UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, MECÂNICA DAS ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

AVALIAÇÃO DE MECANISMOS NÃO CONVENCIONAIS DE INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES:

O PAPEL DAS POROPRESSÕES DE AR

VICTOR SCARTEZINI TERRA

D0141G16
GOIÂNIA
2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **[X] Dissertação** **[ ] Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: Victor Scartezini Terra

Título do trabalho: Avaliação de mecanismos não convencionais de instabilização de taludes: o papel das poropressões de ar.

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

_____ Data: ____ / ____ / _____

Assinatura do (a) autor (a)

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

VICTOR SCARTEZINI TERRA

AVALIAÇÃO DE MECANISMOS NÃO CONVENCIONAIS DE INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES:

O PAPEL DAS POROPRESSÕES DE AR

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para defesa e obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Ph.D. Gilson de Farias Neves Gitirana Jr

D0141G16
GOIÂNIA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

GPT/BC/UFG

Terra, Victor Scartezini.
Avaliação de mecanismos não convencionais de instabilização de encostas: o papel das poropressões de ar [manuscrito] / Victor Scartezini Terra. - 2016.
xv, 117 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof°. Gilson de F. N. Gitirana Jr., Ph.D.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, 2016.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.
Apêndices.

1. Solos não saturados 2. Poropressão de ar 3. Estabilidade de taludes 4. Descargas atmosféricas I. Título.

PPG GECON **Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil** **UFG**

Ata de Nº 0141 da sessão de julgamento da Dissertação do aluno Victor Scartezini Terra da área de concentração Geotecnia do PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 29 dias do mês de agosto de 2016, às 13h30min, no Auditório Biolkino Pereira na Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "**Avaliação de Mecanismos Não Convencionais de Instabilização de Taludes: o Papel das Poropressões de Ar**", apresentada pelo aluno **Victor Scartezini Terra,** como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Geotecnia. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Gilson de Farias Neves Gitirana Junior (GECON/UFG), tendo como membros o Prof. Dr. Maurício Martines Sales (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (UFPE). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior	GECON/UFG	Presidente	Aprovado
Maurício Martines Sales	GECON/UFG	Examinador Interno	Aprovado
Leonardo José do Nascimento Guimarães	UFPE	Examinador Externo	Aprovado

(X) Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições.**

( ) Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.

Maurício Martines Sales
PPG-GECON/UFG

Leonardo José do Nascimento Guimarães
UFPE

Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
PPG-GECON/UFG

Candidato: Victor Scartezini Terra

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória de *Terezinha Silveira Terra*, 1933 – 2016.

AGRADECIMENTOS

Àquele que nunca vejo ou ouço, mas posso sentir ao meu lado, sempre me zelando. Deixo aqui minha gratidão à Deus por ter me dado forças para completar mais uma etapa.

Um agradecimento especial para o meu orientador, Gilson Gitirana Jr, por todo o auxílio, a prestatividade, e principalmente, por toda a paciência nestes dois anos de mestrado. Obrigado pela compreensão e por toda ajuda prestada, e por despertar em mim um interesse ainda maior pela geotecnia.

Gostaria de agradecer também aos meus familiares, sem os quais eu não teria chegado até aqui. Gostaria de deixar um agradecimento especial aos meus avós Silvio e Terezinha, que hoje se encontram no plano espiritual, a minha avó Vera, meus pais, Sérgio e Daniella, meus tios Luis Maurício, Luciano, Luís Henrique e Júnior. Também gostaria de agradecer ao meu querido primo e quase um irmão Augusto.

Um agradecimento aos demais professores do GECON, em especial: Márcia, Lílian, Maurício, Carlos, Renato Angelim e Sylvia. Um agradecimento especial ao professor Maurício, por todo auxílio desde a graduação.

Aos amigos e colegas de mestrado, pelas amizades construídas e por toda a ajuda e companhia no período de disciplinas. Gostaria de lembrar dos seguintes nomes: Rafaella, Isabella, Marina Augusta, Mirella, Camilla, Thiago, Kárita, Sofia, Flávio, Mauro, Mônica, Glacielle e Adriana.

Aos técnicos do laboratório de solos da UFG, João Júnior e Clayton, por todo o auxílio prestado e as dúvidas esclarecidas durante o período de disciplinas de laboratório.

Às funcionárias da secretaria do GECON, Verônica e Elaine, por todo o auxílio e atendimento prestado em todo o período de mestrado.

Agradeço também à alguns amigos e colegas que me auxiliaram em outras atividades, para que eu pudesse ter mais tempo para me dedicar à dissertação. Gostaria de citar os seguintes nomes: Lívia, Ana Carolina, Moema, Maria Avelina, Jéssica, Karol, Alan, Mirna e Higor.

À Furnas Centrais Elétricas, pelo notebook fornecido para realização de alguns trabalhos.

À Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE), pelo auxílio financeiro no início do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro durante todo o mestrado.

Ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) e à Universidade Federal de Goiás (UFG), pela oportunidade do mestrado e pelo espaço físico fornecido para realização do mesmo.

RESUMO

Desastres naturais relacionados a deslizamentos de massas de terra já causaram milhares de mortes e dezenas de milhares de desabrigados no mundo inteiro. Os deslizamentos podem ocorrer em sua maioria devido aos fatores provenientes da infiltração de água no solo, gerando aumento das poropressões positivas de água. Mas o que se observa frequentemente, é que a infiltração e a redução das poropressões negativas muitas vezes não são, na prática, o suficiente para justificar todos os escorregamentos observados. Mecanismos menos convencionais como descargas atmosféricas e o aumento das poropressões de ar consequentes do efeito Lisse normalmente não são levados em consideração em análises de ruptura, mas podem contribuir para a diminuição do fator de segurança de taludes. Esta pesquisa tem como objetivos, portanto, estudar como os efeitos do avanço da frente de infiltração e das descargas atmosféricas irão afetar a estabilidade de taludes em encostas naturais de solos residuais. Além disso, cita-se como objetivos secundários o desenvolvimento de modelos numéricos para análises acopladas de fluxo de água e ar, e a verificação desses modelos por meio de análises de validação. Um estudo detalhado de como a onda de choque e os gradientes de temperatura de descargas atmosféricas se comportam ao atingir a superfície terrestre é desenvolvido para que se possam definir as condições de fronteira do problema. Equações diferenciais parciais acopladas para fluxo de água e ar são desenvolvidas. As análises são feitas com o auxílio do programa FlexPDE, versão 6. Os resultados mostraram que há um aumento das poropressões de ar na massa de solo provenientes de descargas atmosféricas ou do efeito Lisse. No entanto, tais acréscimos de poropressão de ar trabalham tanto a favor do ganho de coesão aparente como como na diminuição das tensões líquidas. No estudo da influência do aumento das poropressões de ar como consequência de descargas atmosféricas conclui-se que eventuais rupturas de taludes causadas por isso serão rasas. Com relação ao estudo do aumento de poropressão de ar em taludes como consequência do efeito Lisse, conclui-se que os acréscimos de poropressão de ar serão maiores na massa de solo quando mais próximo da saturação estiver o solo.

Palavras-chave: Solos não-saturados. Poropressão de ar. Estabilidade de taludes. Descargas atmosféricas. Efeito Lisse.

ABSTRACT

Natural disasters related to landslides have caused thousands of deaths and left tens of thousands homeless people around the world. Landslides can occur in most cases due to factors related to water infiltration on soil, causing a raise in the positive pore-water pressure. But what is often observed is that both water infiltration and the reduction of negative pore-water pressure due to water infiltration are not, in practice, enough to justify some of the observed landslides. Some less conventionals mechanisms, such as lightning, are not, usually, taken in consideration in a failure analysis, but can contribute to the factor of safety reduction. This paper aims to study the effects of atmospheric discharges in the stability of natural slopes of residual soils. Partial differential equations governing the coupled flow of pore-water and pore-air are developped. The numerical modeling is made with the FlexPDE software, version 6. The results show that there is a raise on pore-air pressure inside the soil due to atmospheric discharge. However, the raise of pore-air pressure works both in the raise of the apparent cohesion and the reduction on net pressure. It is concluded that any failure due to atmospheric discharge will present a shallow slip surface.

Keywords: Unsaturated soils. Pore-air pressure. Slope stability. Atmospheric discharges.

LISTA DE SÍMBOLOS

α_{vg} - Parâmetro de ajuste da equação de curva característica solo-água de van Genuchten (1980)

Ψ – Sucção total

θ_a – conteúdo volumétrico de ar no solo

θ_w – conteúdo volumétrico de água no solo

θ_{sat} – conteúdo volumétrico de água no solo saturado

θ_{res} – conteúdo volumétrico de água residual

ρ_{ma} – massa específica do ar

σ_n – tensão normal total no plano de ruptura na ruptura

τ – tensão cisalhante

ϕ – ângulo de atrito interno

ϕ^b - ângulo indicativo da taxa de aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção

LISTA DE ABREVIATURAS

°C – grau Célsio

2D – 2 dimensões

3D – 3 dimensões

c’ –coesão efetiva

CCSA – Curva Característica Solo-Água

EDP – Equação Diferencial Parcial

g – aceleração da gravidade

GCI – Granito Completamente Intemperizado

h_a – pressão piezométrica do ar

h_w – carga hidráulica

k_a – coeficiente de permeabilidade do ar

k_d– coeficiente de permeabilidade ao ar no solo seco

km – kilômetro

kPa – