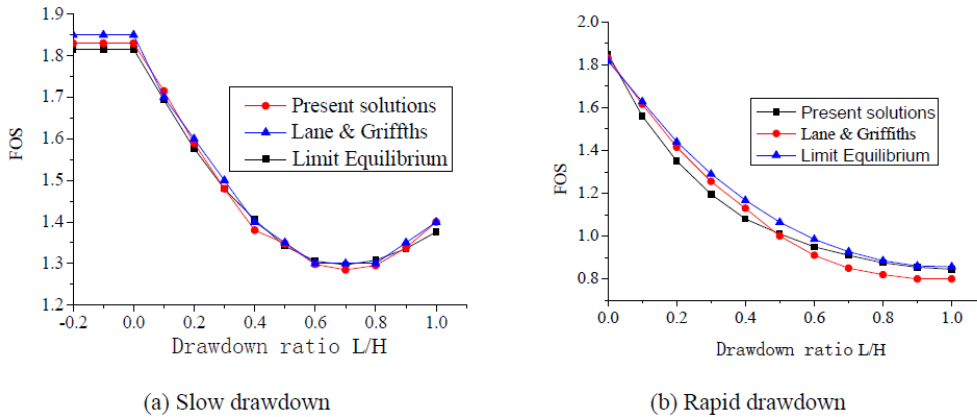


Figura 2.10: Fatores de segurança durante o esvaziamento para um talude 2:1 (H:V), $\phi'=20^\circ$, $c'/\gamma H=0.05$: (a) esvaziamento lento e (b) esvaziamento rápido (Nian *et al.*, 2011).

Sun e Zhao (2013) analisa o caso de esvaziamento lento para diferentes níveis de esvaziamento L/H e o caso de esvaziamento intermédio considerando L_t ($L_t/H=0; 0,5; 1$). É de salientar o facto destes autores indicarem a superfície de rotura, sendo que esta pode ocorrer em três modos diferentes, representados na figura 2.11, assumindo como origem do referencial o pé do talude: (a) Modo de rotura superficial: quando a superfície de rotura passa no pé do talude em $x=0$ e verifica-se $y>0$; (b) Modo de rotura intermédio: a falha ultrapassa o pé do talude ($x=0$) e verifica-se $y<0$; e (c) Modo de rotura profunda: na qual a falha passa para lá do pé do talude (i.e., $x<0$).

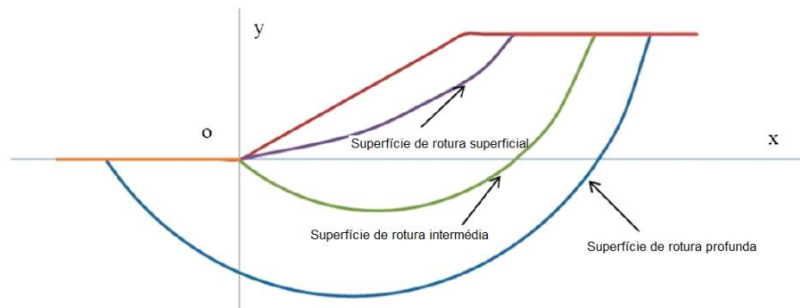


Figura 2.11: Três tipos de superfície de rotura, superficiais, intermédias e profundas (Sun e Zhao, 2013).

Considerando o problema de aplicação, apresenta-se na figura 2.12 os ábacos apresentados por Sun e Zhao (2013) necessários para a resolução do mesmo. Os ábacos em análise não permitem determinar diretamente o valor do fator de segurança, sendo necessário considerar uma linha que une o ponto $(0,0)$ e o ponto $(c/\gamma H, \tan \phi')$, determinando os pontos de interseção nas curvas $L/H=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ e $1,0$ (para o caso de esvaziamento lento) e nas curvas $r_u=0; 0,5$ e 1 (para o caso de esvaziamento intermédio L_t). Retira-se o valor da ordenada correspondente à $\tan \phi'_{rotura}$. É também indicada o tipo de superfície crítica verificada. Os resultados obtidos encontram-se expostos nas tabelas 2.4 e 2.5.

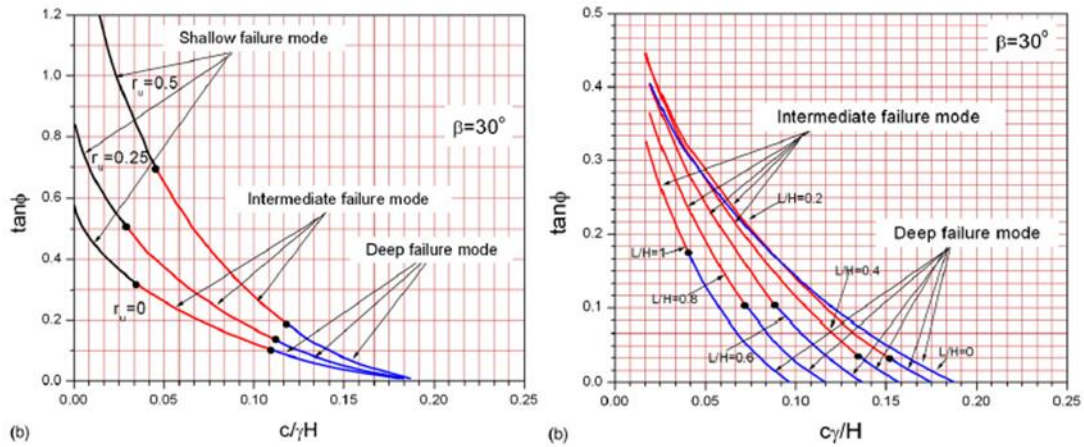


Figura 2.12: Ábaco de estabilidade para taludes homogêneos para diferentes r_u (esquerda) e considerando um esvaziamento lento (direita) (Sun e Zhao, 2013).

Tabela 2.4: Fatores de Segurança resultantes dos ábacos de Sun e Zhao (2013) para o caso de esvaziamento intermédio L_t .

L_t/H	r_u	$\tan \phi'_{rotura}$	$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_{rotura}}$	Superfície de rotura
0	0,5	0,5	0,73	
0,5	0,25	0,38	0,96	Intermédia
1	0	0,3	1,21	

Tabela 2.5: Fatores de Segurança resultantes dos ábacos de Sun e Zhao (2013) para o caso de esvaziamento lento.

L/H	$L/H_{Sun e Zhao}$	$\tan \phi'_{rotura}$	$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_{rotura}}$	Superfície de rotura
0	1,0	0,23	1,58	Intermédia
0,2	0,8	0,26	1,40	Intermédia
0,4	0,6	0,29	1,26	Intermédia
0,6	0,4	0,30	1,21	Intermédia
0,8	0,2	0,31	1,17	Intermédia
1,0	0	0,30	1,21	Profunda

Gao *et al.* (2014) apresentam ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento intermédio considerando diferentes níveis de água no interior do talude L_t/H , sendo que a albufeira se encontra vazia (figura 2.2 (d)), adotando o coeficiente $r_u=0,1; 0,2$ e $0,3$. Da aplicação da equação (2.5), são obtidos os níveis correspondentes a cada valor apresentado de r_u : $L_t/H=0,8; 0,6$ e $0,4$, respetivamente. Apresentam-se esses ábacos nas figuras 2.13, 2.14 e 2.15. O fator de segurança pode ser determinado retirando o valor de $c/\gamma HFS$ ou $\tan \phi' / FS$. É ainda possível verificar se a superfície de rotura, é superficial (verde), intermédia (azul) ou profunda (amarelo), tal como foi ilustrada na figura 2.11. Os resultados obtidos para o problema de aplicação podem ser consultados na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Fatores de segurança obtidos nos ábacos apresentados por Gao *et al.* (2014).

L_t/H	r_u	$\tan \phi' / FS$	FS	Superfície de rotura
0,8	0,1	0,3	1,21	Superficial
0,6	0,2	0,35	1,04	Superficial
0,4	0,3	0,4	0,91	Superficial

Constata-se que o aumento do nível de esvaziamento no interior do talude L_t/H resulta no aumento do fator de segurança FS , visto que para este caso de esvaziamento (intermédio considerando L_t), a situação mais crítica, ou seja, onde se verifica um menor FS , corresponde ao nível $L_t/H=0$ e a situação que verifica um maior FS corresponde ao nível $L_t/H=1,0$ (esvaziamento lento total).

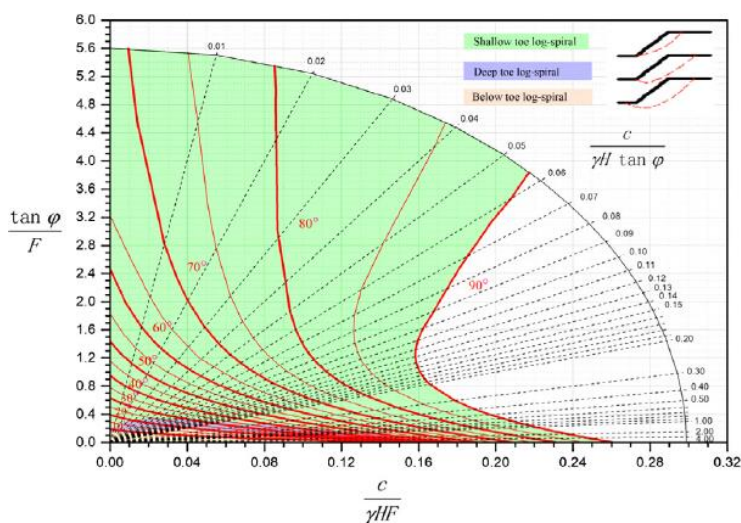


Figura 2.13: Ábaco de estabilidade para um talude homogéneo no nível $L_t/H=0,8$ ($r_u=0,1$) (Gao *et al.*, 2014).

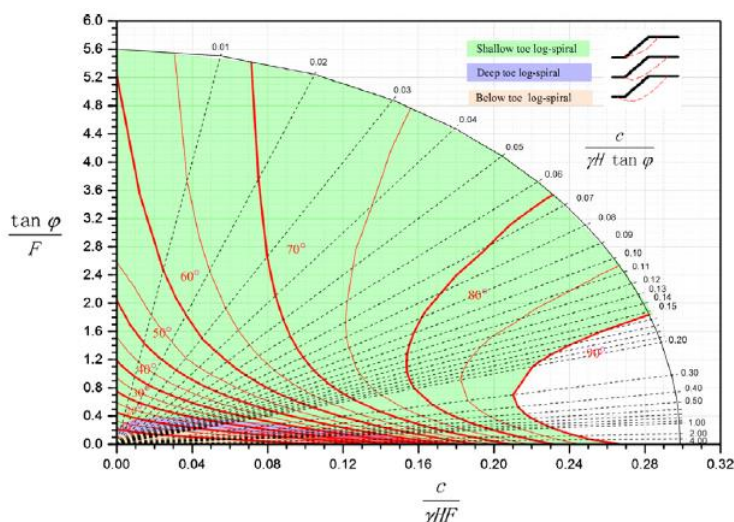


Figura 2.14: Ábaco de estabilidade para um talude homogéneo no nível $L_t/H=0,6$ ($r_u=0,2$) (Gao *et al.*, 2014).

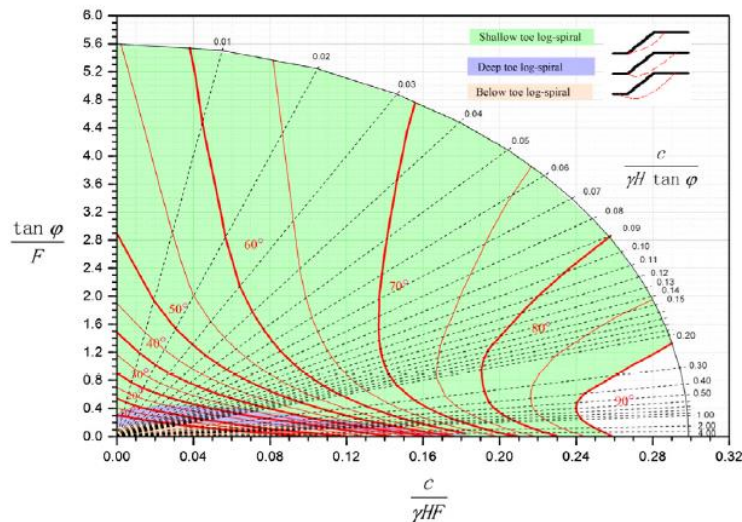


Figura 2.15: Ábaco de estabilidade para um talude homogêneo no nível $L_t/H=0,4$ ($r_u=0,3$) (Gao *et al.*, 2014).

2.3.3 Modelação do problema de aplicação no Plaxis e no Slope

Procede-se à modelação do problema de aplicação no programa de cálculo automático de elementos finitos Plaxis (2015) e equilíbrio limite Slope. São analisados os casos de esvaziamento ilustrados na figura 2.2 (a) esvaziamento lento, (b) esvaziamento rápido, (c) esvaziamento intermédio considerando uma variação $\Delta L=0,2H$ e (d) esvaziamento intermédio considerando L_t .

Foi considerado o modelo de *Mohr Coulomb* para modelar o comportamento do solo. É admitido que o solo apresenta um comportamento drenado em todos os casos de esvaziamento considerados. No Plaxis, a capacidade do solo de reter a água, permitindo uma correta descrição do seu fluxo, foi definida pelo modelo *Van Genuchten* (1980). Este modelo permite relacionar a pressão intersticial, o grau de saturação e a permeabilidade.

Foi utilizada uma malha conforme se apresenta na figura 2.16, constituída por elementos finitos triangulares de quinze nós.

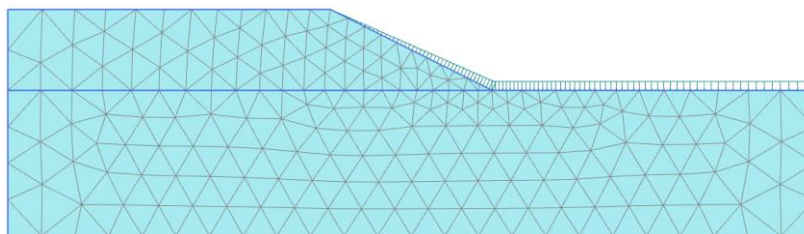


Figura 2.16: Malha de elementos finitos usada no programa Plaxis.

Relativamente ao programa Slope, foi adotado o modelo de *Bishop*, considerando o modelo apresentado na figura 2.17.



Figura 2.17: Modelo utilizado no programa Slope.

Consideram-se diferentes fases de cálculo, consoante o caso de esvaziamento analisado, sendo que o rebaixamento do nível de água é sempre considerado a partir do nível máximo de água. Para o caso de esvaziamento lento e rápido são analisados os níveis de esvaziamento $L/H=0,1$; $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ e $1,0$. Para o caso de esvaziamento intermédio ΔL consideram-se os níveis $L/H=0,2$; $0,4$; $0,6$; $0,8$ e $1,0$. Por último, para o caso de esvaziamento intermédio considerando apenas L_t , são adotados os níveis $L_t/H=0,1$; $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ e $1,0$. Nas figuras 2.18, 2.19 e 2.20 apresentam-se estas fases de cálculo considerando a fase de pleno armazenamento (Fase 1), a fase de esvaziamento no nível $L/H=0,5$ (Fase 6) e a fase de esvaziamento total $L/H=1,0$ (Fase 11), para os diferentes casos de esvaziamento. Na figura 2.21 apresentam-se todas as fases consideradas para o caso de esvaziamento intermédio ΔL .

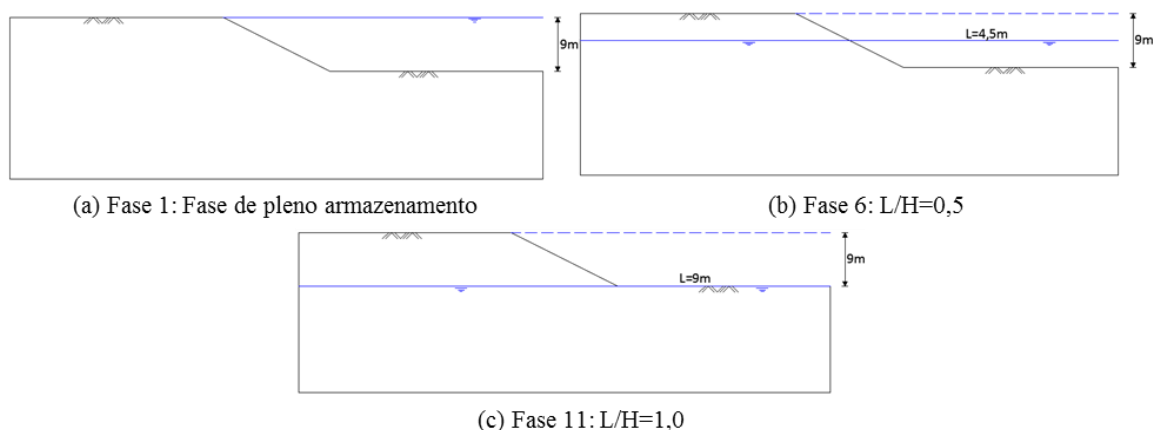


Figura 2.18: Modelação do caso de esvaziamento lento.

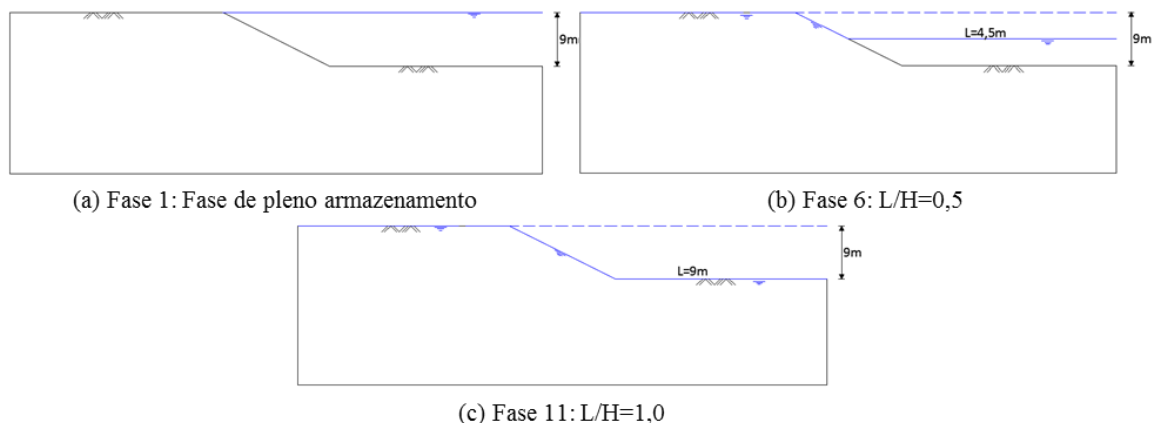


Figura 2.19: Modelação do caso de esvaziamento rápido.

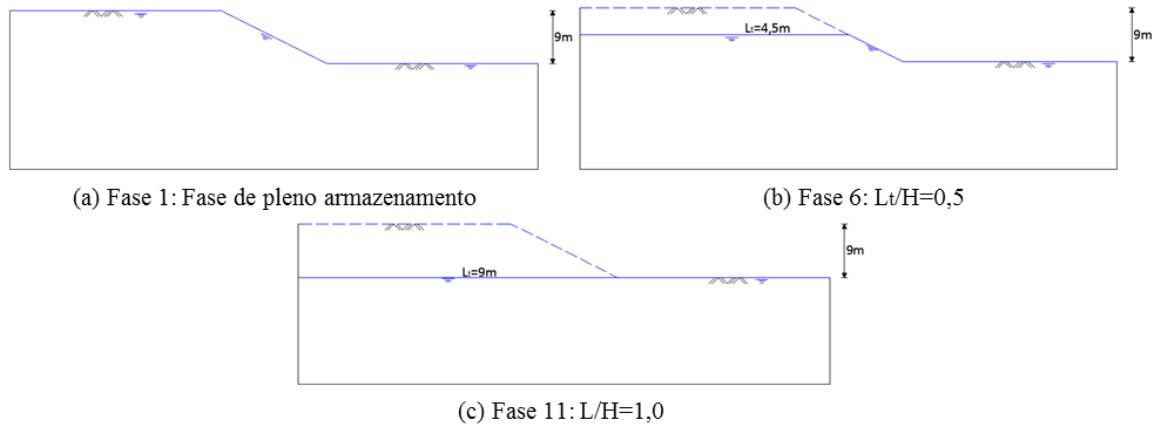


Figura 2.20: Modelação do caso de esvaziamento intermédio considerando L_t .

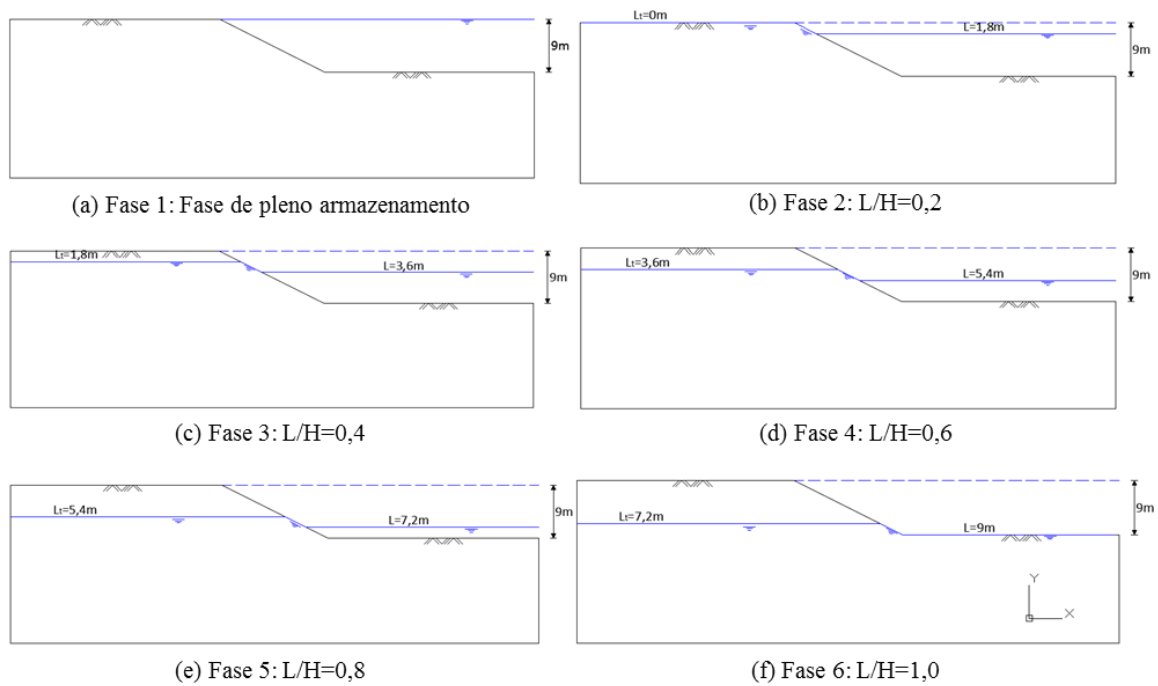


Figura 2.21: Modelação do caso de esvaziamento intermédio considerando ΔL .

Para além das fases descritas, foi também considerada uma fase de análise de segurança para cada nível de esvaziamento, incluindo a situação inicial.

Em prática corrente, o coeficiente de segurança é definido como sendo a relação entre a ação resistente e a ação atuante, sendo que o seu valor mínimo tido como aceitável depende do tipo de obra e da verificação da segurança em causa. Contudo, para analisar a segurança, o programa de cálculo automático Plaxis usa como definição do coeficiente de segurança, como sendo um fator de redução das propriedades resistentes. Ou seja, os parâmetros de resistência do solo $\tan \phi'$ e c' são reduzidos sucessivamente até ocorrer o colapso da estrutura.

A base do método de segurança usado pelo programa considera que o coeficiente de segurança é definido por:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (2.8)$$

sendo τ a tensão de corte máxima e τ_r a tensão necessária para garantir o equilíbrio. Introduzindo a hipótese de Coulomb obtém-se a seguinte condição:

$$FS = \frac{c' + \sigma'_n \tan \phi'}{c'_r + \sigma'_n \tan \phi'_r} \quad (2.9)$$

sendo c' e ϕ' parâmetros de resistência iniciais e σ'_n a componente normal da tensão atual. Por sua vez, c'_r e ϕ'_r correspondem aos parâmetros de resistência reduzidos. Deste modo, a coesão do solo e a tangente do ângulo de resistência ao corte podem ser reduzidos na mesma proporção, isto é:

$$FS = \frac{c'}{c'_r} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_r} \quad (2.10)$$

No programa de cálculo automático Slope, este baseia-se em métodos de equilíbrio limite, considerando o método de fatias em que a massa potencialmente instável é dividida em fatias, sendo analisado o equilíbrio das mesmas. Deste modo, o fator de segurança considera a superfície de deslizamento que conduz à menor relação entre os momentos resistentes e os momentos atuantes, sendo que o colapso ocorre quando estes se igualam.

Os resultados obtidos dos fatores de segurança no Plaxis e no Slope para os diferentes casos de esvaziamento considerados na modelação do problema, são apresentados na figura 2.22.

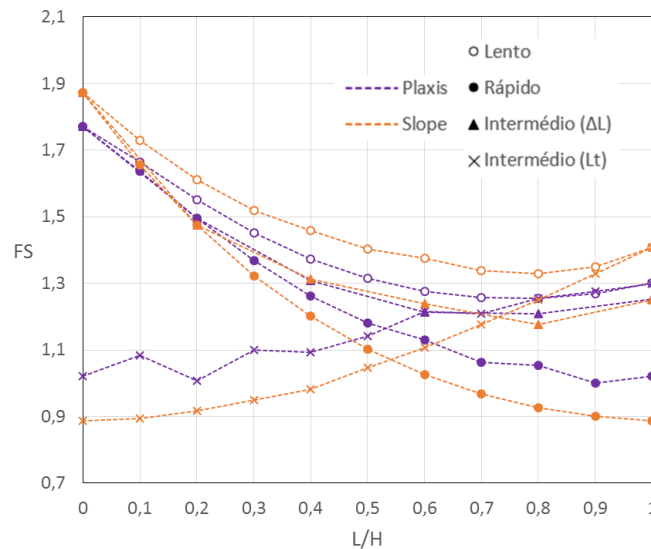


Figura 2.22: Fatores de segurança obtidos no Plaxis e no Slope para os diferentes casos de esvaziamento.

Da observação da figura referida, verifica-se um andamento das curvas semelhantes para os casos de esvaziamento analisados. Observa-se que os FS resultantes do Plaxis são mais elevados que os do Slope, à exceção do caso de esvaziamento lento. Contudo, no caso de esvaziamento intermédio ΔL , os resultados encontram-se muito próximos. A maior variação do FS é verificada no caso de esvaziamento rápido sendo esta de 43,5% no Plaxis e 52,6% no Slope.

2.3.4 Estudo comparativo

Comparam-se agora as soluções obtidas da aplicação dos ábacos de estabilidade apresentados pelos autores estudados e as soluções obtidas da modelação do problema no Plaxis e no Slope. Nas figuras 2.23, 2.24, 2.25 e 2.26 apresentam-se os fatores de segurança FS para os diferentes níveis de esvaziamento da albufera L/H , considerando todos os casos de esvaziamento analisados.

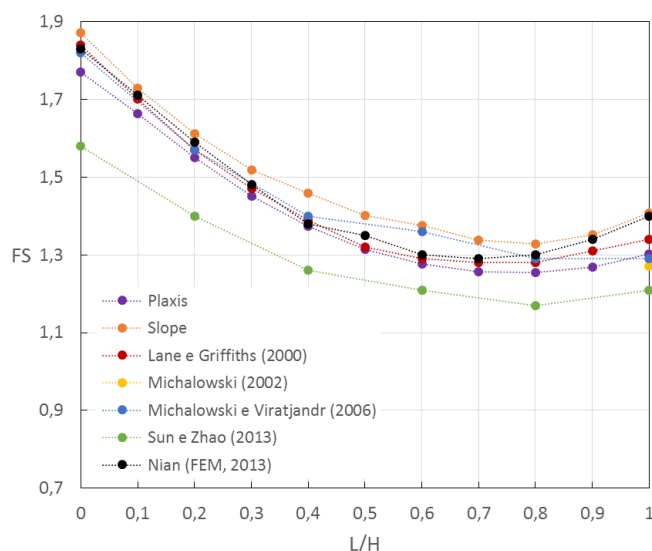


Figura 2.23: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento lento.

Para o caso de esvaziamento lento (figura 2.23), verificam-se FS mais elevados, comparativamente aos restantes casos de esvaziamento considerados de seguida, constatando-se que o processo de esvaziamento lento é o mais seguro para esvaziar o reservatório. Observa-se ainda uma diminuição do FS à medida que o nível de esvaziamento aumenta, apresentando um valor mínimo entre o nível $L/H=0,7$ e $L/H=0,8$. Na fase de pleno armazenamento ($L/H=0$), o FS varia entre 1,872 e 1,58. Já para a fase de esvaziamento total ($L/H=1,0$), este varia entre 1,407 e 1,21. Considerando os resultados obtidos pelo método de elementos finitos (Plaxis, Lane e Griffiths (2000) e Nian *et al.* (2011)), verifica-se que estes são bastantes próximos. Contudo, para o método de equilíbrio limite (Slope, Sun e Zhao (2013)), já se verificou uma maior diferença entre os FS obtidos. Tal pode dever-se ao facto de terem sido considerados modelos diferentes. No Slope foi utilizado o modelo Bishop e Sun e Zhao (2013) consideraram o modelo Morgenstern-Price.

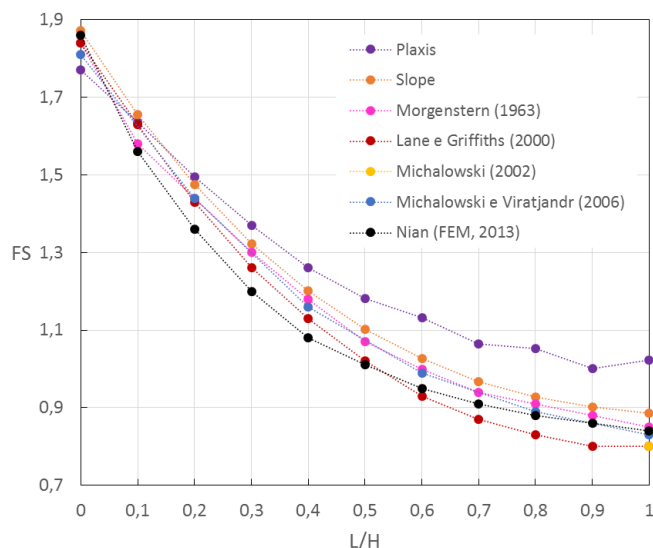


Figura 2.24: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento rápido.

Para o caso de esvaziamento rápido (figura 2.24) observa-se que o FS decresce com o aumento do nível de esvaziamento L/H , sendo este o caso de esvaziamento onde se verifica menores FS , visto traduzir uma situação mais crítica na estabilidade do talude. Verifica-se um valor mínimo de FS entre o nível $L/H=0,9$ e $L/H=1,0$, sendo este nível de esvaziamento maior comparativamente ao caso de esvaziamento anterior. Na fase de pleno armazenamento ($L/H=0$) o FS varia entre 1,872 e 1,771 e após o esvaziamento do reservatório ($L/H=1,0$), este varia entre 1,022 e 0,8. Observe-se ainda que os valores obtidos na modelação do problema Slope, encontram-se muito próximos dos valores de Morgenstern (1963), sendo que ambos consideram o método de cálculo de equilíbrio limite. Os FS obtidos por Morgenstern são ligeiramente superiores a Lane e Griffiths, tal como foi verificado por Lane e Griffiths (2000), considerando várias inclinações.

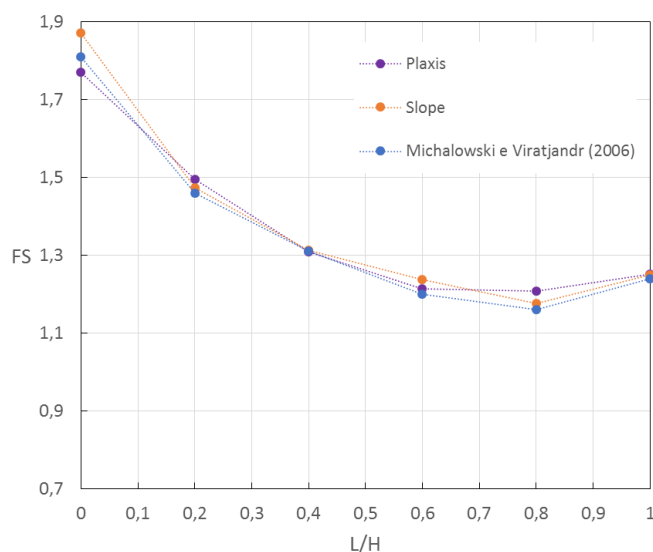


Figura 2.25: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento intermédio ΔL .

Veja-se, agora, o estudo comparativo para o caso de esvaziamento intermédio, considerando uma variação constante $\Delta L=L-L_t=0,2H$ (figura 2.25). Pode verificar-se, da sua análise, que os resultados dos *FS* são bastante próximos, sendo que, na fase de pleno armazenamento ($L/H=0$), o *FS* apresenta uma variação entre 1,872 e 1,771 e na fase de esvaziamento total ($L/H=1,0$), este é aproximadamente o mesmo (1,25). Verifica-se ainda que o *FS* é mínimo no nível de esvaziamento $L/H=0,8$.

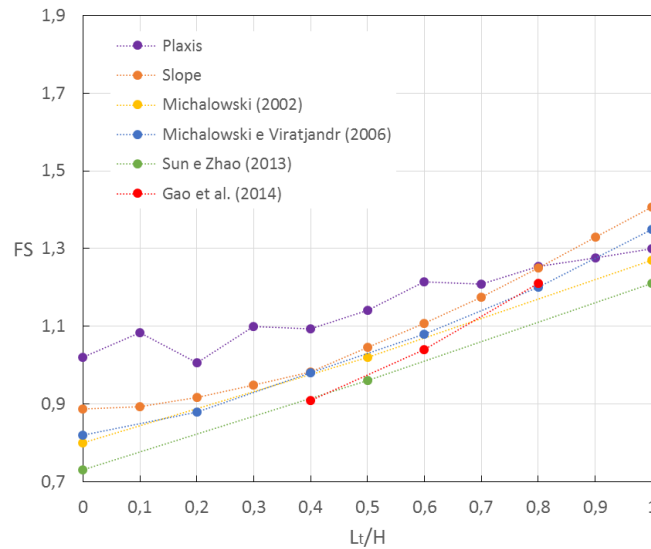


Figura 2.26: Variação do fator de segurança para o caso de esvaziamento intermédio L_t .

Por último, para o caso de esvaziamento intermédio em que apenas é considerado o rebaixamento do nível de água no interior do talude L_t , sendo que a albufeira se encontra vazia (figura 2.26), verifica-se que o *FS* aumenta à medida que o nível de água no interior do talude diminui, ou seja, quanto maior for o nível de esvaziamento L_t/H . Este fenómeno deve-se ao facto de que inicialmente ($L_t/H = 0$) corresponde ao caso de esvaziamento total rápido e após o esvaziamento ($L_t/H = 1,0$) corresponde ao caso de esvaziamento lento total do reservatório. Observa-se ainda um valor máximo do *FS* no nível de esvaziamento total $L_t/H=1,0$ e mínimo entre o nível de esvaziamento $L_t/H=0$ e $L_t/H=0,2$. Note-se que os resultados de Sun e Zhao (2013) são menores comparativamente com os dos restantes autores.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, demonstrou-se a proximidade dos resultados obtidos na modelação do problema e os resultados obtidos pelos diferentes autores citados em bibliografia.

2.4 Revisão bibliográfica: Regime transitório

2.4.1 Enquadramento

A análise de estabilidade de taludes sujeitos a um escoamento em regime transitório, tendo este caso de esvaziamento sido apresentado na secção 2.2.3, foi abordada por diversos autores. Contudo, para este caso de esvaziamento, não foram encontradas propostas de ábacos, visto que estes autores consideraram apenas casos específicos. Evidencia-se assim o interesse deste trabalho, procurando dar resposta a este problema.

Na tabela 2.7 apresenta-se um resumo dos casos considerados pelos autores referentes a taludes homogéneos, para analisar o caso de esvaziamento em regime transitório, referindo os níveis de esvaziamento L/H considerados, os parâmetros do solo e da estrutura, a velocidade de esvaziamento R analisada e o coeficiente de permeabilidade do solo k .

Tabela 2.7: Resumo dos ábacos de estabilidade para taludes homogéneos referentes ao regime transitório.

Autor	Caso de esvaziamento	L/H	Método de cálculo	Caso considerado		R (m/d)	k (cm/s)
				Solo	Talude		
Berilgen (2007)		0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.	Elementos finitos (Plaxis)	$\gamma=20\text{kN/m}^3$; $c'=10\text{kPa}$; $\phi'=20^\circ$; $\Psi=0^\circ$ $E_{50}^{ref}=1000\text{kPa}$ $E_{oed}^{ref}=100\text{kPa}$ $E_{ur}^{ref}=3000\text{kPa}$ $n=0,2$ $p^{ref}=100\text{kPa}$ $m=0,7$	$H=7$ e 14m 1:3 (V:H)		1×10^{-4} 1×10^{-6}
Nian <i>et al.</i> (2011)	Esvaziamento em regime transitório	0; 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,75; 0,9; 1,0.	Elementos finitos	$\frac{c'}{\gamma H}=0,05$; $\phi'=20^\circ$ $E=10^3\text{kPa}$ $\nu=0,3$	1:2 (V:H)	0,1 1,0	1×10^{-4} 1×10^{-5} 1×10^{-6}
López- Acosta (2013)		0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.	Elementos finitos (Plaxis)	$\gamma=20\text{kN/m}^3$; $c'=10\text{kPa}$ $\phi'=20^\circ$ $\Psi=0^\circ$ $E_{50}^{ref}=1000\text{kPa}$ $E_{oed}^{ref}=1000\text{kPa}$ $E_{ur}^{ref}=3000\text{kPa}$ $n=0,2$ $p^{ref}=100\text{kPa}$ $m=0,7$	$H=6\text{m}$ 1:2 (V:H)		1×10^{-4} 1×10^{-6}

2.4.2 Estudos de diferentes autores

Para este caso de esvaziamento, conforme referido na secção 2.2.3, a posição do nível freático no interior do talude, e consequentemente a estabilidade deste, dependem da velocidade de esvaziamento R e da permeabilidade do solo k .

Nas figuras 2.27, 2.28, 2.29 e 2.30 apresenta-se a variação do fator de segurança FS para os diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando os casos de esvaziamento limite (lento estacionário e rápido estacionário) e os casos de esvaziamento intermédio, para diferentes combinações de velocidade de esvaziamento R e do coeficiente de permeabilidade do solo k . Note-se que os casos apresentados se diferenciam pela altura e pela inclinação do talude. Contudo, têm em comum as velocidades de esvaziamento ($R=0,1$ e $1,0\text{m/d}$) e os coeficientes de permeabilidade do solo ($k=1\times 10^{-4}$ e $1\times 10^{-6}\text{cm/s}$).

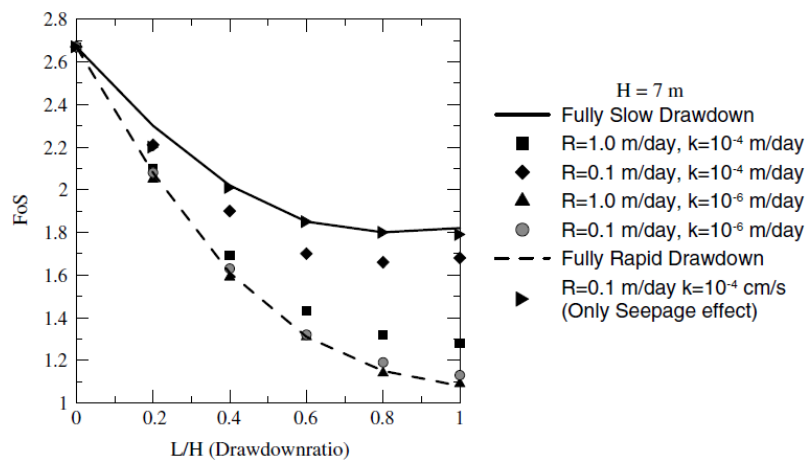


Figura 2.27: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=7\text{m}$ e 1:3 (V:H) (Berilgen, 2007).

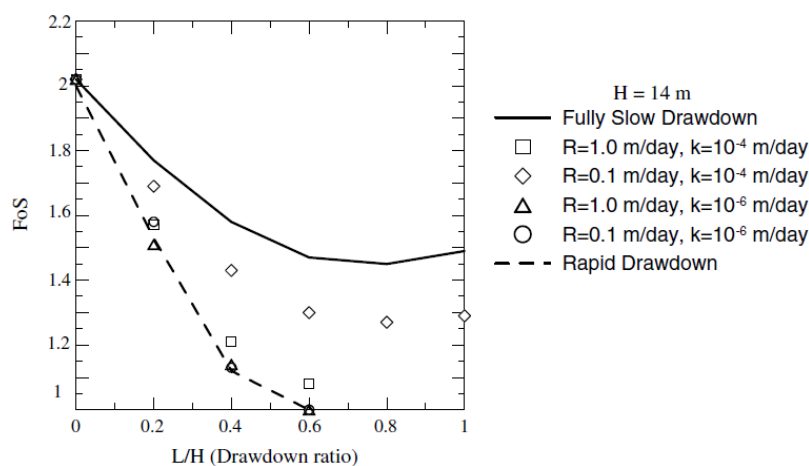


Figura 2.28: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=14\text{m}$ e 1:3 (V:H) (Berilgen, 2007).

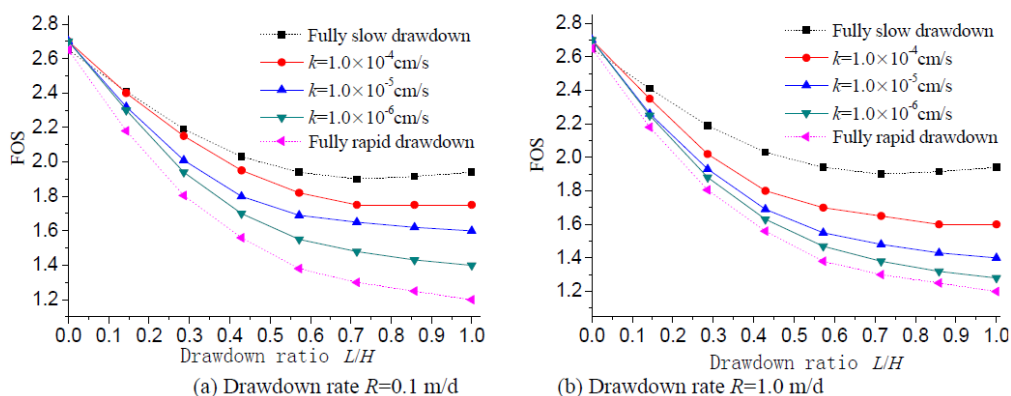


Figura 2.29: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude com $\frac{c'}{\gamma H}=0,05$ e 1:2 (V:H) (Nian *et al.*, 2011).

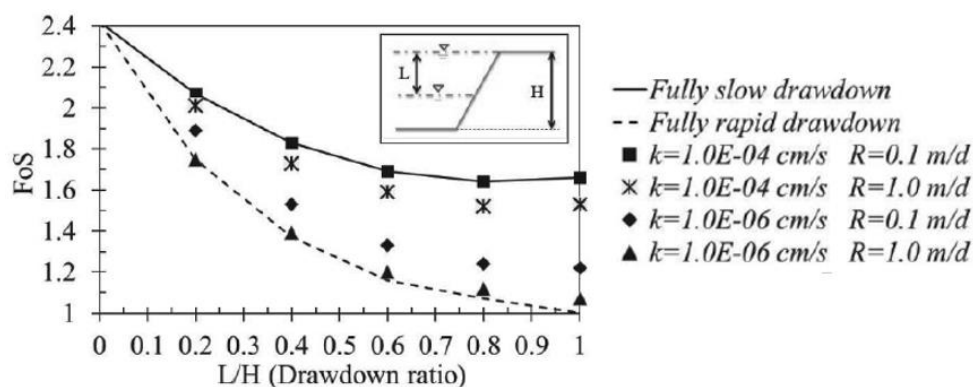


Figura 2.30: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando um talude $H=6$ m e 1:2 (V:H) (López-Acosta *et al.*, 2013).

2.4.3 Modelação do problema de aplicação no Plaxis

Considere-se agora, a modelação do mesmo problema de aplicação referido na secção anterior, mas desta vez considerando o caso de esvaziamento em regime transitório. Recorre-se apenas ao programa de elementos finitos Plaxis (2015). Analisa-se a estabilidade da estrutura, para diferentes coeficientes de permeabilidade, k , e velocidades de esvaziamento, R , adotando uma análise acoplada tensão-deformação e percolação.

De modo a comparar os estudos dos diferentes autores, apresentados na secção anterior, com os resultados obtidos da modelação do problema, consideram-se as velocidades de esvaziamento $R=0,1$ e $1,0$ m/d e os coeficientes de permeabilidade do solo $k=1 \times 10^{-4}$ e 1×10^{-6} cm/s.

Tal como considerado nos estudos dos diferentes autores, admite-se um comportamento do solo drenado para o caso de esvaziamento lento estacionário (figura 2.2 (a)) e um comportamento do solo não drenado para o caso de esvaziamento rápido estacionário (figura 2.2 (b)).

Deste modo, na figura 2.31 apresenta-se a evolução do fator de segurança FS , considerando os níveis de esvaziamento L/H , para as diferentes combinações de coeficientes de permeabilidade k e as velocidades de esvaziamento R estudadas, para o problema de aplicação em questão. Nesta mesma figura, considera-se um valor mínimo do fator de segurança FS de 1,2. Recorde-se que este processo foi considerado por Lane e Griffiths (2000).

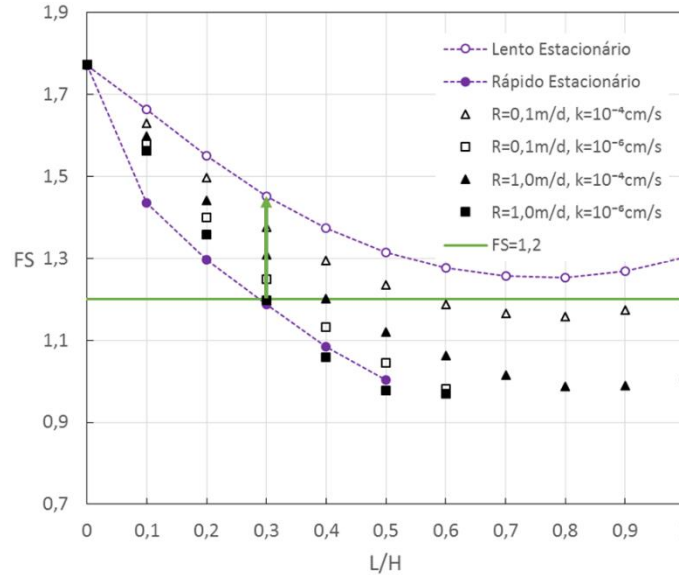


Figura 2.31: Variação do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento L/H considerando o problema de aplicação.

Analisando a figura 2.31 pode-se verificar que o caso de esvaziamento lento estacionário e rápido estacionário representam casos extremos, sendo que os casos de esvaziamento que consideram diferentes combinações de R e k representam casos intermédios a estes. Para ambas as permeabilidades do solo analisadas, observa-se menores FS para maiores velocidades de esvaziamento. Para $R=0,1\text{m/d}$ e $k=1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$, verificam-se FS próximos do caso de esvaziamento lento estacionário, sendo que considerando $R=1,0\text{m/d}$ e $k=1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$, são obtidos FS mais próximos do caso de esvaziamento rápido estacionário. De modo a garantir um FS mínimo de 1,2, o caso de esvaziamento rápido pode ser considerado até ao nível $L/H=0,3$. Quando este nível estabilizar, ou seja, coincidir com o caso de esvaziamento lento, o FS aumenta de 1,188 para 1,451.

2.4.4 Estudo comparativo

Comparando os resultados apresentados na figura 2.31 com as soluções apresentadas nas figuras 2.27, 2.28, 2.29 e 2.30, podem ser constatados alguns aspetos relevantes. Em primeiro lugar verifica-se que para todos os casos apresentados pelos autores, independentemente da altura do talude H e da inclinação que este apresenta, a diminuição do coeficiente de permeabilidade do solo, k , e o aumento da velocidade de esvaziamento, R , contribuem para a diminuição do fator de segurança ao longo do esvaziamento. Verifica-se ainda que o caso de esvaziamento intermédio, considerando $R=0,1\text{m/d}$ e $k=1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$, é o que mais se aproxima do caso de esvaziamento lento estacionário e o caso de esvaziamento intermédio, $R=1,0\text{m/d}$ e $k=1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$, aproxima-se mais ao caso de esvaziamento rápido estacionário.

Observa-se o colapso da estrutura para o caso apresentado por Berilgen (2007) na figura 2.27 a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,6$, para o caso de esvaziamento rápido estacionário, para o caso de esvaziamento $R=1,0\text{m/d}$ e $k=1\times 10^{-6}\text{cm/s}$, $R=1,0\text{m/d}$ e $k=1\times 10^{-4}\text{cm/s}$ e $R=0,1\text{m/d}$ e $k=1\times 10^{-6}\text{cm/s}$. Considerando o problema de aplicação analisado, na figura 2.31 também se observa o colapso do talude homogéneo, a partir do mesmo nível de esvaziamento anteriormente mencionado, para os mesmos casos de esvaziamento, à exceção do caso de esvaziamento intermédio de $R=1,0\text{m/d}$ e $k=1\times 10^{-4}\text{cm/s}$. Tal facto pode dever-se à altura considerada no problema de aplicação ($H=9\text{m}$) ser inferior à altura considerada pelo autor ($H=14\text{m}$).

Na situação de pleno armazenamento ($L/H=0$), verifica-se que o problema de aplicação considerado ($H=9\text{m}$ e 1:2 (V:H)) apresenta um FS de 1,773. Para o caso apresentado na figura 2.30 ($H=6\text{m}$ e 1:2 (V:H)) verifica-se um FS de 2,4. Observa-se que o aumento da altura do talude H contribui para uma diminuição do FS . Considerando agora o caso apresentado na figura 2.27 ($H=7\text{m}$ e 1:3 (V:H)), verifica-se um FS de 2,68 no nível $L/H=0$, sendo que comparativamente ao problema de aplicação, o fator de segurança é superior. Verifica-se portanto, que quanto mais inclinado for o talude, menor é o FS associado ao esvaziamento.

Por fim, note-se que o problema apresentado na figura 2.29 por Nian *et al.* (2011) coincide com o problema de aplicação considerado neste estudo, uma vez que, considera o parâmetro $c'/\gamma H=0,05$. Contudo, uma possível justificação para a diferença dos valores pode dever-se ao facto de não terem sido considerados os mesmos parâmetros c' , γ e H .

Como nota final, é importante referir que para além dos autores mencionados na secção 2.4, relativos ao regime transitório, consideram-se também os autores que estudam este regime, mas considerando barragens de aterro na fase de esvaziamento, como é o caso de Alonso e Pinyol (2008), Huang e Jia (2009), Xinting e Zhenhua (2010), Almeida (2013), Pham *et al.* (2013), VandenBerge *et al.* (2013), Rong *et al.* (2014), López-Acosta *et al.* (2015) e Neves *et al.* (2015). Salienta-se, uma vez mais que, os autores referidos analisam apenas casos específicos de barragens.

Capítulo 3

3 Esvaziamento em barragens de aterro

3.1 Considerações gerais

De acordo com o exposto no capítulo anterior, a maior parte dos ábacos de estabilidade encontrados na bibliografia, tendo em conta diferentes condições de esvaziamento, consideram na maioria taludes homogêneos. Contudo, este trabalho pretende estudar a estabilidade de uma barragem de aterro zonada em fase de esvaziamento, sendo necessário ter em consideração de que modo os estudos anteriores, relativos a taludes genéricos, são aplicáveis a barragens.

Neste capítulo é abordado o problema considerando quatro modelos de estudo, como se encontra esquematizado na figura 3.1, procurando analisar de que modo os fatores de segurança se alteram, considerando a mesma situação de esvaziamento, mas em diferentes estruturas. Na figura referida, apresentam-se os modelos de estudo de um talude de montante homogêneo para uma barragem de aterro zonada. Os modelos têm em comum a geometria (inclinação do talude e altura) e as propriedades do aterro. As alterações de cada modelo e as análises consideradas encontram-se seguidamente descritas:

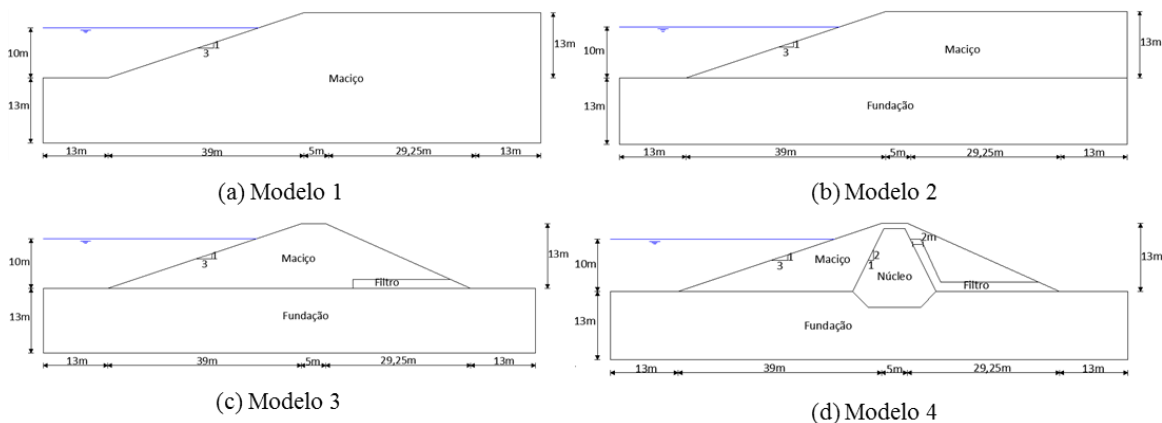


Figura 3.1: Modelos de estudo.

- Modelo 1- Aterro e fundação homogénea

Considera-se um aterro e fundação homogénea com uma altura $h=13\text{m}$, apresentando um nível de água na albufeira $H=10\text{m}$ e uma inclinação de 1:3 (V:H). Considera-se o mesmo solo (maciço) quer para o aterro quer para a fundação.

É analisada a estabilidade da estrutura para o caso de esvaziamento lento estacionário e rápido estacionário.

- Modelo 2- Aterro e fundação homogénea mas distintas

Considera-se o talude acima descrito, mas com um solo de fundação mais resistente, apresentando características suficientemente elevadas para que a estabilidade da estrutura seja apenas condicionada pelo aterro, de modo a limitar a percolação pela fundação.

É analisada a estabilidade da estrutura para o caso de esvaziamento lento estacionário, rápido estacionário e para o caso de transitório, sendo considerados três coeficientes de permeabilidade do maciço diferentes (mantendo a relação k_v/k_h constante) e duas velocidades de esvaziamento.

- Modelo 3- Barragem de aterro homogénea e fundação

Considera-se uma barragem de aterro homogénea constituída por um único material (maciço) e um tapete drenante horizontal (filtro), de espessura 2m, permitindo que a água seja drenada da estrutura de terra na quantidade necessária durante o período de vida útil da estrutura. Neste modelo, considera-se a mesma geometria para o talude de montante que os modelos anteriores, sendo que para o talude de jusante é adotada uma inclinação de 1:2,25 (V:H) e uma largura no coroamento de 5m.

Analisa-se a estabilidade da estrutura sujeita a um esvaziamento em regime transitório, sendo considerados os coeficientes de permeabilidade do maciço e as velocidades de esvaziamento analisadas no caso anterior.

- Modelo 4- Barragem de aterro zonada e fundação

Considera-se uma barragem de aterro zonada constituída por maciços estabilizadores de montante e jusante, por um núcleo argiloso e por um filtro de chaminé arenoso instalado na face de jusante do núcleo. Nestas obras geotécnicas, grande parte da perda de carga efetua-se no núcleo central, portanto, é nessa região de baixa permeabilidade que ocorrem os maiores gradientes hidráulicos e conseqüentemente as forças de percolação mais elevadas. Assim, para evitar a erosão interna das partículas mais finas existentes no núcleo, aumentando também por associação a capacidade erosiva da água, é indispensável a disposição de uma zona do aterro com função de filtro na interface do núcleo com o maciço estabilizador de jusante. Considera-se a mesma geometria do modelo anterior, acrescentando um núcleo central com uma largura no topo de 4m, uma inclinação de 2:1 (V:H) e uma profundidade para a vala corta-águas de 3m e um filtro chaminé com as mesmas propriedades que o filtro adotado no modelo anterior.

A estabilidade da estrutura sujeita a um esvaziamento em regime transitório é avaliada considerando os coeficientes de permeabilidade do maciço e as velocidades de esvaziamento assumidos nos casos anteriores.

3.2 Modelação

A modelação tensão-deformação realizada foi feita através do programa de cálculo automático Plaxis (2015), sendo representadas as malhas de elementos finitos utilizadas nos cálculos na figura 3.2, constituídas por elementos triangulares de quinze nós. Os modelos de estudo foram simulados em estado plano de deformação.

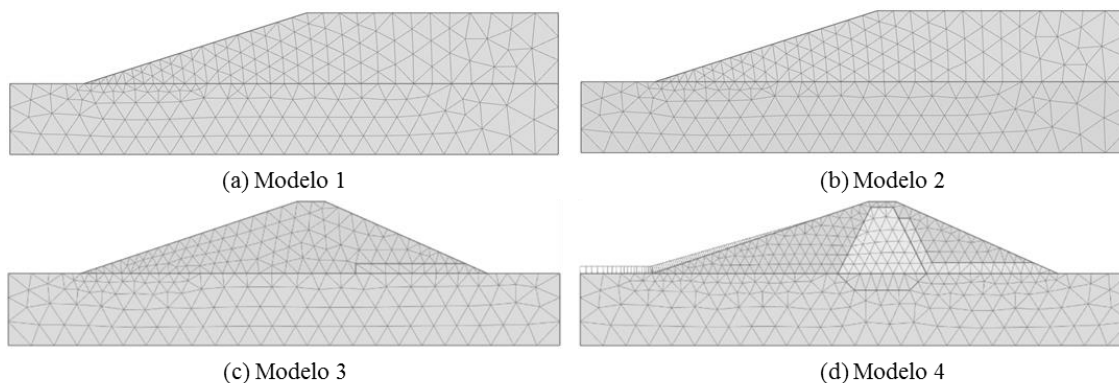


Figura 3.2: Malhas de elementos finitos.

Em relação às condições de fronteira de percolação, considerou-se uma fronteira impermeável na fundação, de modo a que o escoamento ocorra apenas através do aterro.

Para modelar o comportamento dos solos optou-se por utilizar o modelo de Mohr Coulomb com os parâmetros indicados na tabela 3.1 (Almeida, 2013). Considerou-se um comportamento drenado para os solos, à exceção do solo do núcleo. Para descrever o comportamento hidráulico para solos não saturados, o programa Plaxis (2015) adota o modelo proposto Van Genuchten (1980).

Tabela 3.1: Parâmetros do solo.

	Fundação	Filtro	Maciço	Núcleo
γ (kN/m ³)	25	19	21	20
γ_{sat} (kN/m ³)	26	19	21.5	21
k_h (m/s)	9×10^{-8}	3×10^{-3}	5×10^{-6}	1×10^{-8}
k_v (m/s)	9×10^{-8}	3×10^{-3}	1×10^{-6}	2×10^{-9}
k_h/k_v	1	1	5	5
E_{ref} (MPa)	100	15	40	25
ν	0,3	0,35	0,2	0,3
c' (kPa)	40	1	10	13
ϕ' (°)	35	35	30	28

Conforme se apresenta na tabela 3.1, numa barragem de aterro é comum admitir uma permeabilidade anisotrópica, dado que a permeabilidade na direção paralela à estratificação é, geralmente, bastante superior à da direção perpendicular, devido à fase de construção destas estruturas, onde são compactadas em camadas horizontais, apresentando-se estratificadas não só devido à diferença de textura do solo, mas também ao grau de compactação das diferentes camadas.

Procedeu-se à análise de níveis de esvaziamento diferentes, consoante os modelos de estudo. Para o modelo 1 (aterro e fundação homogénea) e o modelo 2 (aterro e fundação homogénea mas distintos), consideram-se os níveis $L/H=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ e $1,0$. Já para o modelo 3 (barragem homogénea e fundação) e o modelo 4 (barragem zonada e fundação), foram analisados os níveis $L/H=0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ e $1,0$.

Na fase inicial, considera-se o nível de pleno armazenamento (NPA) em regime de escoamento estacionário.

Salienta-se o facto de que todos os níveis de esvaziamento L/H analisados começam desde o NPA. Assim, é adotada uma análise acoplada tensão-deformação e percolação para simular a fase de esvaziamento em regime transitório e uma análise em regime estacionário para simular os casos de esvaziamento lento estacionário e rápido estacionário.

Para além das fases descritas, foi também considerada uma fase de análise de segurança para cada nível de esvaziamento, incluindo a situação inicial.

3.3 Influência do solo de fundação na estabilidade durante o esvaziamento

3.3.1 Regime estacionário

Para avaliar a estabilidade de um talude de modo a considerar a influência do solo de fundação, são analisados os modelos de estudo 1 e 2.

Considera-se um escoamento em regime estacionário, sendo analisados os casos de esvaziamento lento estacionário (figura 2.2 (a)) e rápido estacionário (figura 2.2 (b)).

Na figura 3.3 é apresentada a evolução do fator de segurança, FS , para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando os dois modelos de estudos.

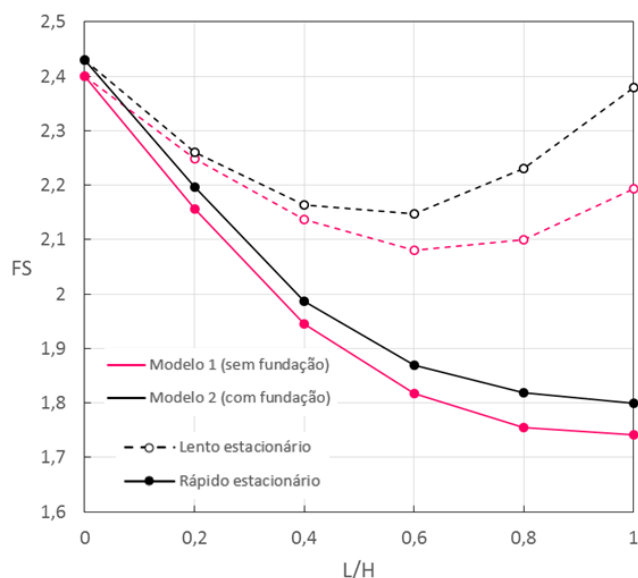


Figura 3.3: Modelos 1 e 2: Influência do solo de fundação no fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento.

Da análise da figura 3.3 pode reter-se que para ambos os casos de esvaziamento analisados (rápido e lento estacionário), os FS são maiores quando se considera o talude com um solo de fundação mais resistente (modelo 2). Observa-se que o FS é mínimo no nível $L/H=0,6$ para o caso de esvaziamento lento e no nível $L/H=1,0$ para o caso de esvaziamento rápido estacionário, em ambos os modelos. Note-se ainda que para caso correspondente ao esvaziamento lento, verifica-se uma variação do FS , entre o modelo de estudo 1 e 2, de 8,5% correspondente ao nível $L/H=1,0$. Considerando o caso de esvaziamento rápido, esta variação do FS é de 3,2%. Consta-se, portanto, que a influência do solo de fundação é mais notória no caso de esvaziamento lento estacionário.

A figura 3.4 apresenta os pontos plásticos na fase de colapso, verificando a superfície de rotura que se forma no caso de esvaziamento rápido estacionário total ($L/H=1,0$). Para o modelo 1 verifica-se que a superfície de rotura é mais profunda comparativamente ao modelo 2.

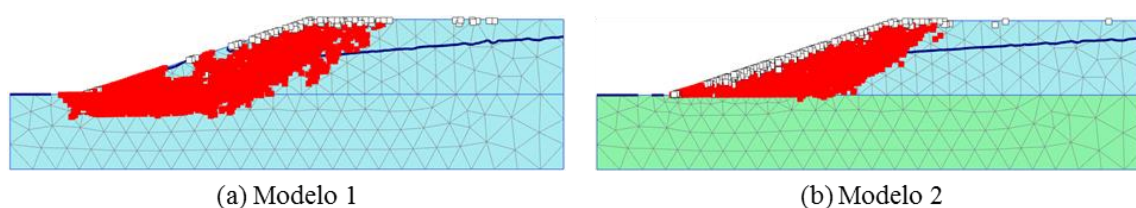


Figura 3.4: Modelos 1 e 2: Pontos plásticos no colapso para o caso de esvaziamento rápido estacionário no nível de esvaziamento $L/H=1,0$.

3.3.2 Regime transitório

Para analisar a estabilidade do modelo 2 (aterro e fundação homogénea mas distintas) submetido a um esvaziamento em regime transitório, são adoptadas as combinações de valores do coeficiente de permeabilidade horizontal e vertical do maciço diferentes, mantendo a relação k_h/k_v constante e as velocidades de esvaziamento da albufeira conforme indicado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Velocidade de esvaziamento e coeficiente de permeabilidade considerados para o modelo 2.

R (m/d)	k_h/k_v	k_h (m/s)	k_v (m/s)
0,1	5	5×10^{-5}	1×10^{-5}
		5×10^{-6}	1×10^{-6}
1,0	5	5×10^{-7}	1×10^{-7}
		5×10^{-5}	1×10^{-5}
1,0	5	5×10^{-6}	1×10^{-6}
		5×10^{-7}	1×10^{-7}

Na figura 3.5 apresentam-se os fatores de segurança para os diferentes níveis de esvaziamento L/H , para as velocidades de esvaziamento consideradas: $R=0,1$ m/d e $R=1,0$ m/d, respetivamente. Na mesma figura, estão igualmente indicadas as situações de esvaziamento lento estacionário e esvaziamento rápido estacionário apresentados anteriormente (ver figura 3.3), consideradas como duas situações limite.

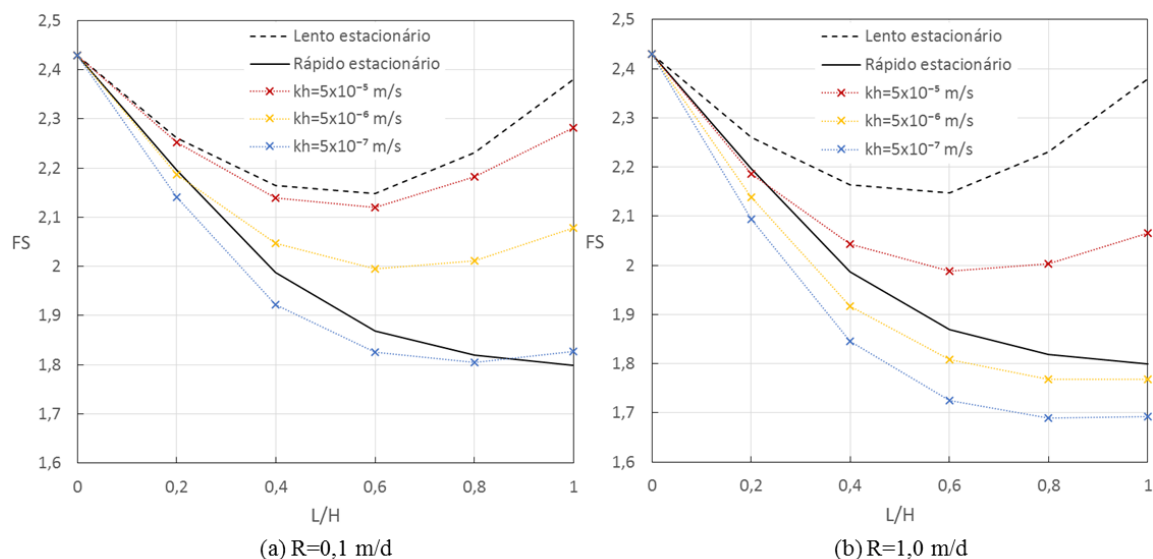


Figura 3.5: Modelo 2: Fator de segurança ao longo do esvaziamento para diferentes combinações de R e k_h .

Analisando a figura 3.5, observa-se que para as combinações de k_h e R consideradas neste estudo, não se verificam que estas representem situações intermédias, relativamente às situações limite (esvaziamento lento estacionário e rápido estacionário). Esta situação pode ser justificada na medida em que o esvaziamento rápido estacionário traduz uma situação de comportamento do solo não drenado, sendo que se fosse considerado esse comportamento do solo, os FS obtidos seriam menores, contudo não foi esta a situação modelada visto que para um maciço estabilizador de uma barragem é considerado um comportamento drenado.

Como seria de esperar, verifica-se que em ambos os casos ($R=0,1$ m/d e $R=1,0$ m/d), a diminuição do coeficiente de permeabilidade horizontal do maciço contribui para a diminuição do FS no decorrer do esvaziamento. Observa-se que para os coeficientes de permeabilidade horizontais admitidos, o FS é mínimo entre o nível de esvaziamento L/H de 0,6 e 1,0.

Para uma menor permeabilidade do solo ($k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s) e uma velocidade de esvaziamento $R=0,1$ m/d são obtidos os menores valores do FS , sendo que considerando uma velocidade de esvaziamento $R=1,0$ m/d, verifica-se mais uma vez esta situação. Deste modo, é possível concluir que mesmo para um R baixo, a drenagem do solo continua a ser baixa.

Verifica-se ainda que para um solo com elevada permeabilidade ($k_h=5 \times 10^{-5}$ m/s), tanto para $R=0,1$ m/d como para $R=1$ m/d, apesar de o solo drenar parcialmente durante o esvaziamento, os FS continuam menores em comparação com o esvaziamento lento estacionário. Esta diferença é maior, quanto maior for a velocidade de esvaziamento admitida.

3.4 Barragem de aterro homogénea e fundação

Considerando o modelo 3 procedeu-se à análise de estabilidade na fase de esvaziamento, segundo um regime transitório, para as velocidades de esvaziamento $R=0,1$ e $1,0$ m/d e uma relação $k_h/k_v=5$, adotando as mesmas combinações de valores do coeficiente de permeabilidade horizontal, k_h , e vertical, k_v , estudadas na secção anterior, conforme se apresenta na tabela 3.2.

Os resultados obtidos para a análise da estabilidade da estrutura encontram-se apresentados na figura 3.6, considerando as duas velocidades de esvaziamento analisadas.

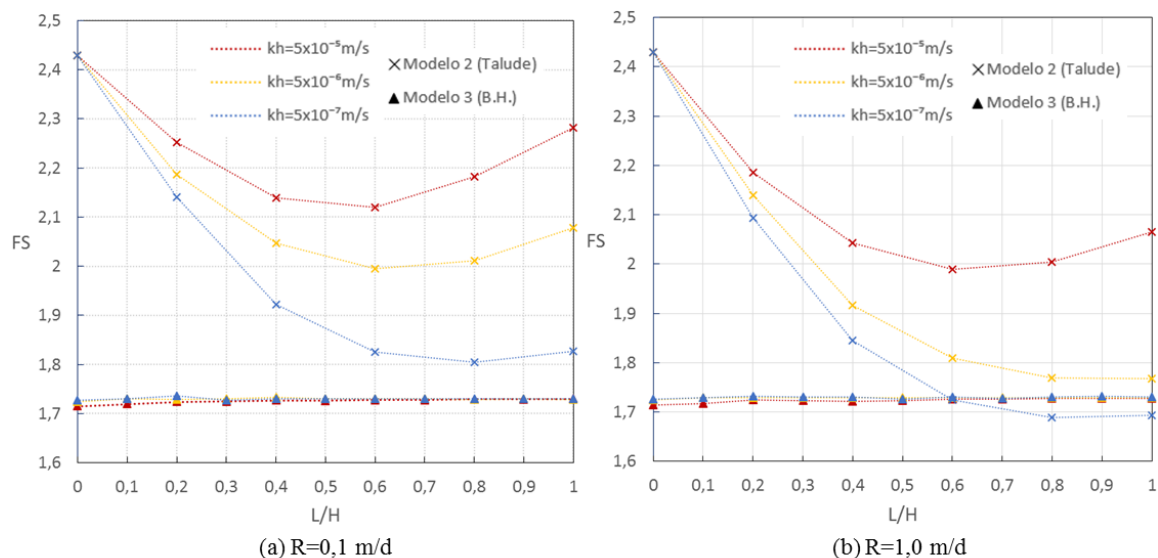


Figura 3.6: Modelos 2 e 3: Fator de segurança ao longo do esvaziamento considerando diferentes combinações R e k_h .

Na figura apresentada, verifica-se que as diferenças notadas no caso anterior (modelo 2), para diferentes valores de k_h não são tão evidentes quando se considera uma barragem de aterro homogénea, visto que os FS são relativamente próximos, apresentando um valor médio de 1,73, tanto para $R=0,1$ m/d como para $R=1,0$ m/d, independentemente do k_h admitido. Verifica-se ainda que comparativamente ao modelo 2 (aterro e fundação homogénea mas distintas), os FS são menores, visto que as condições de fronteira da estrutura são diferentes, deixando de existir uma massa de solo a jusante.

Uma vez que para as velocidades de esvaziamento analisadas não se verificou variação significativas do FS , independentemente do k_h admitido, considera-se de seguida, velocidades de esvaziamento mais elevadas ($R=2, 3$ e 4 m/d), para uma situação mais crítica de permeabilidade ($k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s). Na figura 3.7 apresenta-se a evolução dos FS com os diferentes níveis de esvaziamento L/H , para as velocidades de esvaziamento da albufeira referidas. Observa-se, mais uma vez, que o FS mantém-se relativamente constante apresentando um valor médio de 1,73.

Relativamente aos pontos plásticos verificados nas fases de colapso, ao longo do esvaziamento, foi verificado que para $R=0,1$ m/d e $R=1,0$ m/d, o talude crítico é o talude de jusante, independentemente da permeabilidade do maciço k_h . Na figura 3.8, verifica-se que mesmo para

o caso em que se considera um coeficiente de permeabilidade horizontal do maciço reduzido ($k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s) e a uma velocidade de esvaziamento elevada $R=4$ m/d constata-se, de novo, que o talude crítico corresponde ao talude do maciço estabilizador de jusante. Este fenómeno deve-se ao facto de se estabelecerem forças de percolação, possibilitando o seu escorregamento, apesar de ter sido considerado um tapete drenante para retirar a água da estrutura de terra.

Após o estudo do caso de uma barragem homogénea com um tapete drenante, considera-se de seguida uma barragem de aterro zonada.

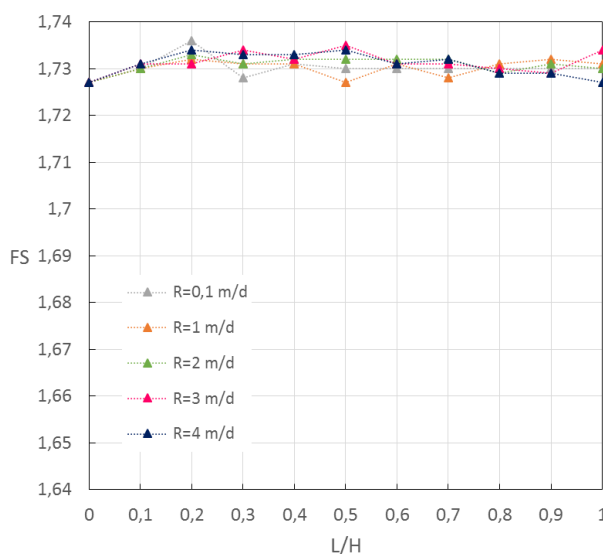


Figura 3.7: Modelo 3: Variação do FS ao longo do esvaziamento para diferentes velocidades de esvaziamento, considerando $k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s.

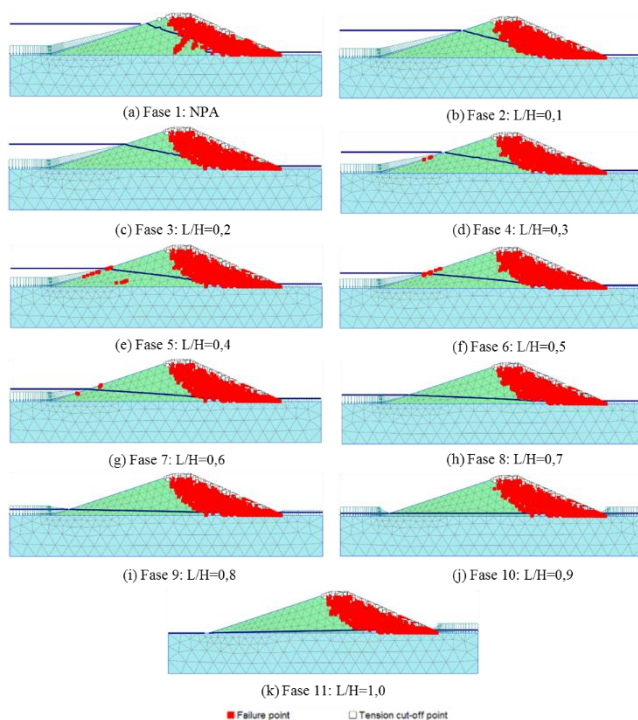


Figura 3.8: Modelo 3: Pontos Plásticos no colapso para $R=4$ m/d e $k_h=1 \times 10^{-7}$ m/s.

3.5 Barragem de aterro zonada e fundação

Considere-se agora o modelo de estudo 4, de modo a avaliar a estabilidade de uma barragem de aterro zonada submetida a diferentes condições de esvaziamento, adotando um regime transitório. Admite-se novamente as velocidades de esvaziamento $R=0,1\text{m/d}$ e $R=1,0\text{m/d}$ e uma relação $k_h/k_v=5$, adotando as mesmas combinações de valores do coeficiente de permeabilidade horizontal do maciço, k_h , e vertical, k_v , conforme indicado na tabela 3.3 e mantendo as restantes propriedades dos solos.

Na figura 3.9 apresenta-se a variação do fator de segurança, FS , para diferentes níveis de esvaziamento, L/H , para os coeficientes de permeabilidade do maciço estabilizador, considerando o modelo 3 (barragem homogénea) e o modelo 4 (barragem zonada), para as velocidades de esvaziamento $R=0,1\text{m/d}$ e $R=1,0\text{m/d}$.

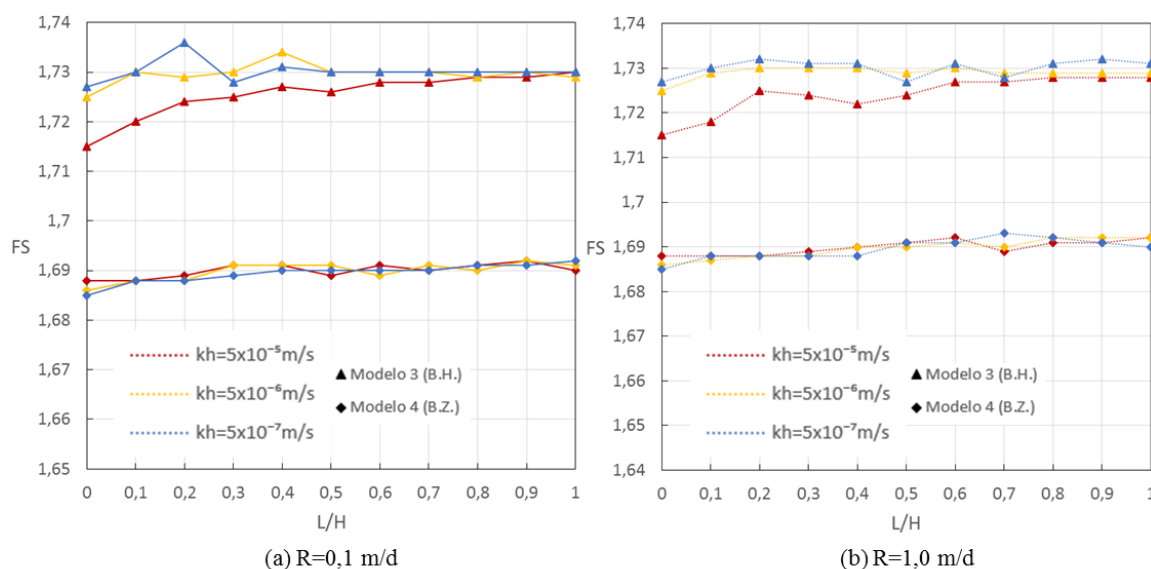


Figura 3.9: Modelos 3 e 4: Fator de segurança ao longo do esvaziamento considerando diferentes combinações R e k_h .

À semelhança do caso anterior (modelo 3), verifica-se que, tanto para $R=0,1\text{ m/d}$ como para $R=1,0\text{m/d}$, os fatores de segurança são relativamente próximos, apresentando um valor médio de 1,69, ou seja, quase não há influência do esvaziamento na estabilidade da barragem. Assim sendo, considera-se velocidades de esvaziamento da albufeira maiores ($R=2, 3$ e 4m/d), para uma menor permeabilidade ($k_h=5 \times 10^{-7}\text{ m/s}$), apresentando-se os fatores de segurança obtidos durante o esvaziamento na figura 3.10.

Ao contrário do modelo anterior (barragem homogénea), para este modelo já se verifica uma variação do FS . Observa-se que até ao nível $L/H=0,6$, apesar da velocidade de esvaziamento aumentar, os valores dos FS são relativamente constantes a 1,69. Note-se que o FS é mínimo para um nível de esvaziamento cada vez maior à medida que aumenta a velocidade de esvaziamento, ou seja, para $R=3\text{m/d}$ o valor mínimo do FS no nível $L/H=0,8$ e para $R=4\text{m/d}$ no nível $L/H=0,9$.

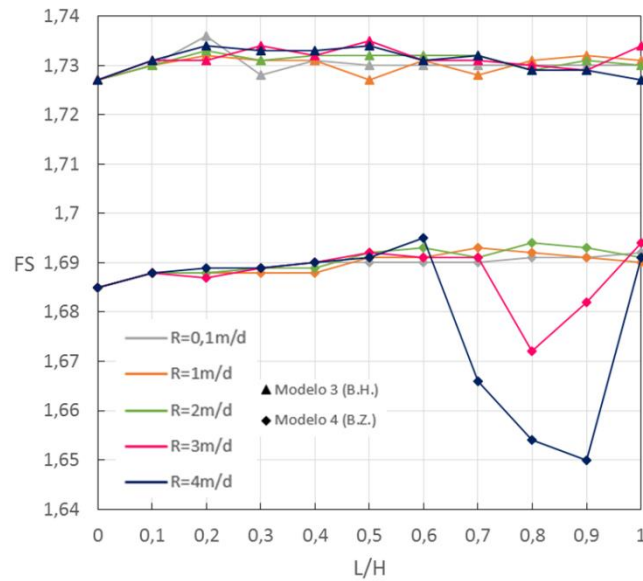


Figura 3.10: Modelos 3 e 4: Variação do FS ao longo do esvaziamento para diferentes velocidades de esvaziamento, considerando $k_h=5 \times 10^{-7} \text{m/s}$.

No que diz respeito à evolução dos pontos plásticos nas fases de colapso para os diferentes níveis de esvaziamento, considerando uma velocidade de esvaziamento $R=1\text{m/d}$ e um coeficiente de permeabilidade horizontal dos maciços de $k_h=5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ verifica-se que o talude crítico é o de jusante (ver figura 3.11).

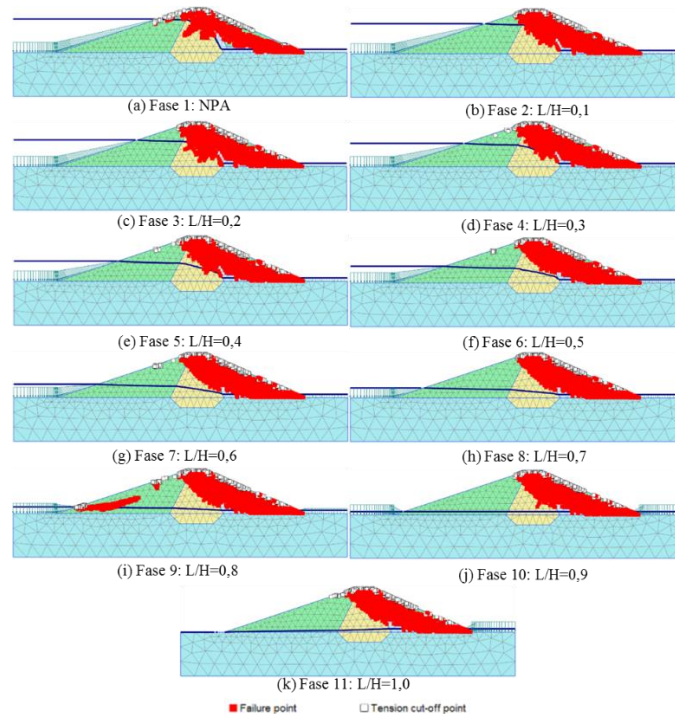


Figura 3.11: Modelo 4: Pontos Plásticos no colapso para $R=1\text{m/d}$ e $k_h=1 \times 10^{-7} \text{m/s}$.

Para as velocidades de esvaziamento mais elevadas ($R=2, 3$ e 4m/d), constatou-se que a partir do nível $L/H=0,6$, o talude crítico varia consoante a velocidade de esvaziamento considerada. Deste modo, apresentam-se de seguida, os pontos plásticos no colapso, a partir do nível $L/H=0,6$, para as diferentes velocidades de esvaziamento consideradas (figura 3.12). Observa-se que considerando diferentes velocidades de esvaziamento, a situação crítica a montante depende deste parâmetro, sendo que quanto maior for a velocidade de esvaziamento considerada, obtém-se problemas a montante a um nível de esvaziamento menor.

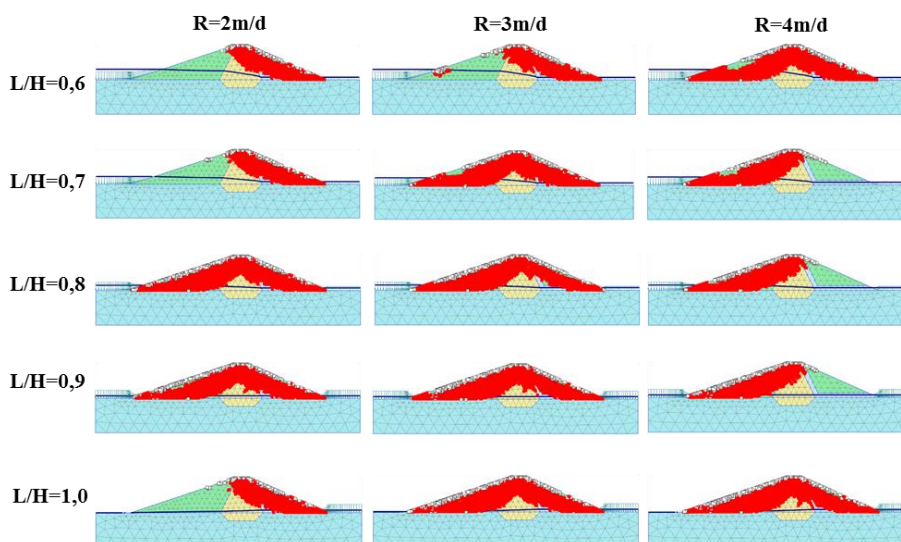


Figura 3.12: Pontos plásticos no colapso considerando as velocidades de esvaziamento analisadas.

3.6 Observações finais

Com base nos resultados anteriormente apresentados, constata-se que a análise de estabilidade para os diferentes modelos de estudo analisados, diferenciam-se quando se considera a evolução dos fatores de segurança ao longo do esvaziamento. De facto, verificou-se que considerando um talude, o fator de segurança diminui à medida que o nível de água rebaixa, sendo a permeabilidade do solo um fator condicionante. Contudo, para uma barragem de aterro homogénea e uma barragem de aterro zonada, verificou-se que para as mesmas velocidades de esvaziamento consideradas no talude ($R=0,1\text{m/d}$ e $R=1,0\text{m/d}$), o fator de segurança mantém-se relativamente constante ao longo do esvaziamento. Adotando velocidades de esvaziamento mais elevadas verificou-se que a barragem de aterro homogénea em fase de esvaziamento, independentemente da velocidade de esvaziamento considerada, o talude crítico é o de jusante. Contudo, se for considerada uma barragem de aterro zonada, verifica-se uma variação do fator de segurança significativa, observando-se a formação de uma superfície de rotura no talude de montante, quando o fator de segurança começa a diminuir.

Através da análise realizada neste capítulo evidencia-se o facto de, quando se considera os valores dos fatores de segurança dos ábacos referentes a taludes, mencionados no capítulo anterior, não se sabe ao certo qual o talude da barragem a que corresponde. Visto que, verificou-se que para determinadas condições de esvaziamento, o talude de jusante pode ser o mais condicionante.

Para analisar de que modo estes (velocidade de esvaziamento R e coeficiente de permeabilidade do solo k_h) e outros parâmetros são determinantes na avaliação de qual o talude condicionante na fase de esvaziamento de uma barragem de aterro zonada, procede-se à análise paramétrica no capítulo seguinte.

Capítulo 4

4 Estudo paramétrico do esvaziamento numa barragem de aterro zonada

4.1 Introdução

Tomando como referência o modelo de estudo da barragem de aterro zonada anteriormente apresentado na secção 3.5, reforçado na figura 4.1, no presente capítulo, é desenvolvido o estudo paramétrico na fase de esvaziamento da albufeira em regime transitório, referente aos parâmetros dos maciços estabilizadores, nomeadamente o coeficiente de permeabilidade, k , o ângulo de resistência ao corte do maciço, ϕ' , a velocidade de esvaziamento da albufeira, R , o nível de água na albufeira, H , e a inclinação do talude de montante.

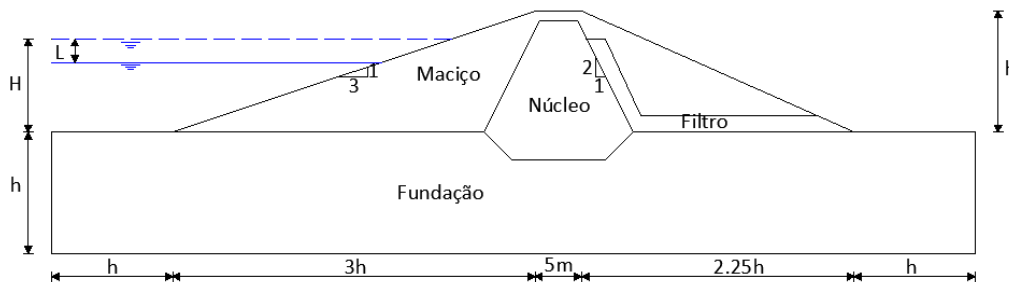


Figura 4.1: Esquema ilustrativo do modelo base.

Através deste estudo paramétrico pretende-se determinar a influência dos referidos parâmetros na estabilidade da estrutura. Como tal, serão estudados vários valores para cada um dos parâmetros em análise, considerando os seguintes valores para os parâmetros base dos maciços estabilizadores:

- nível de água na albufeira $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$;
- ângulo de resistência ao corte do maciço $\phi'=30^\circ$;
- inclinação do paramento de montante de 1:3 (V:H).
- velocidade de esvaziamento da albufeira $R=1\text{m/d}$;
- coeficiente de permeabilidade horizontal $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e vertical $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$;

O nível de água na albufeira constitui um parâmetro que condicionou o desenvolvimento de todo o trabalho, tanto pela influência no fator de segurança como nas superfícies críticas formadas. Por este motivo a análise paramétrica realizada neste capítulo foi sempre feita em paralelo, usando dois níveis de água, H , um nível relativamente pequeno ($H=10\text{m}$) e um nível mais elevado ($H=20\text{m}$).

Note-se que, o ângulo de resistência ao corte $\phi'=30^\circ$, assim como a inclinação do paramento de montante 1:3 (V:H), correspondem aos valores base adotados no capítulo anterior.

No que respeita à velocidade de esvaziamento da albufeira, foi admitida uma velocidade de $R=1\text{m/d}$, uma vez que, foi este o valor que foi mais analisado na bibliografia.

Para o coeficiente de permeabilidade do solo dos maciços estabilizadores da barragem, assumem-se os valores de $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$, dado que é a permeabilidade mais condicionante na estabilidade da estrutura na fase de esvaziamento, como se verá adiante.

Na tabela 4.1 resumem-se os parâmetros que se mantiveram e os que foram alterados, para cada análise realizada.

Tabela 4.1: Valores adotados no estudo paramétrico.

Parâmetros inalterados	Variações analisadas
$k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ $R=1\text{m/d}$ $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$ 1:3 (V:H) $c'=10\text{ kPa}$	$\phi'=25^\circ$ $\phi'=30^\circ$ $\phi'=35^\circ$
$H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$ $\phi'=30^\circ$ $R=1\text{m/d}$ 1:3 (V:H) $c'=10\text{ kPa}$	$k_h=5 \times 10^{-5}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-5}\text{m/s}$ ($k_{\text{maciço}}/k_{\text{núcleo}}=5000$) $k_h=5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ($k_{\text{maciço}}/k_{\text{núcleo}}=500$) $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ ($k_{\text{maciço}}/k_{\text{núcleo}}=50$)
$k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ $\phi'=30^\circ$ $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$ 1:3 (V:H) $c'=10\text{ kPa}$	$R=0,1\text{m/d}$ $R=1,0\text{m/d}$ $R=2,0\text{m/d}$ $R=3,0\text{m/d}$ $R=4,0\text{m/d}$
$k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ $R=1\text{m/d}$ $\phi'=30^\circ$ 1:3 (V:H) $c'=10\text{ kPa}$	$H=10\text{m}$ $H=15\text{m}$ $H=20\text{m}$ $H=25\text{m}$ $H=30\text{m}$
$k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ e $k_v=1 \times 10^{-7}\text{m/s}$ $\phi'=30^\circ$ $R=1\text{m/d}$ $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$ $c'=10\text{ kPa}$	1:2 (V:H) 1:2,5 (V:H) 1:3 (V:H)

4.2 Influência da resistência ao corte do maciço estabilizador

Para estudar a influência do ângulo de resistência ao corte dos maciços estabilizadores, considera-se para o mesmo, os valores de 25, 30 e 35°, conforme indicado na tabela 4.1. No que diz respeito à coesão efetiva do solo dos maciços estabilizadores, c' , é assumido o valor de 10kPa para todas as análises realizadas.

No gráfico da figura 4.2 são apresentados os fatores de segurança, FS , para os diferentes níveis de esvaziamento, L/H , adotando diferentes ângulos de resistência ao corte.

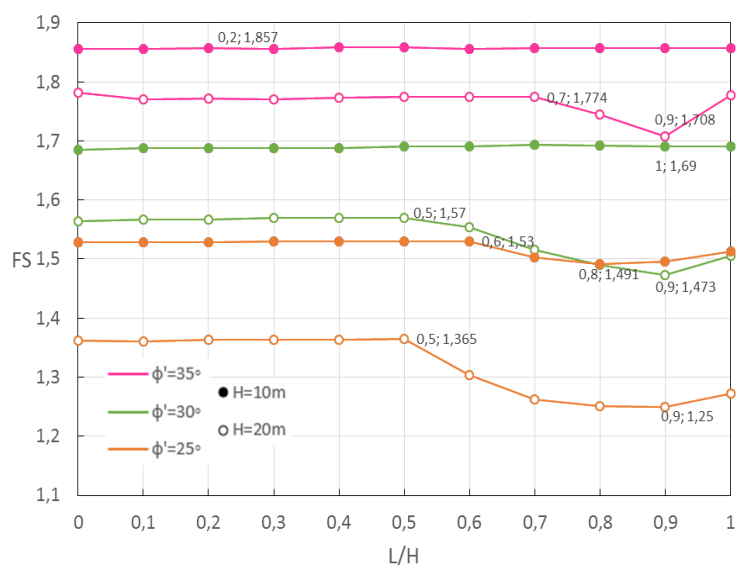


Figura 4.2: Influência do ângulo de resistência ao corte do maciço no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$.

Como seria de esperar, os resultados obtidos para o fator de segurança para $H=20\text{m}$ são sempre inferiores aos obtidos para $H=10\text{m}$, independentemente do ângulo de resistência ao corte considerado. Observa-se também que quanto maior for o ângulo de resistência ao corte do maciço, maior é o fator de segurança ao longo do esvaziamento.

Para o caso de $H=10\text{m}$, verifica-se uma variação do FS apenas para o menor valor de resistência ao corte considerado ($\phi'=25^\circ$), sendo que o FS diminui a partir do nível $L/H=0,6$, sendo mínimo para $L/H=0,8$, tornando depois a aumentar para $L/H=1,0$.

Considerando $H=20\text{m}$, verifica-se que para todos os ângulos de resistência ao corte considerados, o FS é mínimo no nível $L/H=0,9$. Observa-se ainda que quanto menor for o ângulo de resistência ao corte, o FS começa a diminuir a partir de um nível de esvaziamento L/H menor, ou seja, para $\phi'=35^\circ$ começa a diminuir a partir do nível $L/H=0,7$, para $\phi'=30^\circ$ no nível $L/H=0,6$ e para $\phi'=25^\circ$ no nível $L/H=0,5$.

Relativamente à evolução dos pontos plásticos verificados nas fases de colapso, consideram-se as figuras 4.5 e 4.6, referentes aos dois níveis de água na albufeira analisados.

Para o caso de $H=10\text{m}$, constata-se que, tanto para $\phi'=30^\circ$ como para $\phi'=35^\circ$, a superfície crítica verificada corresponde ao talude de jusante ao longo de todo o esvaziamento da albufeira. Contudo, para $\phi'=25^\circ$, observa-se a formação da superfície crítica no talude de montante a partir do nível $L/H=0,6$, sendo este o nível correspondente à diminuição do FS (ver figura 4.4). Verifica-se também que, para o fator de segurança mínimo, o talude crítico é o de montante. Contudo, quando a albufeira é esvaziada totalmente, ambos os taludes se encontram instáveis, conforme se apresenta na figura 4.5.

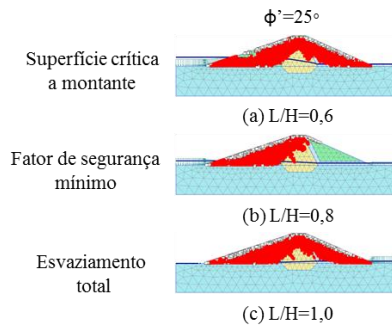


Figura 4.3: Pontos Plásticos no colapso para $H=10\text{m}$ considerando $\phi'=25^\circ$.

Para o caso de $H=20\text{m}$, observou-se que a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,5$, o talude de montante se encontra numa situação instável, dependendo do ângulo de resistência ao corte considerado. Na figura 4.6 pode ser observada a evolução dos pontos plásticos na fase de colapso, para os diferentes ângulos de resistência ao corte.

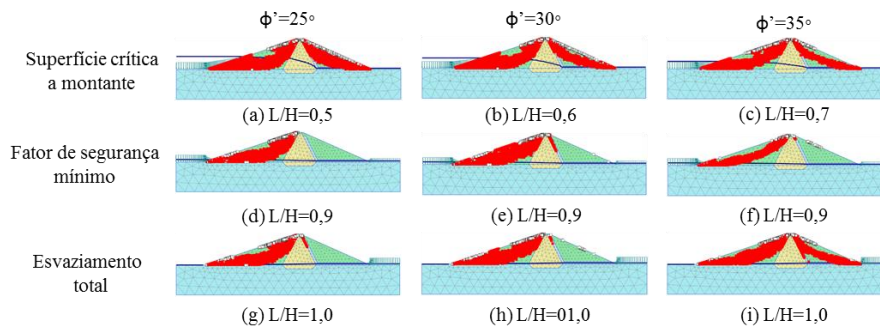


Figura 4.4: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{ m}$ e os diferentes ϕ' considerados.

Face ao exposto, verifica-se que a diminuição do ângulo de resistência ao corte do maciço estabilizador da barragem contribui para a instabilidade do talude de montante, sendo que, quanto menor for o ϕ' considerado, o talude é crítico a montante para um menor nível de esvaziamento L/H .

4.3 Influência do coeficiente de permeabilidade do maciço estabilizador

Para estudar a influência do coeficiente de permeabilidade dos maciços estabilizadores, na análise de segurança, considera-se uma relação $k_h/k_v=5$, adotando três valores do coeficiente de permeabilidade horizontal, k_h : 5×10^{-5} m/s; 5×10^{-6} m/s; e 5×10^{-7} m/s.

Na figura 4.5 é apresentada a evolução dos fatores de segurança FS , considerando os diferentes níveis de esvaziamento L/H , para os coeficientes de permeabilidade horizontal considerados, k_h , para um nível de água na albufeira de $H=10$ m e $H=20$ m. Note-se que o estudo da influência do coeficiente de permeabilidade k_h relativos a $H=10$ m, já foi apresentado no capítulo anterior (ver figura 3.12).

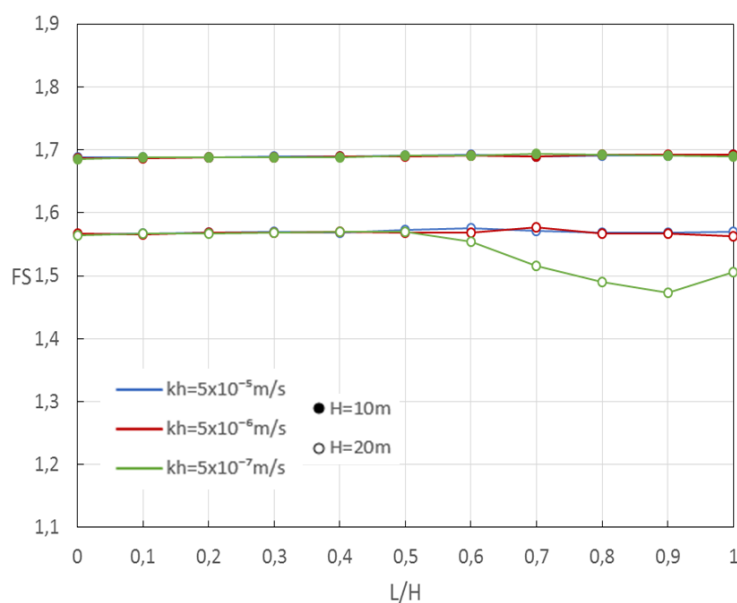


Figura 4.5: Influência do coeficiente de permeabilidade do maciço no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando uma velocidade de esvaziamento $R=1$ m/d, para $H=10$ m e $H=20$ m.

Através da análise da figura 4.5, verifica-se que o fator de segurança é maior para valores mais elevados do coeficiente de permeabilidade horizontal do solo.

Para $H=10$ m, conforme referido no capítulo anterior, o FS mantém-se aproximadamente constante ao longo do esvaziamento, para os coeficientes de permeabilidade assumidos. Porém, quando se considera $H=20$ m, verifica-se uma variação do valor do FS para uma menor permeável ($k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s), a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,5$.

Na figura 4.6 apresentam-se as diferentes posições da linha de saturação no interior da barragem quando a albufeira é esvaziada totalmente ($L/H=1,0$), para os níveis de água na albufeira analisados ($H=10$ m e $H=20$ m). Observa-se um comportamento semelhante para ambos os casos. Consta-se que, como seria de esperar, para a menor permeabilidade a linha de saturação encontra-se numa posição superior.

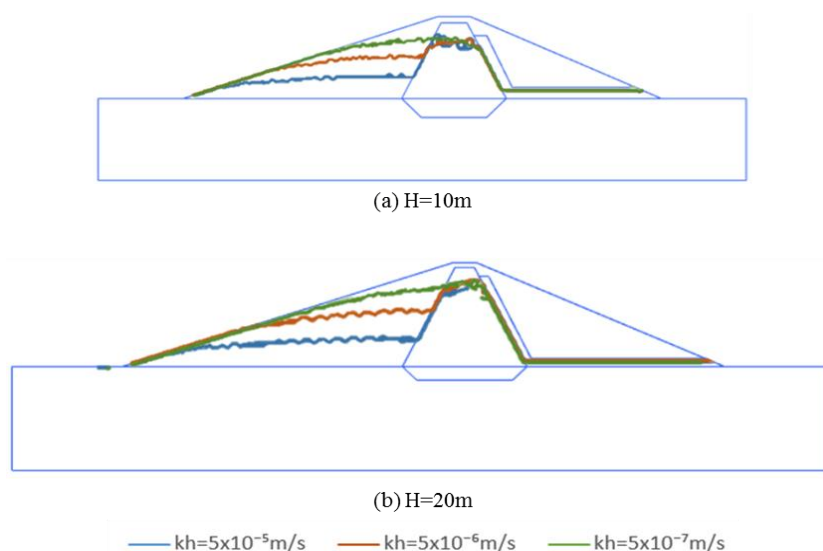


Figura 4.6: Posições da linha de saturação considerando esvaziamento total da albufera $L/H=1,0$.

Relativamente à avaliação de qual o talude crítico da barragem na fase de esvaziamento, verificou-se que para $H=10\text{m}$, o coeficiente de permeabilidade horizontal, k_h , não tem influência significativa na estabilidade do talude de montante, visto que, para os coeficientes de permeabilidade horizontais considerados, o talude crítico é o de jusante, para os diferentes níveis de esvaziamento. No entanto, para o caso $H=20\text{m}$, apresentado na figura 4.7, verificou-se uma situação crítica no talude de montante, a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,6$, quando se adotou $k_h=5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ e $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$. Note-se que para $k_h=5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ verifica-se que nos níveis $L/H=0,7, 0,8$ e $0,9$, tanto o talude de jusante como o de montante se encontram numa situação crítica, visto que se verifica a formação de uma superfície de rotura em ambos os taludes. Contudo, observa-se que a massa de solo potencialmente instabilizada a montante é menor que a jusante. Por último, constata-se que para uma menor permeabilidade $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ verifica-se que no nível $L/H=0,6$ ambos os taludes se encontram numa situação crítica, e a partir deste nível, o talude crítico é o de montante. É de salientar que somente neste caso se verificou instabilidade apenas no talude de montante.

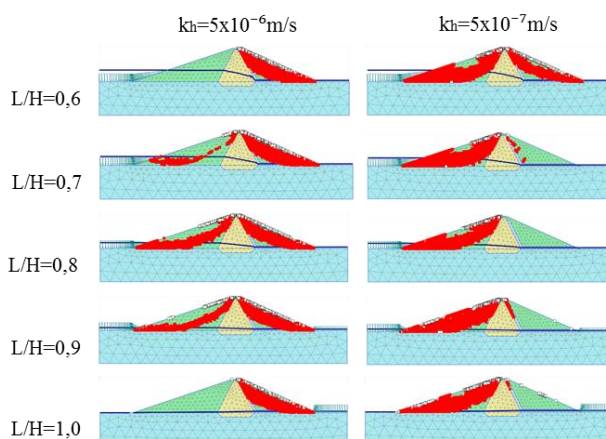


Figura 4.7: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{ m}$, considerando $k_h=5 \times 10^{-6}\text{m/s}$ e $k_h=5 \times 10^{-7}\text{m/s}$.

Face ao exposto, a diminuição do coeficiente de permeabilidade do maciço estabilizador da barragem em estudo, conduz à diminuição do fator de segurança e contribui para um aumento da instabilidade do talude de montante da estrutura, sendo observado que esta instabilidade a montante é verificada num nível de esvaziamento menor, quanto menor for o coeficiente de permeabilidade considerado.

Conforme apresentado anteriormente, a realização da análise paramétrica que se apresenta neste capítulo considera para o valor do coeficiente de permeabilidade horizontal $k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s e vertical $k_v=1 \times 10^{-7}$ m/s para os maciços estabilizadores da barragem, uma vez que traduz uma situação mais crítica de permeabilidade, verificando-se assim variações mais significativas do fator de segurança.

4.4 Influência da velocidade de esvaziamento da albufeira

Para avaliar a influência da velocidade de esvaziamento da albufeira na análise de segurança da barragem, considera-se uma variação deste parâmetro numa gama de valores entre 0,1m/d e 4m/d, conforme indicado na tabela 4.1.

A evolução dos fatores de segurança para os diferentes níveis de esvaziamento L/H é apresentada na figura 4.8, considerando as várias velocidades de esvaziamento da albufeira analisadas, para um nível de água de $H=10$ m e $H=20$ m. Evidencia-se o facto de já ter sido considerado este estudo relativo a $H=10$ m no capítulo anterior (ver figura 3.14).

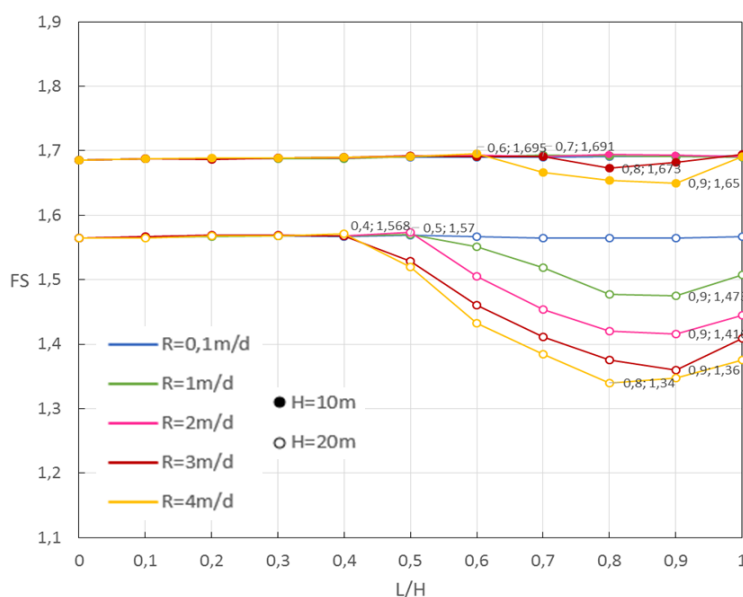


Figura 4.8: Influência da velocidade de esvaziamento no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando um nível máximo de água $H=10$ m e $H=20$ m.

Observa-se que tanto para o nível de água de $H=10$ m como no $H=20$ m, quanto maior for a velocidade de esvaziamento, R , menor é o FS associado ao esvaziamento, verificando-se um valor mínimo de FS entre o nível de esvaziamento $L/H=0,8$ e $L/H=0,9$. Para $H=10$ m, o FS apenas varia para uma velocidade de esvaziamento $R=3$ m/d e $R=4$ m/d. Já para $H=20$ m, observa-se que uma maior variação do FS , logo a partir de $R=1$ m/d.

As diferentes posições da linha de saturação no interior da barragem quando a albufeira é esvaziada totalmente ($L/H=1,0$) pode ser analisada na figura 4.9. Consideram-se as diferentes velocidades de esvaziamento analisadas, mantendo um coeficiente de permeabilidade do maciço horizontal $k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s e vertical $k_v=1 \times 10^{-7}$ m/s para os níveis de água $H=10$ m e $H=20$ m.

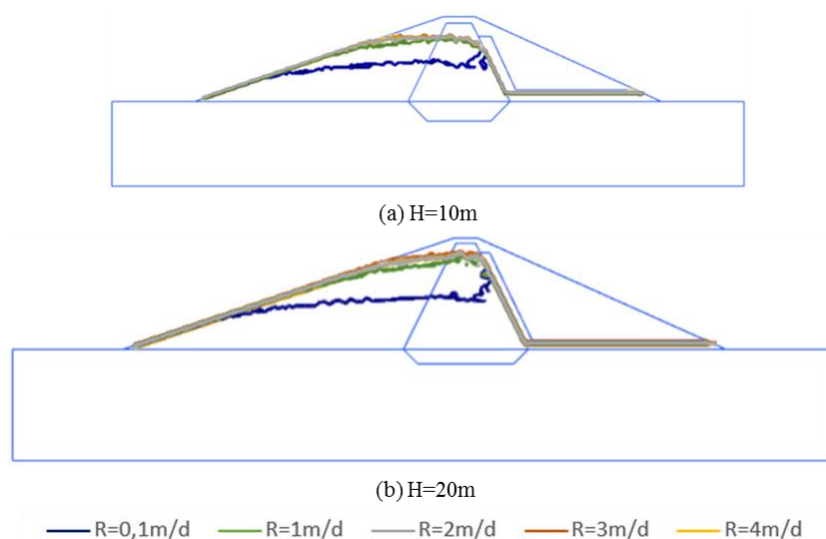


Figura 4.9: Posições da linha de saturação considerando o esvaziamento total da albufeira $L/H=0,1$ para as velocidades de esvaziamento R analisadas, considerando $k_h=5 \times 10^{-7}$ m/s e $k_v=1 \times 10^{-7}$ m/s.

Através desta figura observa-se que tanto para $H=10$ m como para $H=20$ m, as posições da linha de saturação no interior da barragem são muito semelhantes para as velocidades de esvaziamento consideradas, verificando-se que para $R=1, 2, 3$ e 4 m/d a linha de saturação encontra-se numa posição superior comparativamente a $R=0,1$ m/d, o que significa que neste caso, a linha de saturação acompanha melhor a descida do nível de água da albufeira.

Idealmente, a velocidade a que o nível de água baixa da albufeira deve ser tal que a linha de saturação no maciço acompanhe esta descida, sem nele ocorrer qualquer excesso de pressão intersticial. Uma situação em que a linha de saturação não acompanha a descida do nível de água da albufeira é tanto mais penalizadora da estabilidade, quanto mais elevada permanece a linha de saturação. Note-se que este processo depende da condutividade hidráulica do maciço.

Relativamente aos pontos plásticos nas fases de colapso, para $H=10$ m, observa-se que apenas a partir da velocidade de esvaziamento $R=2$ m/d, se forma uma superfície de rotura no talude de montante (figura 4.10). Já para $H=20$ m, o talude de montante é crítico a partir da $R=1,0$ m/d (figura 4.11).

Em suma, evidencia-se através das figuras apresentadas que, quanto maior for a velocidade de esvaziamento considerada, a situação crítica passa do talude de jusante para o de montante mais cedo durante o esvaziamento, ou seja, ocorre num nível de água da albufeira mais elevado.

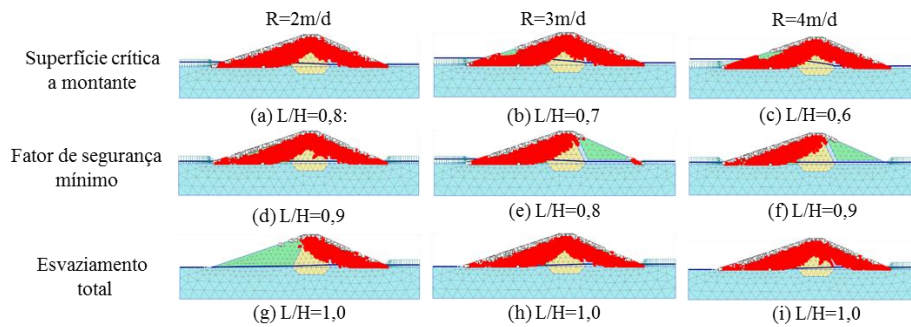


Figura 4.10: Pontos Plásticos no colapso para $H=10$ m e as diferentes R consideradas.

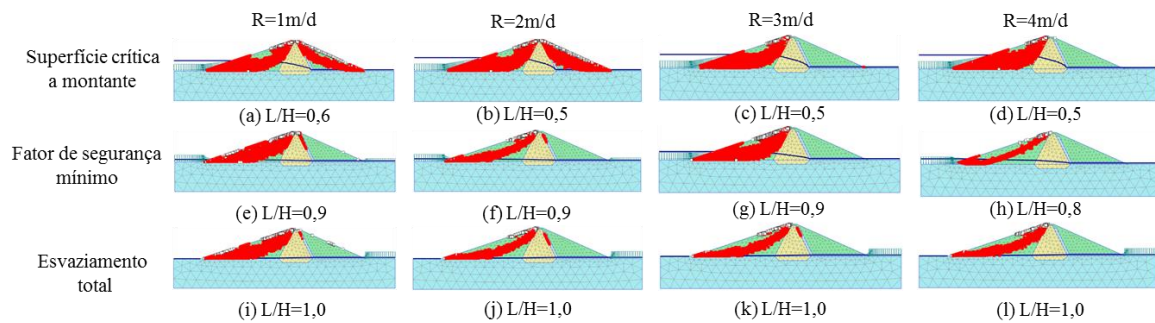


Figura 4.11: Pontos Plásticos no colapso para $H=20$ m e as diferentes R consideradas.

4.5 Influência do nível de água inicial na albufeira

Para melhor compreensão da influência do nível de água na albufeira na análise de segurança de uma barragem de aterro zonada, durante a fase de esvaziamento da albufeira, considera-se o estudo da influência deste parâmetro considerando os valores 10, 15, 20, 25 e 30m, mantendo uma folga de 3m, ou seja, a altura da barragem h é 13, 18, 23, 28 e 33m, respetivamente.

Na figura 4.12 apresenta-se a evolução dos fatores de segurança, FS , com o aumento do nível de esvaziamento, L/H , para os diferentes níveis de água na albufeira da barragem, H .

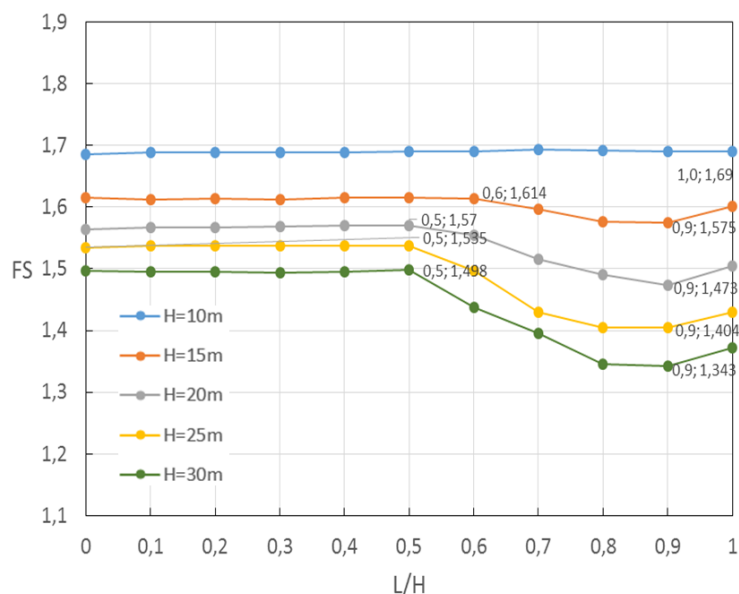


Figura 4.12: Influência da altura da barragem no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H .

Constata-se na referida figura que o fator de segurança associado ao esvaziamento da albufera é menor, quanto maior for o nível de água considerado, ou seja, quanto maior for a altura da barragem, tendo sido obtido o maior fator de segurança para $H=10m$, mantendo-se estável ao longo do esvaziamento.

Relativamente ao valor mínimo do FS , observa-se que para todos os níveis de água considerados, H , este é obtido no nível de esvaziamento $L/H=0,9$.

Verifica-se que para $H=15m$, o FS não varia até ao nível de esvaziamento $L/H=0,6$. Já para $H=20, 25$ e $30m$, o FS apenas começa a variar a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,5$.

Considerando de seguida a evolução dos pontos plásticos nas fases de colapso, constata-se que para $H=10m$, a superfície crítica verificada corresponde ao talude de jusante ao longo de todo o esvaziamento da albufera. No entanto, para os restantes níveis de água considerados, o talude de montante é crítico a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,7$ ($H=15m$) e $L/H=0,6$ ($H=20, 25$ e $30m$), conforme se apresenta na figura 4.13. Note-se mais uma vez, que é precisamente quando o FS começa a diminuir que a instabilidade se inicia no talude de montante da barragem.

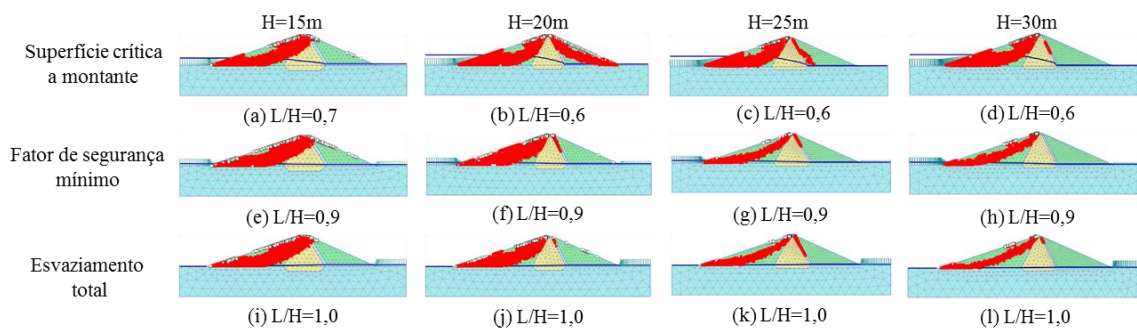


Figura 4.13: Pontos Plásticos no colapso para os diferentes H considerados.

4.6 Influência da inclinação do talude de montante

Para avaliar a influência da inclinação do talude de montante foram testados os valores 1:3, 1:2,5 e 1:2 (V:H). No que respeita à inclinação do talude de jusante, esta mantém-se para uma inclinação de 1:2,25 (V:H).

Os resultados obtidos para o fator de segurança, FS , considerando os diferentes níveis de esvaziamento, L/H , para as inclinações do talude de montante consideradas, adotando um nível de água de $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$, são apresentados na figura 4.14.

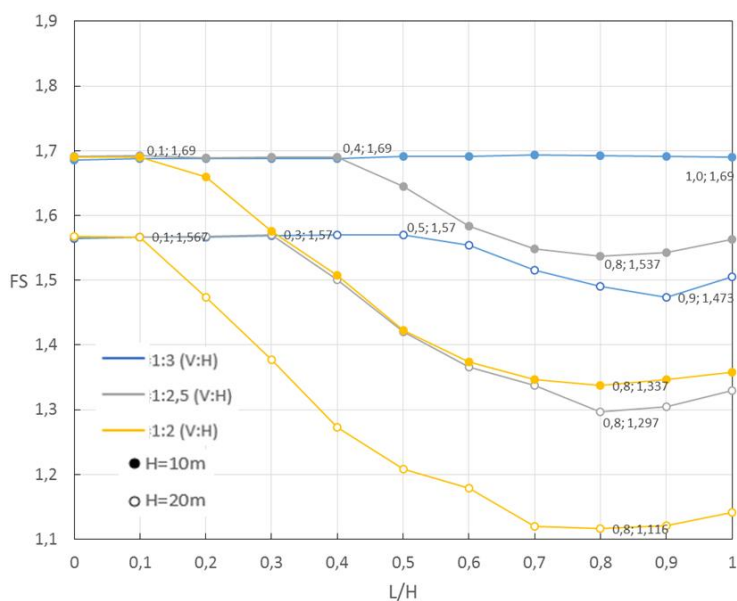


Figura 4.14: Influência da inclinação do talude de montante no fator de segurança da barragem para diferentes níveis de esvaziamento L/H , considerando $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$.

Constata-se, com base nos resultados apresentados, que quanto mais inclinado for o talude de montante, menor é o FS ao longo do esvaziamento, tendo sido obtido o maior fator de segurança para uma inclinação de 1:3 (V:H). É ainda de notar que para as inclinações do talude de montante analisadas, o FS mantém-se constante até um certo nível de esvaziamento. Sendo que quando maior for a inclinação do talude de montante, menor é o nível de esvaziamento em que se verifica este valor constante. De facto, considerando $H=10\text{m}$, observa-se que para 1:3 (V:H), o FS mantém-se estável a 1,69 ao longo do esvaziamento da albufeira. Já para 1:2,5 (V:H) e 1:2 (V:H), o FS diminui a partir do nível $L/H=0,4$ e $L/H=0,1$, respetivamente, verificando-se um valor mínimo no nível $L/H=0,8$, para ambas as inclinações. Considerando agora $H=20\text{m}$, verifica-se que para as inclinações 1:3, 1:2,5 e 1:2 (V:H), o FS diminui a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,5$, $0,3$ e $0,1$, respectivamente, sendo que até este nível, este encontrava-se estável com o valor de 1,57. Observa-se também que o valor mínimo do FS é obtido entre o nível de esvaziamento $L/H=0,8$ e $L/H=0,9$.

No que diz respeito à avaliação do talude crítico no decorrer do esvaziamento da albufeira, analisam-se os pontos plásticos apresentados nas figuras 4.15 e 4.16 referentes a $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$, respetivamente. Observe-se que para maiores inclinações do talude de montante, este encontra-se instável para menores níveis de esvaziamento.

Para o caso de $H=10\text{m}$, verifica-se que para 1:3 (V:H) o talude crítico ao longo do esvaziamento é o de jusante, contudo, para inclinações mais acentuadas, 1:2 (V:H) e 1:2,5 (V:H), o talude de montante apresenta a formação de uma possível superfície de rotura a partir do nível de esvaziamento $L/H=0,4$ e $L/H=0,2$, respetivamente.

Para o caso de $H=20\text{m}$, para as inclinações do talude de montante analisadas, observou-se que este é crítico a partir do nível $L/H=0,6$, $L/H=0,4$ e $L/H=0,2$ para as inclinações 1:3, 1:2,5 e 1:2(V:H), respetivamente.

É de salientar que foi com a variação deste parâmetro que se verificaram níveis de esvaziamento mais baixos correspondentes ao talude crítico de montante.

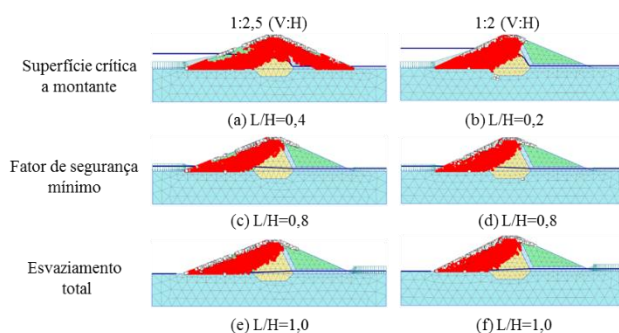


Figura 4.15: Pontos Plásticos no colapso para $H=10\text{m}$ e as diferentes inclinações consideradas.

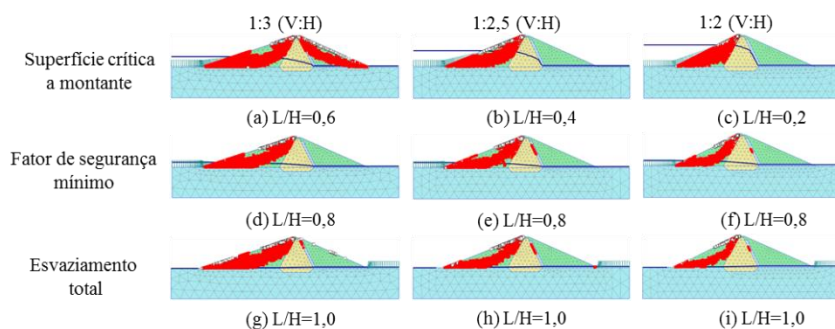


Figura 4.16: Pontos Plásticos no colapso para $H=20\text{m}$ e as diferentes inclinações consideradas.

4.7 Observações finais

Face às análises paramétricas estudadas, foram selecionados, para cada parâmetro analisado, os valores máximos e mínimos do fator de segurança, FS , de modo a obter a porcentagem de redução do mesmo. A figura 4.17 apresenta a redução do FS relativa ao nível de água na albufeira H e a figura 4.18 relativa aos restantes parâmetros analisados: ângulo de resistência ao corte, $\phi'(^{\circ})$; coeficiente de permeabilidade horizontal do maciço, k_h (m/s); velocidade de esvaziamento R (m/d); e a inclinação do talude de montante, para ambos os níveis de água na albufeira analisados ($H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$).

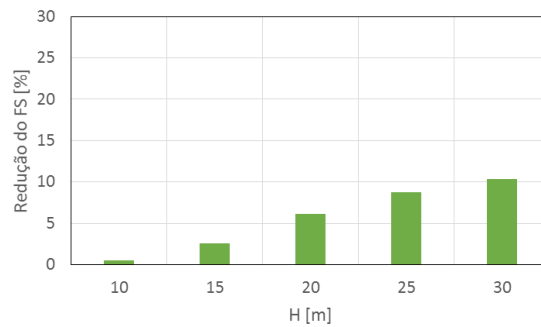


Figura 4.17: Redução do fator de segurança para os diferentes níveis de água na albufeira, H , analisados.

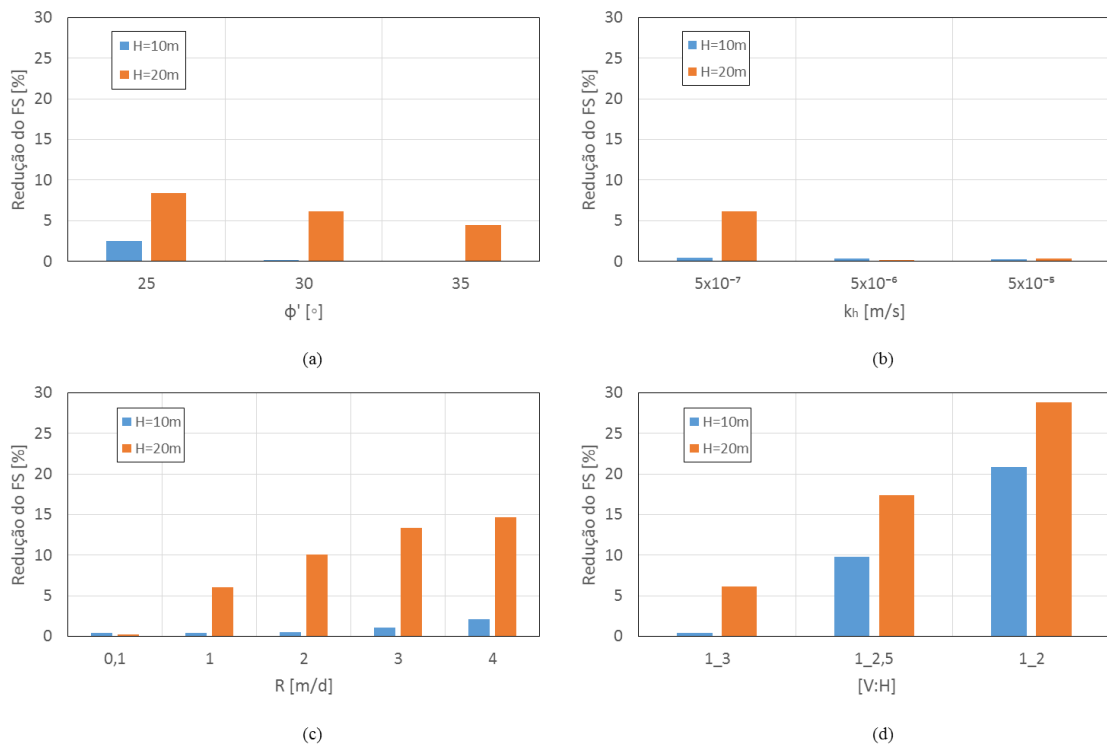


Figura 4.18: Redução do fator de segurança verificada nos parâmetros analisados para $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$: (a) ângulo resistência ao corte ϕ' ; (b) coeficiente de permeabilidade horizontal k_h ; (c) velocidade de esvaziamento R ; e (d) inclinação do paramento de montante.

Conforme expectável, observa-se que, relativamente ao nível de água na albufeira H , quanto maior for H , maior é a redução do FS .

Observando agora a figura 4.18, constata-se que, para o caso do nível de água de $H=10\text{m}$, o FS apresenta valores relativamente próximos durante o esvaziamento da albufeira, independentemente do ângulo de resistência ao corte do maciço, da velocidade de esvaziamento e do coeficiente de permeabilidade considerados. Contudo, para $H=20\text{m}$, já se verificou uma maior variação do FS para os parâmetros analisados. Na figura 4.19, resumem-se os valores mais críticos dos parâmetros analisados, demonstrando-se a redução máxima do FS . Observa-se que, para ambos os casos $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$, a inclinação do paramento de montante é o parâmetro que mais contribui para a redução da estabilidade da barragem.

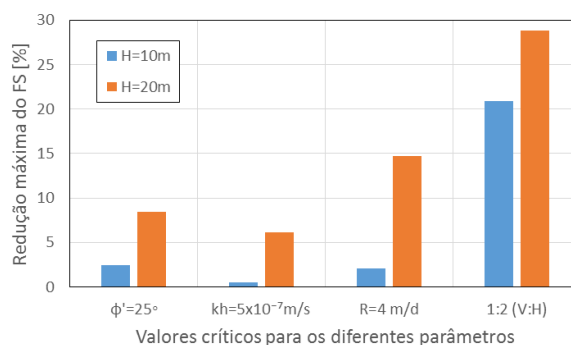


Figura 4.19: Redução máxima do fator de segurança.

Comparando os dois resultados constata-se que para a situação mais crítica do nível de água na albufeira ($H=30\text{m}$), a redução do FS é inferior comparativamente à redução do FS ao considerar-se a menor inclinação do talude de montante analisada (1:2 (V:H)). Verifica-se assim que, este é o fator que condiciona mais a estabilidade da estrutura, evidenciando assim uma forte influência deste parâmetro no colapso.

No que diz respeito à avaliação do talude crítico de montante durante o esvaziamento, foram analisados os pontos plásticos para os diferentes parâmetros estudados. Observou-se que o talude de montante passa a ser crítico a partir do nível de esvaziamento L/H onde se verifica uma diminuição do FS . Nas figuras 4.20 e 4.21 apresentam-se os níveis de esvaziamento a partir dos quais se verifica esta situação crítica a montante, para os diferentes parâmetros analisados. Observa-se que, para $H=10\text{m}$, o paramento de montante é crítico num nível de esvaziamento igual ou superior, relativamente a $H=20\text{m}$. Verifica-se ainda que, para $H=10\text{m}$, considerando ângulos de resistência $\phi'=30$ e 35° , uma permeabilidade do solo $k_h=5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, uma velocidade de esvaziamento $R=0,1 \text{ m/d}$ e uma inclinação de 1:3 (V:H), o talude de montante não é crítico em nenhum nível de esvaziamento. Considerando $H=20\text{m}$, ao contrário do caso anterior, já se observa esta situação crítica do talude de montante, à exceção da velocidade $R=0,1 \text{ m/d}$.

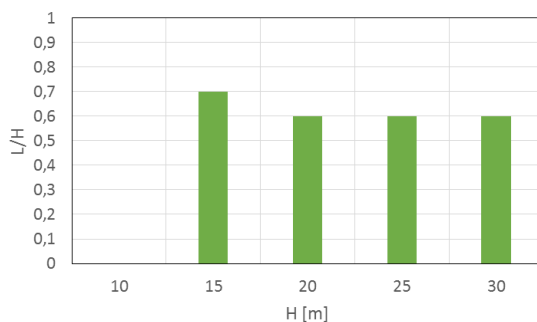


Figura 4.20: Nível de esvaziamento a partir do qual o talude de montante passa a ser crítico para os diferentes níveis de água na albufera, H , analisados.

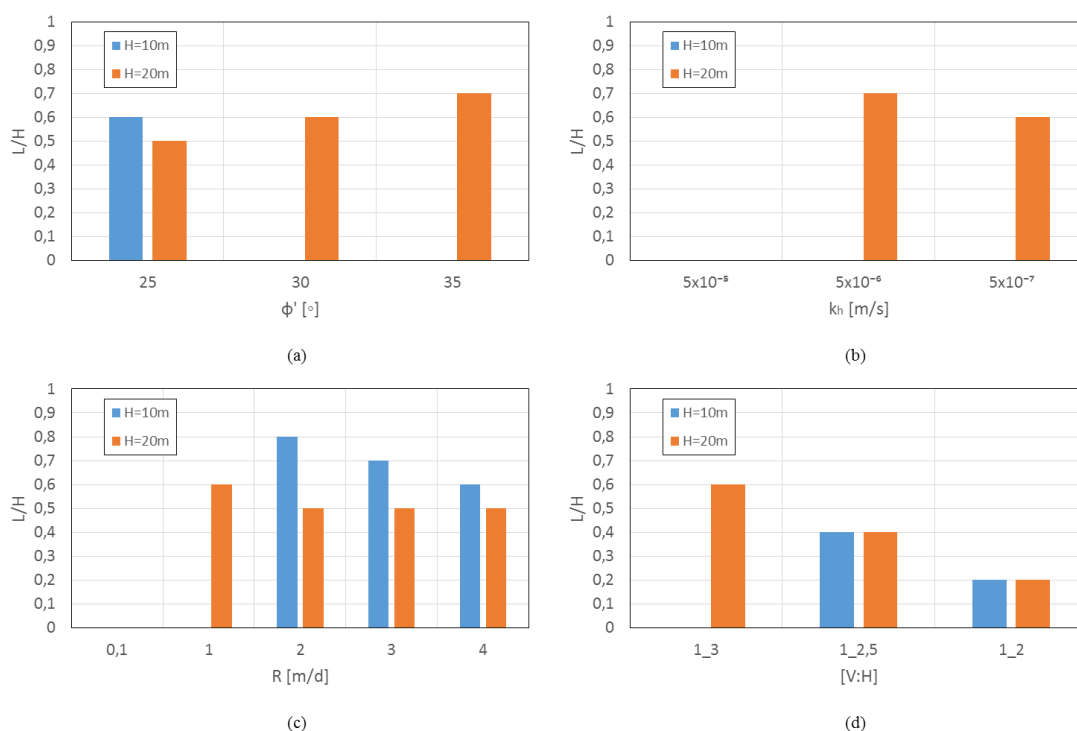


Figura 4.21: Nível de esvaziamento a partir do qual o talude de montante passa a ser crítico, considerando os parâmetros analisados para $H=10\text{m}$ e $H=20\text{m}$: (a) ângulo resistência ao corte ϕ' ; (b) coeficiente de permeabilidade horizontal k_h ; (c) velocidade de esvaziamento R ; e (d) inclinação do paramento de montante.

Na figura 4.22, apresenta-se um resumo dos níveis de esvaziamento para os quais se verifica uma instabilidade do paramento de montante, para os valores mais críticos dos parâmetros analisados. Mais uma vez, constata-se que a inclinação do talude de montante constitui um parâmetro de grande influência nos resultados do talude crítico, sendo que a partir do nível $L/H=0,2$ já se verifica a formação de uma possível superfície crítica no talude de montante. Para os restantes parâmetros, este nível varia entre 0,5 e 0,8, sendo verificados problemas a montante para níveis de esvaziamento maiores comparativamente à inclinação do talude.

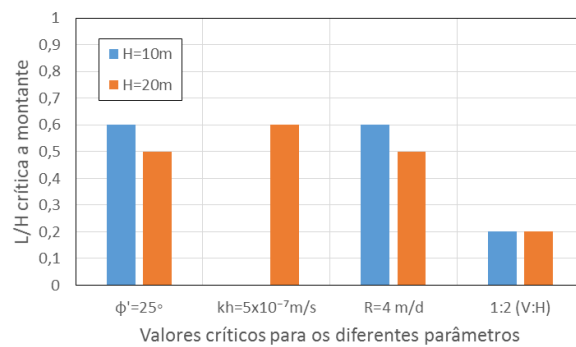


Figura 4.22: Nível de esvaziamento crítico a montante, considerando apenas os valores dos parâmetros mais críticos.

Capítulo 5

5 Proposta de ábacos de Pré-dimensionamento

5.1 Introdução

No capítulo anterior foi realizado um estudo paramétrico relativamente à análise de estabilidade de uma barragem de aterro zonada, para diferentes condições de esvaziamento, em regime transitório. Face a este estudo, foi possível obter alguma sensibilidade da influência de cada parâmetro analisado individualmente. Neste sentido, apresenta-se uma proposta de ábacos de pré-dimensionamento do paramento de montante referentes a este tipo de barragens, admitindo diferentes combinações dos parâmetros, adaptados a condições encontradas na prática.

Os ábacos propostos indicam o valor do fator de segurança para diferentes níveis de esvaziamento, permitindo abordar duas análises: (i) obter a inclinação do talude de montante, por forma a que se verifique a segurança da estrutura quando submetida a diferentes níveis de esvaziamento da albufeira; e (ii) determinar até que nível de esvaziamento é garantida a segurança, para uma dada velocidade de esvaziamento.

Tendo em consideração os estudos referidos à situação crítica do paramento de montante, encontra-se assinalado nos ábacos, o nível de esvaziamento a partir do qual o fator de segurança corresponde ao paramento referido. Refere-se ainda que, do ponto de vista de dimensionamento, de acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens *RSB* (2007), na situação de esvaziamento, considera-se um fator de segurança *FS* superior a 1,3. Deste modo, os ábacos apresentados realçam ainda este limite.

Começa-se por descrever e justificar os valores dos parâmetros adotados na elaboração dos ábacos. Seguidamente, é indicada a forma como estes se encontram organizados. Posteriormente à apresentação dos ábacos propostos, demonstra-se a aplicabilidade dos mesmos, analisando-se um exemplo de cálculo de uma dada barragem de aterro zonada. A partir do mesmo, comparam-se as inclinações obtidas para o paramento de montante, considerando os ábacos expostos no presente trabalho e os ábacos referentes a taludes para um regime estacionário, mencionados na revisão bibliográfica, permitindo a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 5.1: Valores adotados nos ábacos.

Parâmetro	Valores adotados
Inclinação do talude de montante (V:H)	1:3 ($\beta=18,43^\circ$)
	1:2,5 ($\beta=21,80^\circ$)
	1:2 ($\beta=26,57^\circ$)
Nível de água na albufeira H (m)	10
	15
	20
	25
Velocidade de esvaziamento R (m/d)	0,1
	0,5
	1,0
Ângulo de resistência ao corte do maciço estabilizador ϕ' ($^\circ$)	30
	35
Coeficiente de permeabilidade horizontal do maciço estabilizador k_h (m/s)	5×10^{-5}
	5×10^{-6}
	5×10^{-7}

No que diz respeito à coesão efetiva do solo dos maciços estabilizadores, manteve-se este parâmetro com o valor de 10kPa.

Finalizada a descrição dos pressupostos fundamentais na preparação dos ábacos, apresenta-se assim, nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 os ábacos referentes ao objetivo deste capítulo. Estes encontram-se organizados em três conjuntos, relativos às três inclinações do paramento de montante estudadas no capítulo anterior (1:3, 1:2,5 e 1:2 (V:H)). Cada conjunto é constituído por quatro gráficos que correspondem a quatro níveis de água na albufeira ($H=10, 15, 20$ e 25m). Dentro de cada gráfico são adotadas combinações de R e k_h , de modo a simular diferentes situações de esvaziamento, em regime transitório. Os dois conjuntos de curvas visíveis nos gráficos (a cheio e a traço interrompido) representam os dois ângulos de resistência ao corte do maciço considerados ($\phi'=30$ e 35°).

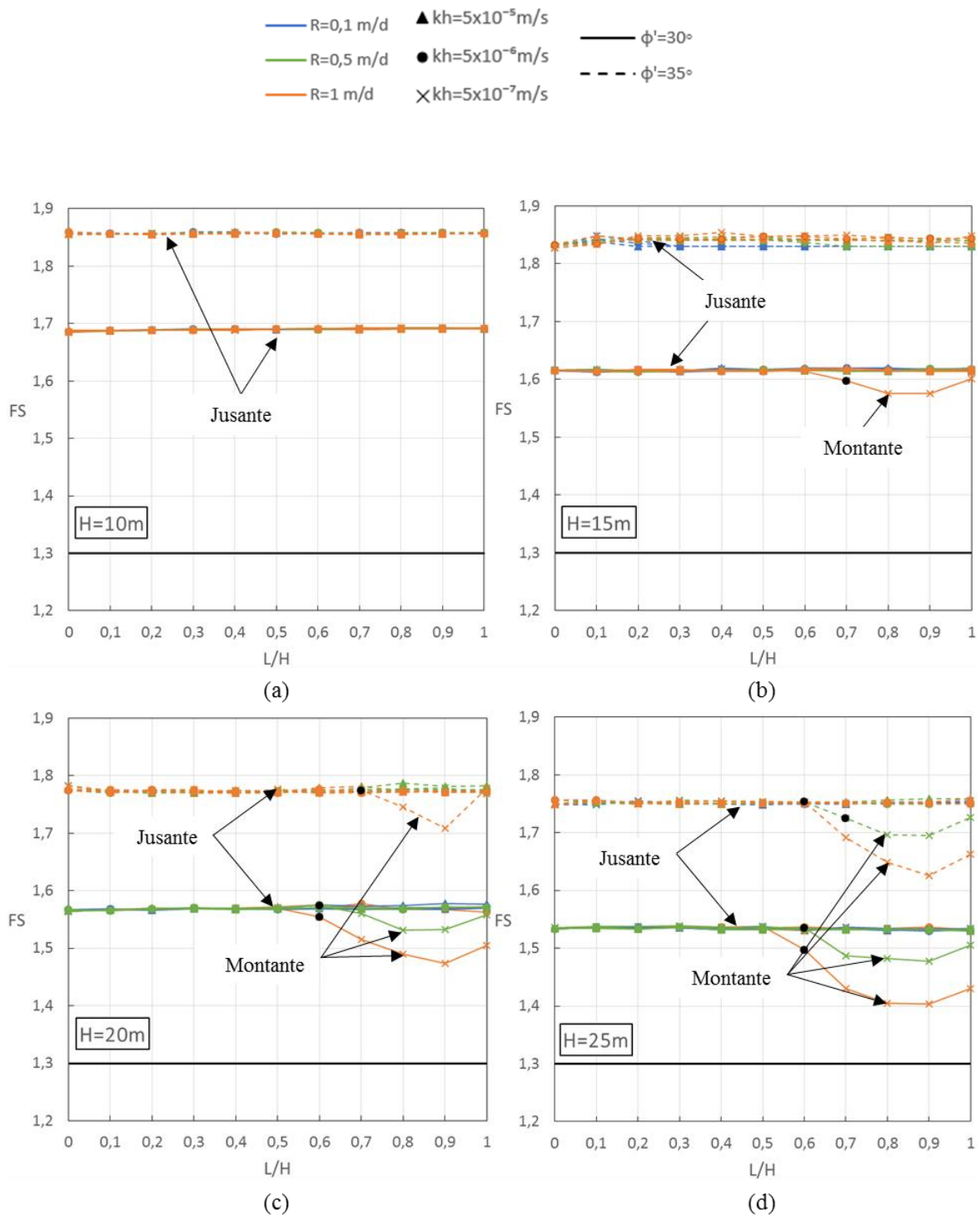


Figura 5.2: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:3 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10$ m; (b) $H=15$ m; (c) $H=20$ m; (d) $H=25$ m.

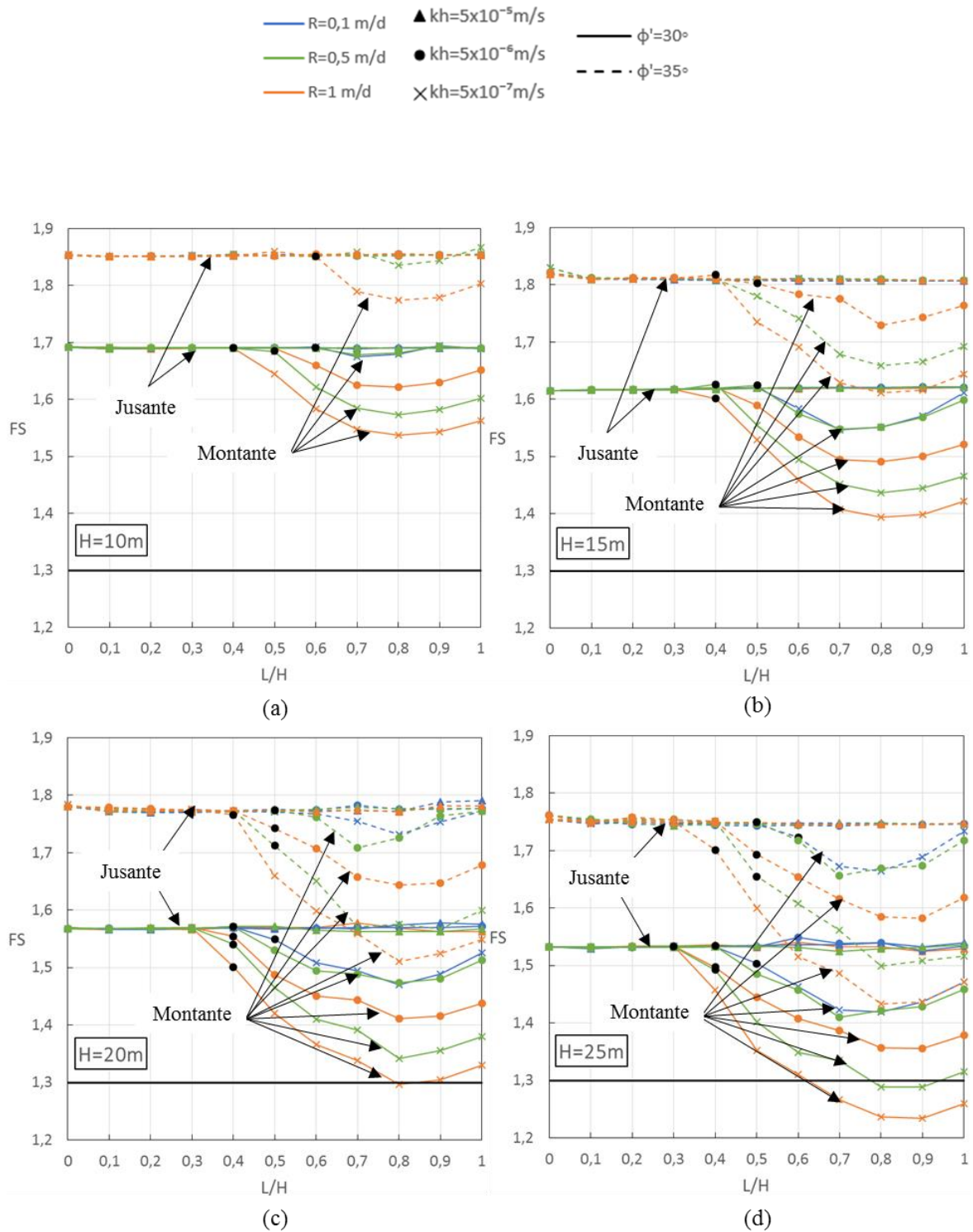


Figura 5.3: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:2,5 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10\text{m}$; (b) $H=15\text{m}$; (c) $H=20\text{m}$; (d) $H=25\text{m}$.

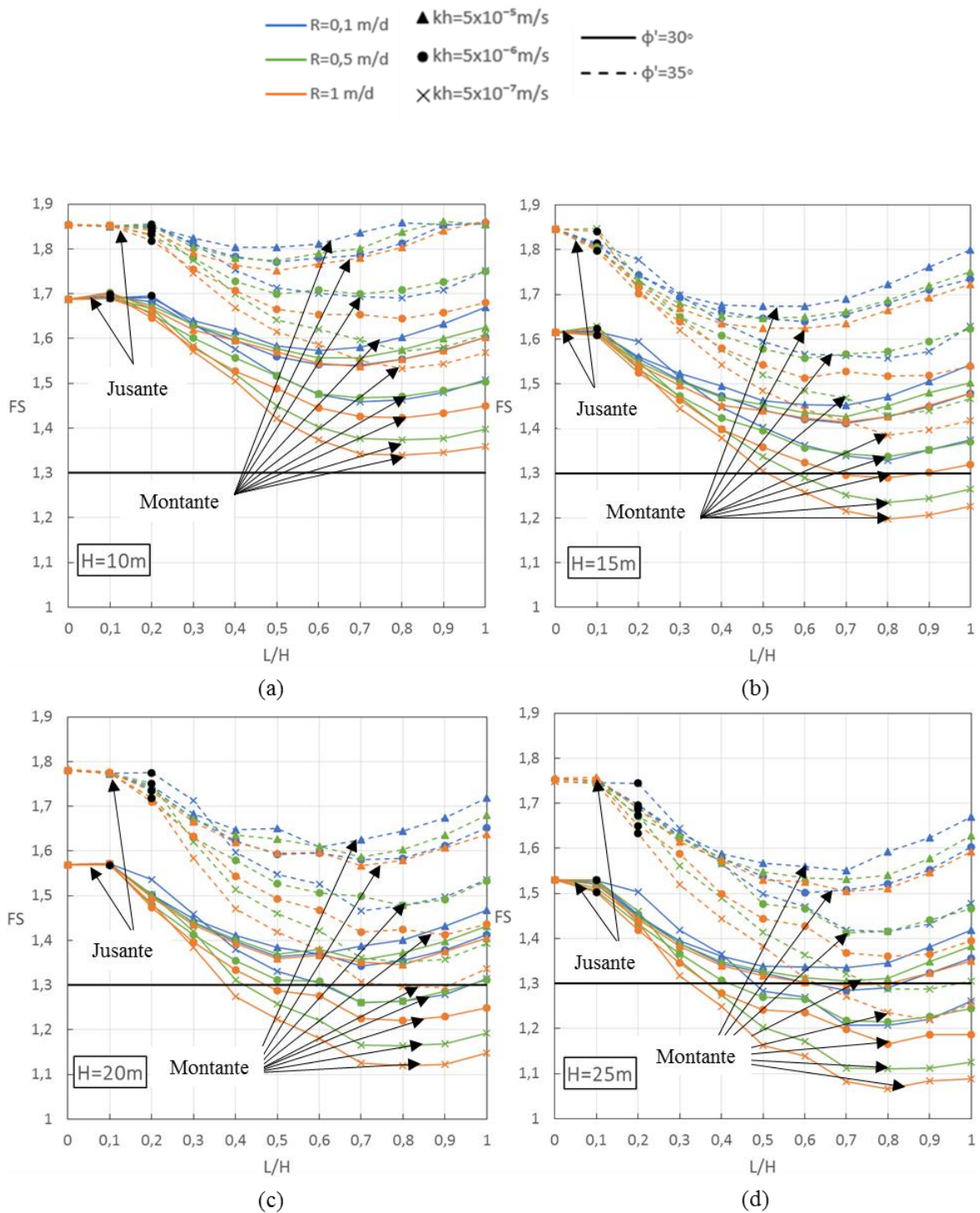


Figura 5.4: Ábacos de pré-dimensionamento de uma barragem de aterro zonada de inclinação 1:2 (V:H) na fase de esvaziamento: (a) $H=10\text{m}$; (b) $H=15\text{m}$; (c) $H=20\text{m}$; (d) $H=25\text{m}$.

Note-se que, considerando $k_h=5 \times 10^{-5}$ m/s e $k_h=5 \times 10^{-6}$ m/s, para as inclinações 1:2,5(V:H) e 1:2(V:H), verificam-se variações no FS ao longo esvaziamento, quer para $H=10$ m, como para $H=20$ m. No entanto, no capítulo anterior, quando se considerou estes mesmos coeficientes de permeabilidade do maciço e níveis de água na albufeira para uma inclinação de 1:3(V:H), não se verificou esta diminuição do FS (ver figura 4.7). Desta forma, demonstra-se, uma vez mais, a influência da inclinação do paramento de montante na estabilidade da barragem, na fase de esvaziamento.

5.3 Exemplo de cálculo

Pretende-se demonstrar com este exemplo de cálculo, a aplicação dos ábacos propostos neste trabalho, utilizando por um lado, os ábacos disponíveis na bibliografia e, por outro, os ábacos deste trabalho. Considera-se uma barragem de aterro zonada constituída por um solo dos maciços estabilizadores arenoso com $\phi' = 30^\circ$ e $k_h = 5 \times 10^{-6}$ m/s, de forma a determinar:

- (i) a inclinação do talude de montante para $H=10$ m e $H=20$ m, de modo a verificar a segurança da estrutura;
- (ii) até que nível de esvaziamento a segurança é garantida, para uma $R=1$ m/d, admitindo uma possível geometria.

Numa fase inicial, consideram-se os ábacos disponíveis na bibliografia relativos a taludes, alguns dos quais já analisados no capítulo 2 deste trabalho, sendo os restantes ábacos apresentados em anexo. Procurando dimensionar o paramento de montante para a situação mais crítica de esvaziamento, consideram-se os ábacos apresentados pelos autores referentes ao caso de esvaziamento rápido (Morgenstern (1963), Lane e Griffiths (2000), Michalowski (2002), Michalowski e Viratjandr (2006), Sun e Zhao (2013) e Gao *et al.* (2014)). Note-se que estes autores consideram o regime estacionário, não tendo em consideração a velocidade de esvaziamento R , nem coeficiente de permeabilidade do solo k_h . Estes ábacos são todos apresentados em função do número de estabilidade $c'/\gamma H$. Deste modo, assume-se uma coesão de $c'=10$ kPa e um peso volúmico de $\gamma=21$ kN/m³.

Os autores Michalowski (2002), Sun e Zhao (2013) e Gao *et al.* (2014) consideram o coeficiente adimensional r_u . Visto que este coeficiente traduz apenas o rebaixamento do nível de água no interior do talude L_t , sendo que a albufeira se encontra vazia ($L/H=1$), considera-se apenas o r_u correspondente à situação mais crítica de esvaziamento. Deste modo, para Michalowski (2002) e Sun e Zhao (2013) considera-se $r_u=0,5$ e para Gao *et al.* (2014) considera-se $r_u=0,3$. Atendendo à equação (2.5), estes coeficientes correspondem ao nível de esvaziamento $L_t/H=0$ e $L_t/H=0,4$, respetivamente.

As inclinações obtidas (V:H) são apresentadas na tabela 5.2, onde constam também os parâmetros necessários para a aplicação dos ábacos apresentados pelos autores analisados, admitindo os níveis de esvaziamento apresentados no enunciado deste exemplo ($H=10$ m e $H=20$ m).

Tabela 5.2: Inclinações obtidas a partir dos ábacos mencionados na bibliografia.

Autor	$H=10\text{m}$		$H=20\text{m}$	
	Parâmetros	Inclinação obtida	Parâmetros	Inclinação obtida
Morgenstern (1963)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,05$	1:3 (figura A.3)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,025$	1:4 (figura A.2)
Lane e Griffiths (2000)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,05$	1:2 (figura B.1)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,025$	1:2 (figura B.1)
Michalowski (2002)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,1$; $\frac{FS}{\tan \phi'}=2,25$	1:4 (figura 2.8)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,04$; $\frac{FS}{\tan \phi'}=2,25$	1:4 (figura 2.8)
Michalowski e Viratjandr (2006)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,1$; $\frac{FS}{\tan \phi'}=2,25$	1:3 (figura D.1)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,04$; $\frac{FS}{\tan \phi'}=2,25$	1:3 até $L/H=0,6$ (figura D.1)
Sun e Zhao (2013)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,05$; P.I.=0,35 FS=1,65	1:4 (figura E.1)	$\frac{c'}{\gamma H}=0,025$; P.I.=0,4 FS=1,44	1:4 (figura E.1)
Gao <i>et al.</i> (2014)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,1$; $\frac{\tan \phi'}{FS}=0,444$	1:2 (figura 2.13)	$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'}=0,04$; $\frac{\tan \phi'}{FS}=0,444$	1:3 (figura 2.13)

De seguida, procede-se à aplicação dos ábacos apresentados neste capítulo. Para um nível de água na albufeira $H=10\text{m}$, verifica-se pela figura 5.1(a), que pode ser adotada uma inclinação do talude de montante de 1:3 (V:H), visto que, independentemente da velocidade de esvaziamento considerada, o fator de segurança é superior a 1,3. Esta situação verifica-se também para as inclinações 1:2,5 (V:H) (ver figura 5.2(a)) e 1:2 (V:H) (ver figura 5.3(a)).

Considerando $H=20\text{m}$, verifica-se a mesma situação para uma inclinação 1:3 (V:H) (ver figura 5.1(c)) e 1:2,5 (V:H) (ver figura 5.2(c)). Contudo para uma inclinação a montante de 1:2 (V:H) (ver figura 5.3(c)), a situação difere, sendo que apenas se pode considerar uma velocidade de esvaziamento inferior a $R=0,5\text{m/d}$, visto que, para velocidades de esvaziamento superiores, o fator de segurança é menor que 1,3, não garantindo o valor mínimo de segurança exigido pelo regulamento.

Tendo em consideração os pressupostos apresentados anteriormente, para a escolha da inclinação do talude de montante, de modo a não colocar em risco a barragem na fase de esvaziamento, considera-se ainda o fator económico. Este está associado ao acréscimo de aterro a construir, que leva a um aumento do custo da barragem. Assim, define-se uma barragem com $H=10\text{m}$ e uma inclinação do paramento de montante de 1:2 (V:H) e para $H=20\text{m}$, uma inclinação de 1:2,5 (V:H).

Comparando as soluções obtidas no presente trabalho com as soluções resultantes dos ábacos dos autores apresentados anteriormente, verifica-se que para $H=10\text{m}$, os autores Morgenstern (1963), Michalowski (2002) e Michalowski e Viratjandr (2006) apresentam uma solução mais conservativa e conseqüentemente mais dispendiosa (1:3 e 1:4 (V:H)) do que a inclinação obtida nos ábacos propostos (1:2 (V:H)). Contudo, a segurança da estrutura na fase de esvaziamento encontra-se assegurada, visto que, dos autores estudados, nenhum apresenta uma inclinação inferior à obtida no presente trabalho. No entanto, esta situação é verificada para $H=20\text{m}$, dado que Lane e Griffiths (2000) apresenta uma inclinação inferior (1:2 (V:H)) relativamente à inclinação apresentada neste trabalho (1:2,5 (V:H)).

Na tabela 5.3 apresentam-se o acréscimo de volume de aterro, na secção estudada, relativo às soluções obtidas pelos autores comparativamente às soluções do presente trabalho. Verifica-se assim, que para $H=20\text{m}$, a variação da inclinação pode ter maiores repercussões económicas.

Tabela 5.3: Aumento do volume de aterro comparativamente à solução obtidas no presente trabalho.

H (m)	Aumento de aterro (m^3)	
	1:3 (V:H)	1:4 (V:H)
10	100	400
20	100	900

Considere-se agora, a determinação do nível de esvaziamento de modo a garantir a segurança da estrutura, para uma velocidade de esvaziamento $R=1\text{m/d}$, a partir das definições das estruturas consideradas anteriormente.

Para $H=10\text{m}$ e uma inclinação 1:2 (V:H) analisa-se o ábaco apresentado na figura 5.3(a). Observa-se assim que, para $R=1\text{m/d}$, a barragem encontra-se segura até ao esvaziamento total da albufeira.

Para $H=20\text{m}$ e uma inclinação 1:2 (V:H), com o apoio do ábaco apresentado na figura 5.3(c), para $R=1\text{m/d}$, verifica-se que a segurança da barragem apenas é garantida até ao nível de esvaziamento $L/H=0,6$, sendo que a partir deste nível, o fator de segurança é menor que 1,3, colocando a estrutura em risco.

Em suma, evidencia-se através deste exemplo de cálculo, a utilidade dos ábacos, permitindo determinar de forma expedita a inclinação do paramento de montante e ainda até que nível de esvaziamento, a segurança da barragem é garantida, para uma dada velocidade de esvaziamento da albufeira.

Capítulo 6

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões

Nesta dissertação começou-se por descrever o fenómeno de esvaziamento e como este afeta a estabilidade de um talude de montante de uma barragem de aterro. O problema de esvaziamento de um talude pode resumir-se aos estudos de diferentes casos de esvaziamento, consoante o regime de escoamento considerado. Para o regime estacionário, consideram-se os casos de esvaziamento lento, intermédio e rápido, diferenciando-se na posição do nível de água na albufeira e no interior do talude. Relativamente ao regime transitório, este corresponde ao caso de esvaziamento intermédio, sendo que o nível de água no talude depende da relação entre a permeabilidade do solo e a velocidade de esvaziamento do nível de água da albufeira.

De entre os estudos identificados na bibliografia, foram encontrados ábacos de estabilidade relativos a taludes homogéneos, apenas para o regime estacionário. Uma vez que, para o regime transitório, somente foram encontrados estudos para casos específicos de taludes e de barragens de aterro. Analisou-se assim, os diferentes casos de esvaziamento em regime estacionário e transitório, num talude homogéneo, de modo a relacionar os diferentes autores citados na revisão bibliográfica e compará-los com os resultados obtidos através da modelação do problema. Para o regime estacionário recorreu-se aos programas de cálculo automático de elementos finitos Plaxis (2015) e de equilíbrio limite Slope (2014). Já para o regime transitório, considerou-se apenas o Plaxis (2015). Os resultados obtidos para os diferentes casos analisados, encontram-se relativamente próximos.

Através da modelação em regime transitório no Plaxis (2015), procurou-se avaliar se os estudos relativos a taludes são aplicáveis a barragens de aterro zonadas. Para tal, foram adotados quatro modelos de estudo, desde um talude homogéneo até uma barragem de aterro zonada, permitindo evidenciar o papel desempenhado na avaliação da segurança pelos dois paramentos da barragem. Através deste estudo, concluiu-se que, apesar de o talude crítico para a situação de esvaziamento ser o de montante, para determinadas condições de esvaziamento, analisando-se

diferentes velocidades de esvaziamento da albufeira e coeficientes de permeabilidade do solo, verifica-se a formação da superfície de rotura no talude de jusante da barragem. Evidencia-se assim, a necessidade de identificar qual o talude correspondente à situação crítica na fase de esvaziamento, de modo a determinar o fator de segurança associado ao respetivo talude.

Seguidamente, com base no modelo de estudo referente à barragem de aterro zonada, procedeu-se a uma análise paramétrica. Para tal, foram realizadas alterações no ângulo de resistência ao corte e do coeficiente de permeabilidade do solo dos maciços estabilizadores, da velocidade de esvaziamento da albufeira, do nível de água na albufeira e da inclinação do paramento de montante. Permitindo assim avaliar a influência de cada parâmetro na estabilidade da estrutura, considerando diferentes níveis de esvaziamento, assim como, qual o talude determinante na estabilidade da mesma. Tendo-se concluído, que a diminuição do fator de segurança coincide com o início de instabilidade no paramento de montante, sendo que, o parâmetro que revelou ter uma maior influência na segurança da barragem foi a inclinação do paramento de montante.

Face ao exposto, apresentou-se uma proposta de ábacos de pré-dimensionamento aplicáveis a barragens de aterro zonadas, para diferentes condições de esvaziamento em regime transitório. Os ábacos apresentados permitem obter a inclinação do paramento de montante, de modo a garantir a segurança da estrutura quando submetida a diferentes níveis de rebaixamento da albufeira e permitem ainda determinar até que nível é assegurada a segurança da estrutura, assumindo uma dada velocidade de esvaziamento. É ainda de salientar, o facto de ser indicado o nível de esvaziamento a partir do qual o fator de segurança refere-se ao paramento de montante da barragem. Por fim, procurou-se validar as soluções obtidas face às existentes na revisão bibliográfica, de forma a demonstrar a utilidade dos ábacos referentes ao objetivo deste trabalho. Foi possível constatar que a maioria dos ábacos estudados, que não consideram o coeficiente de permeabilidade do maciço e a velocidade de esvaziamento da albufeira, verificam soluções mais conservativas da inclinação do talude, traduzindo-se num maior volume de aterro e conseqüentemente, num aumento do custo da obra.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

O trabalho realizado constitui apenas um passo no sentido do desenvolvimento de ábacos de pré-dimensionamento de taludes de montante de uma barragem de aterro zonada, para diferentes condições de esvaziamento, em regime transitório. Em suma, os principais desenvolvimentos futuros são apresentados de seguida.

Os ábacos propostos consideram um solo do maciço estabilizador de montante anisotrópico em relação à permeabilidade, analisando a relação $k_h/k_v=5$ e três combinações de valores do coeficiente de permeabilidade horizontal, k_h , e vertical, k_v . Procurando ultrapassar as limitações existentes nos mesmos, uma proposta seria considerar uma maior diversidade de permeabilidades, de modo a abranger mais casos.

A coesão do maciço estabilizador c' é uma propriedade do solo que pode ser mais explorada. Na fase de pleno armazenado de uma barragem, o solo encontra-se saturado apresentando $c'=0$, contudo, durante a fase de esvaziamento, uma vez que o solo se encontra parcialmente saturado, este apresenta uma dada coesão aparente. Nos cálculos efetuados neste trabalho, admitiu-se sempre uma coesão $c'=10$ kPa. Propõe-se assim avaliar outros valores da coesão do solo, e verificar qual a influência desta propriedade na estabilidade da estrutura.

O esvaziamento da albufera afeta o gradiente hidráulico, sujeitando as partículas do solo às forças de percolação. Desta forma, seria interessante considerar o fenómeno de erosão interna na fase de esvaziamento de uma barragem.

Sugere-se também a análise da consolidação, de modo a avaliar a dissipação da pressão intersticial em excesso durante o esvaziamento da albufera de uma barragem, permitindo determinar a variação do fator de segurança em função do fator tempo T_v .

Uma outra proposta seria analisar a influência da fase de enchimento na estabilidade da barragem, considerando diferentes níveis de enchimento.

Bibliografia

- Almeida, P. F. (2013). *Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Alonso, E. e Pinyol, N. (2008). Slope stability under rapid drawdown conditions. *Universitat Politècnica de Catalunya*, Barcelona.
- Berilgen, M. M. (2007). Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, vol.34, pp. 81-91.
- Gao, T.; Zhao, L. e Feng Yang, L. (2015). Stability charts of slopes under typical conditions developed by upper bound limit analysis. *Computers and Geotechnics*, vol.65, pp.233-240.
- Geostudio (2014). *Stability Modeling with SLOPE/W*.
- Huang M. e Jia C. (2009). Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage. *Computers and Geotechnics*, vol.36, pp.93-101.
- Lane, P.A. e Griffiths, D.V. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, vol.49, no.3, pp.387-403.
- Lane, P.A. e Griffiths, D.V. (2000). Assessment of stability slopes under drawdown conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.126, no.5, pp.443-450.
- Lopes, S. e Santana, T. (2016). Barragens de aterro-Análise de estabilidade para diferentes condições de esvaziamento em regime transitório. *15º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto.
- López-Acosta, N. P., Fuente de la H.A. e Auvinet, G. (2013). Safety of a protection levee under rapid drawdown conditions. Coupled analysis of transient seepage and stability. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.3305-3308.
- López-Acosta, N. P.; Sánchez, M.A.; Auvinet, G. e Pereira, J.M. (2015). Assessment of exit hydraulic gradients at the toe of levees in water drawdown conditions. *Scour and Erosion- Cheng, Draper & An (Eds)*, pp.171-181.
- Michalowski, R.L. (2002). Stability Charts for Uniform Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.128, no.4, pp.351-355.

- Michalowski, R.L. e Viratjandr, C. (2006). Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. *Canada. Journal of Geotechnical Engineering*, vol.43, pp.802-814.
- Morgenstern, N. (1963). Stability Charts for Earth Slopes During Rapid Drawdown. *Geotechnique*, vol.13, no.2, pp.121-131.
- Neves, E.M.; Caldeira, L. e Pinheiro, A.N. (2015). *Projeto, Construção e Observação de Pequenas Barragens de Aterro*. IST-Instituto Superior Técnico.
- Nian, T., Jiang, J., Wan, S. e Luan, M. (2011). Strength reduction FE analysis of stability of bank slopes subjected to transient unsaturated seepage. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol.16, pp.165-177.
- Pham, H.T.; Oo, H.Z. e Jing, C. (2013). Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Dam Using Numerical Finite Element Model. *Study of Civil Engineering and Architecture*, vol.2, pp.104-108.
- Pinyol, N. M., Alonso, E. E. e Olivella, S. (2008). Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resources Research*, vol.44, pp.1-22.
- Plaxis (2015). *Plaxis 2D Manual*.
- Rong, Q.; HaiZe, P.; LingFeng, H. e MengJie, C. (2014). Considering the Effect of Reservoir Water Level Lifting on Slope Stability. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol.19, pp.3291-3300.
- RSB (2007). *Regulamento de Segurança de Barragens e correspondentes portarias: I- Normas de projecto de barragens*. Decreto-Lei 344/2007 de 15 de Outubro, Diário da República, Lisboa.
- Sun, J. e Zhao, Z. (2013). Stability Charts for Homogenous Soil Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.139, no.12, pp.2212-2218.
- VandenBerge, D.R.; Duncan J.M. e Brandon, T.L. (2013). Rapid Drawdown Analysis using Strength Reduction. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 829-832.
- Xinting, L. e Zhenhua, Z. (2010). Stability of Bank Slope Under Reservoir Water Drawdown. *Engineering Faculty, China Univ. of Geosciences*, pp.533-537

Anexo A

A-Ábacos de estabilidade de Morgenstern (1963)

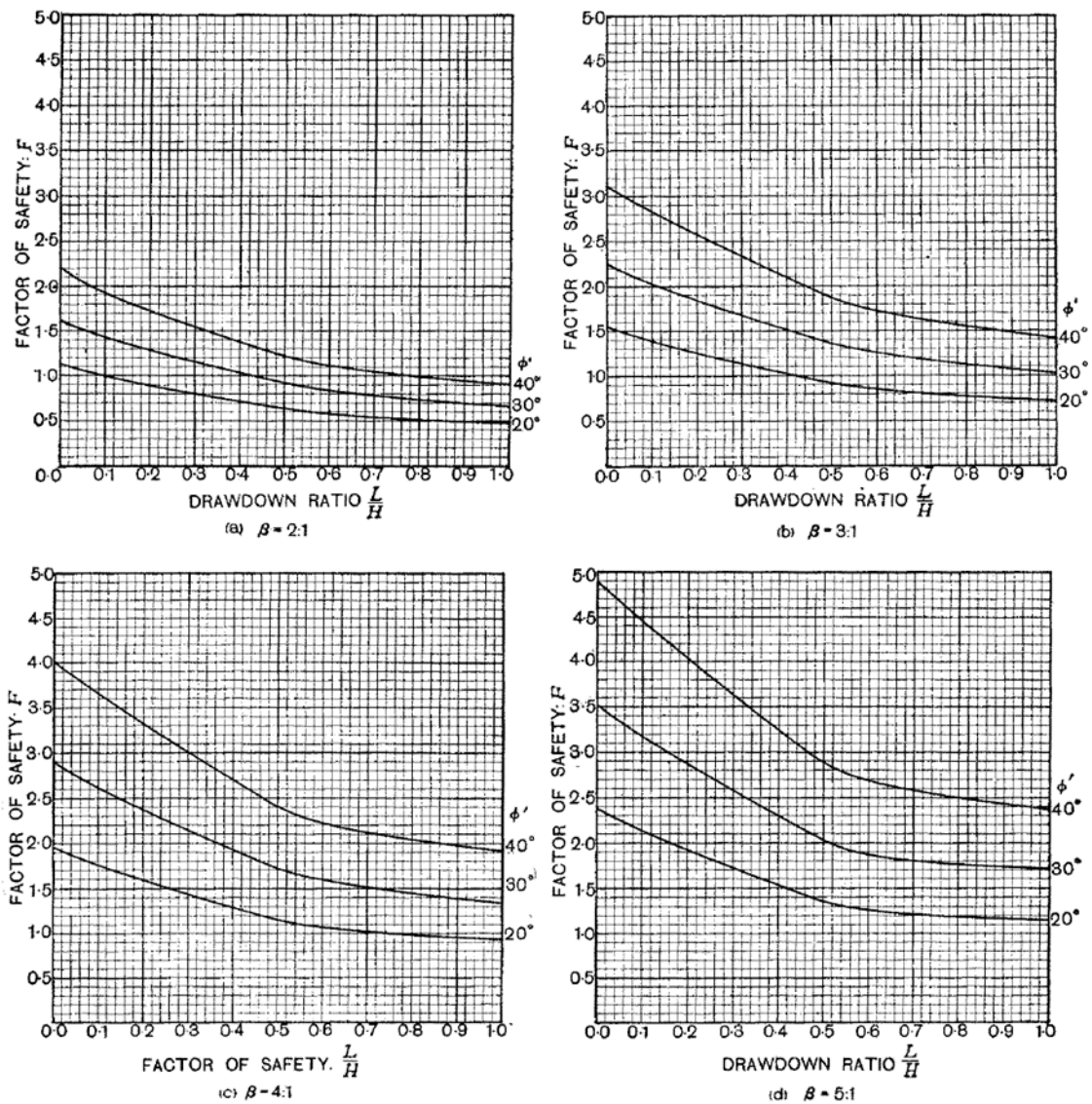


Figura A.1: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido estacionário, $c'/\gamma H=0,0125$.

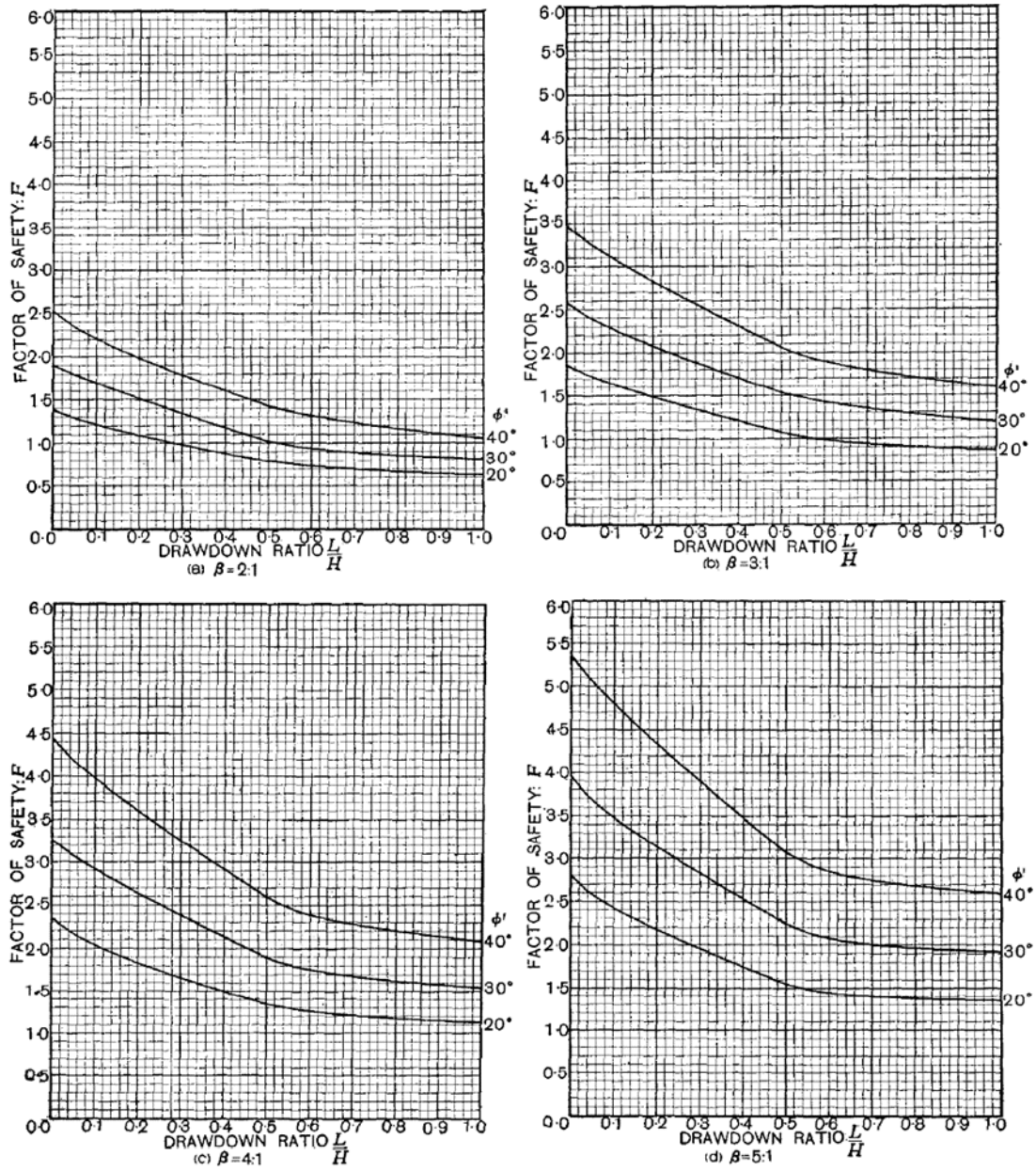


Figura A.2: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido estacionário, $c'/\gamma H=0,025$.

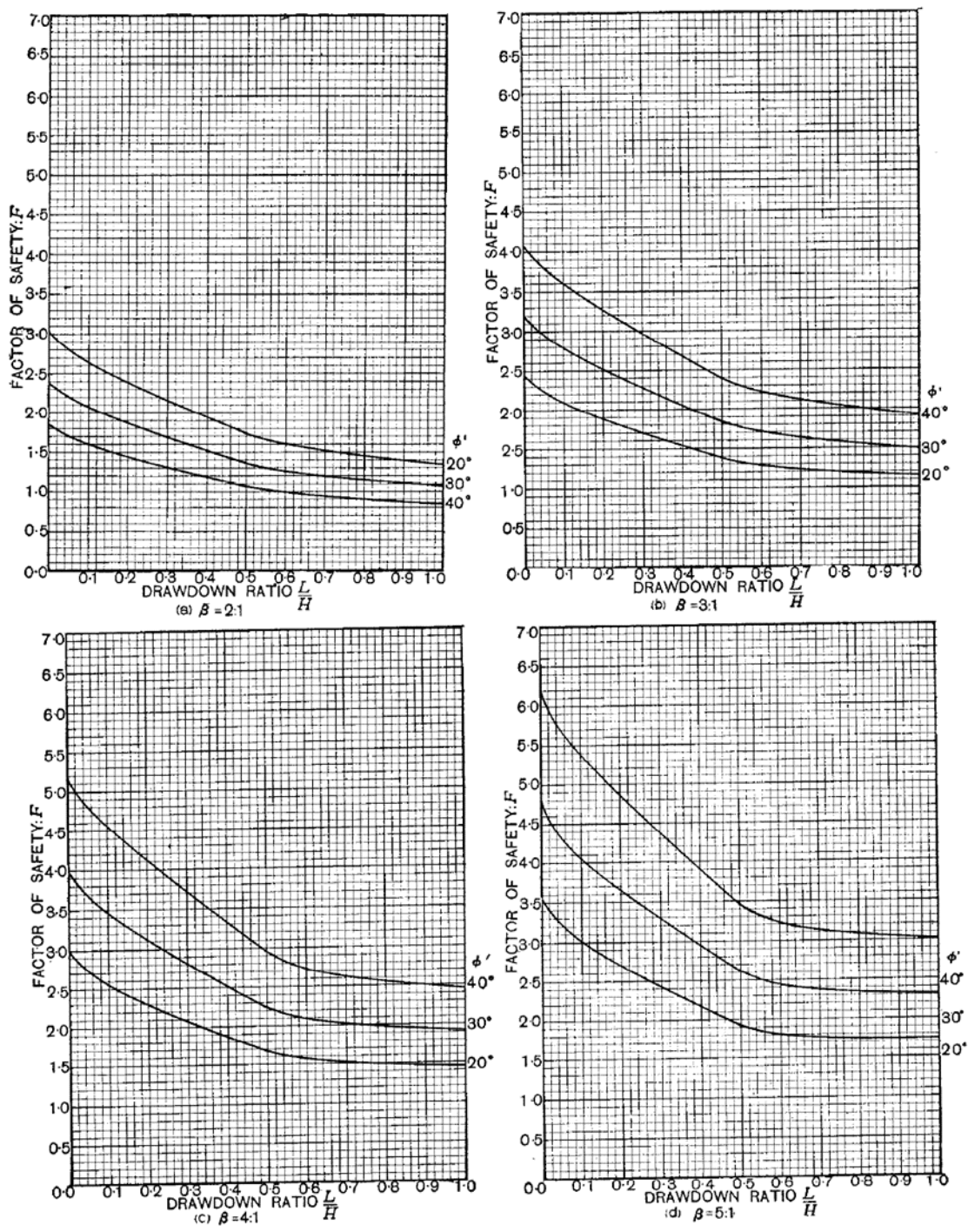


Figura A.3: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido estacionário, $c'/\gamma H=0,05$.

Anexo B

B-Ábacos de estabilidade de Lane e Griffiths (2000)

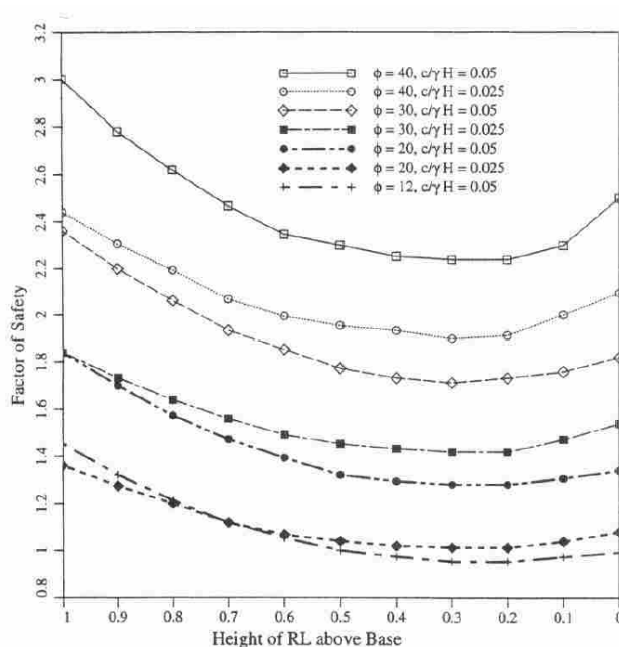


Figura B.1: Caso de esvaziamento rápido estacionário para um talude 2:1: $\phi' = 12, 20, 30, 40^\circ$; $c'/\gamma H = 0,025; 0,05$.

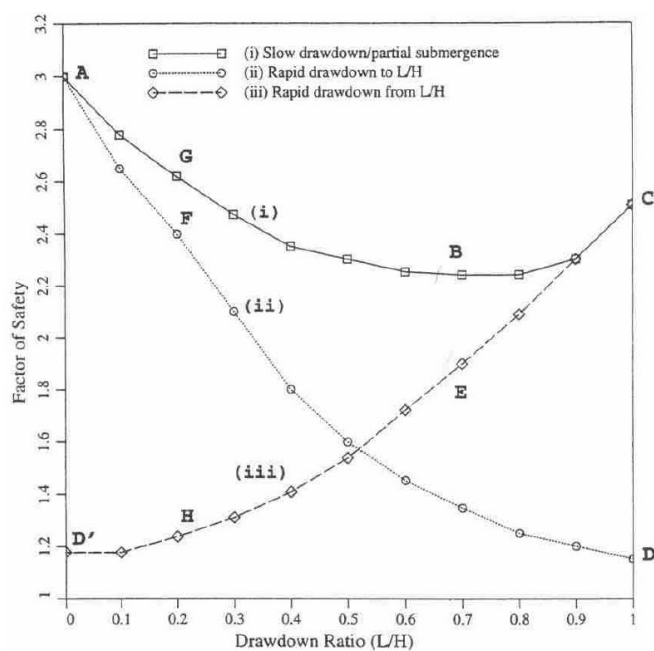


Figura B.2: Apresentam-se diferentes casos de esvaziamento para talude 2:1: $\phi' = 40^\circ$; $c'/\gamma H = 0,05$.

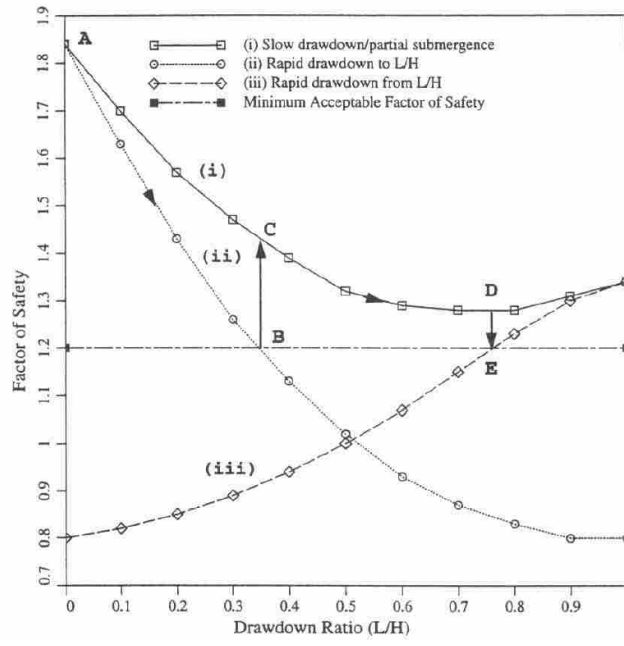


Figura B.3: Apresentam-se diferentes casos de esvaziamento para talude 2:1: $\phi'=20^\circ$; $c'/\gamma H=0,05$.

Anexo C

C-Ábacos de estabilidade de Michalowski (2002)

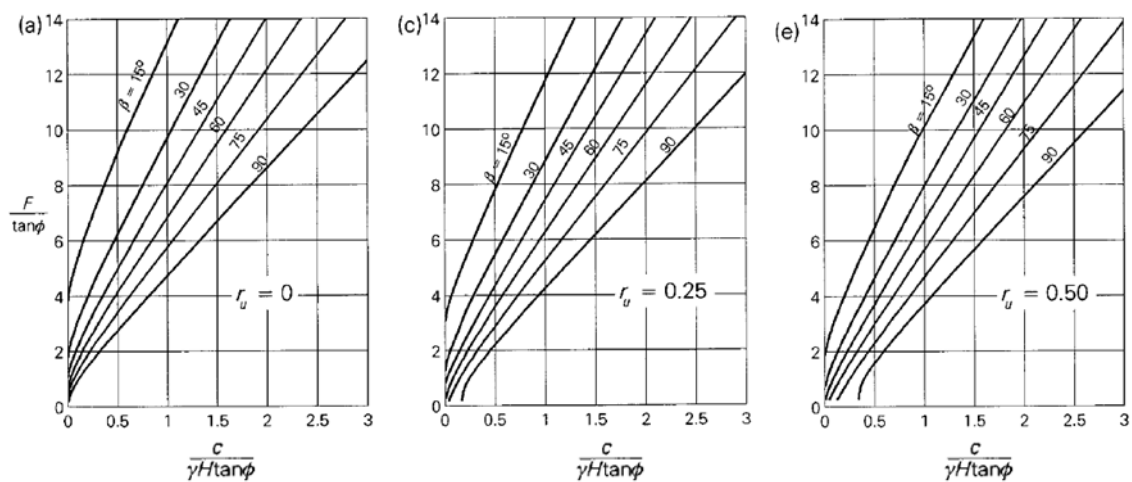


Figura C.1: Ábacos de estabilidade para taludes homogêneos.

Anexo D

D-Ábacos de estabilidade de Michalowski e Viratjandr (2006)

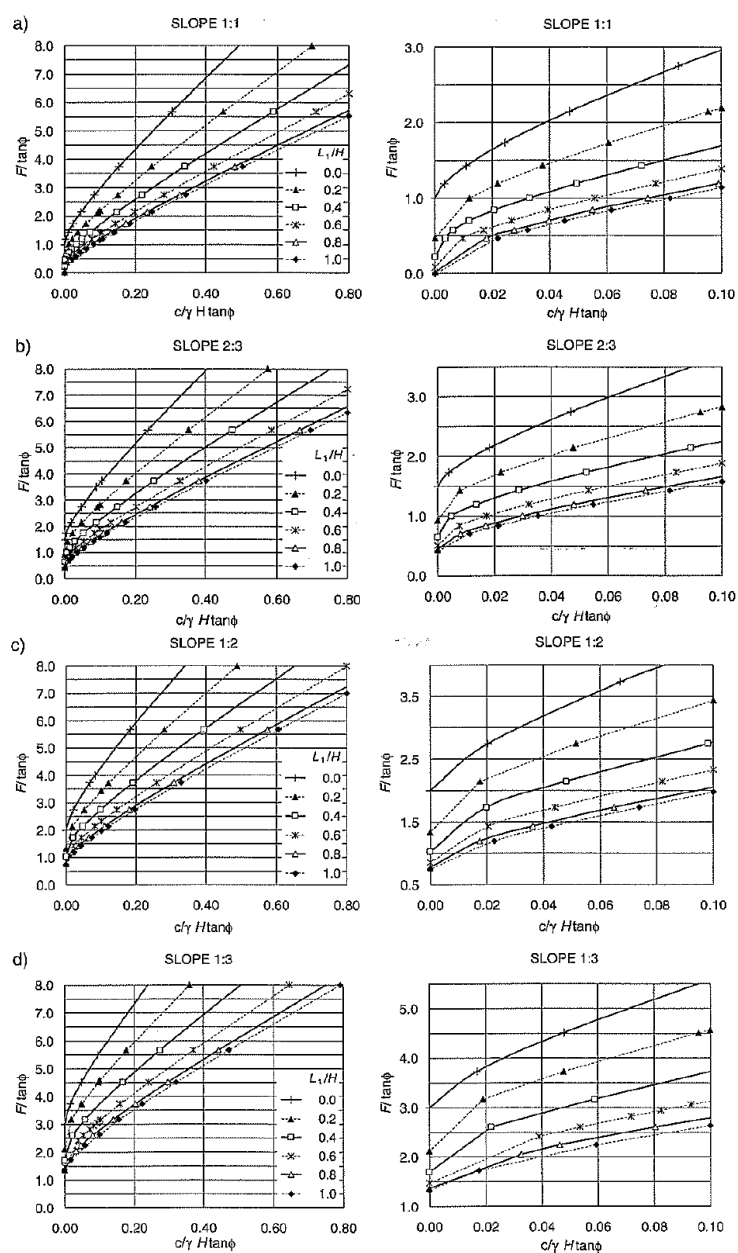


Figura D.1: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento rápido estacionário ($L_2=L_t=0$).

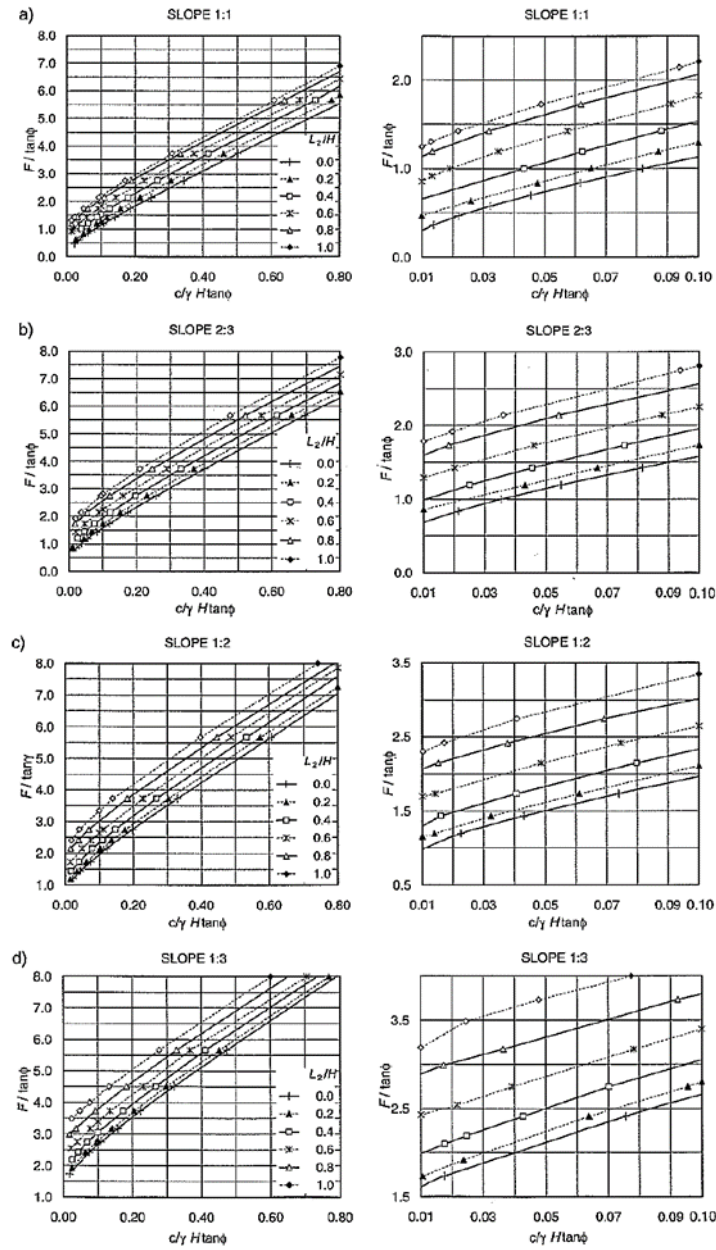


Figura D.2: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento intermédio estacionário, considerando apenas $L_2=L_t$, sendo que $L_1=L=H$.

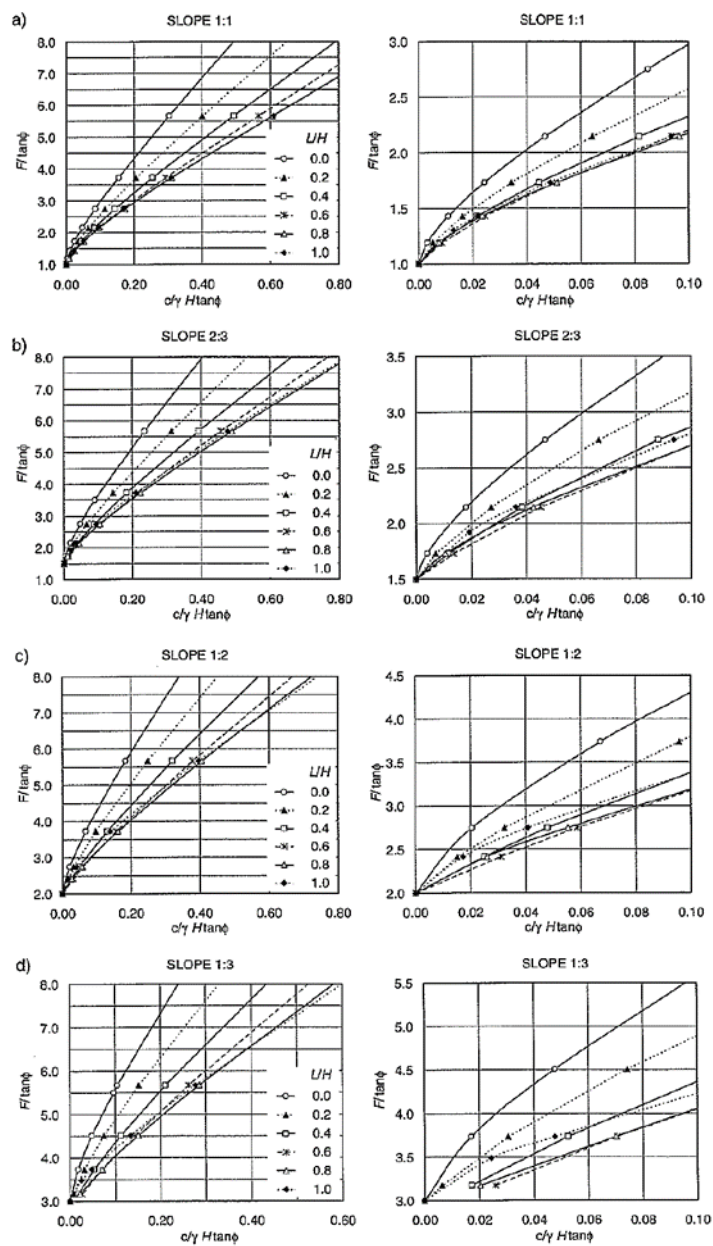


Figura D.3: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento lento estacionário ($L_1=L_2=L$).

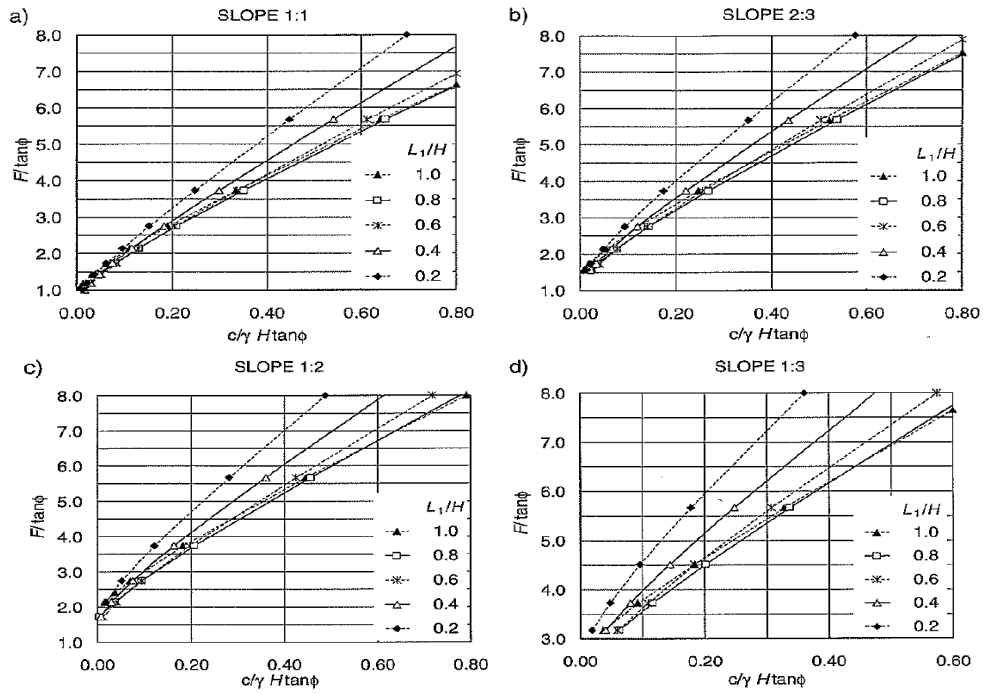


Figura D.4: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento intermédio estacionário considerando $\Delta L=L_1=L_2=0,2H$.

Anexo E

E-Ábacos de estabilidade de Sun e Zhao (2013)

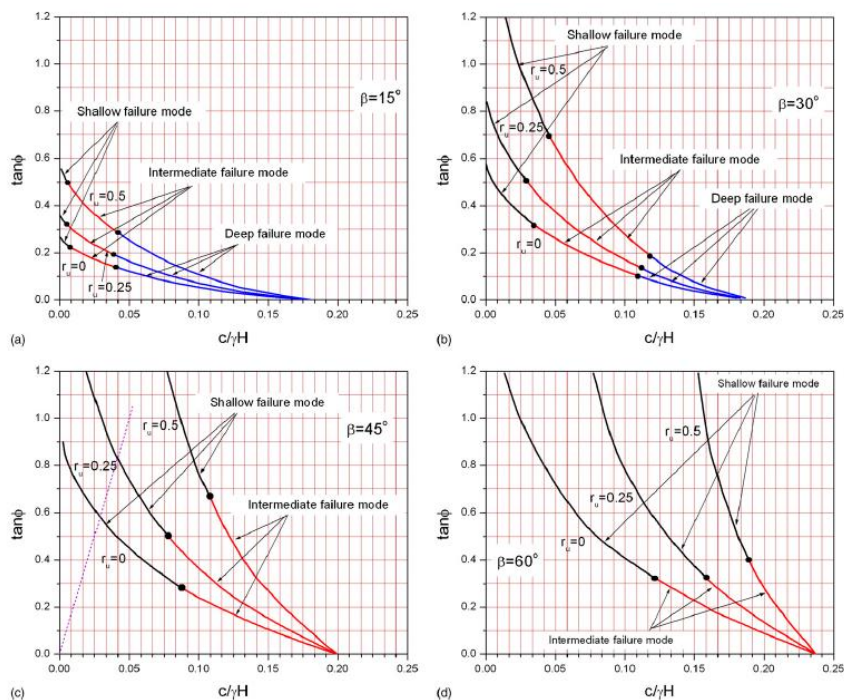


Figura E.1: Ábacos de estabilidade para taludes homogêneos considerando diferentes r_u .

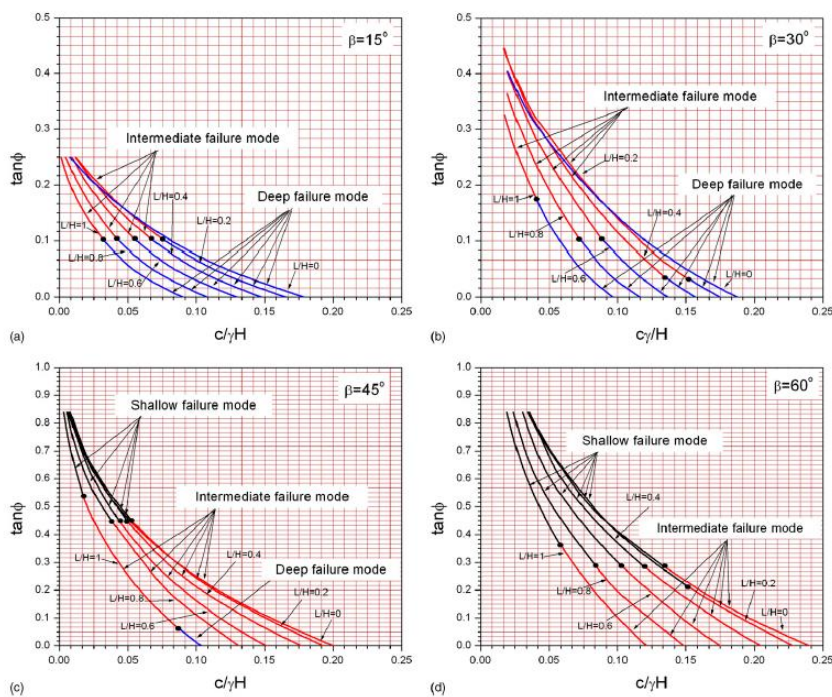


Figura E.2: Ábacos de estabilidade para o caso de esvaziamento lento estacionário.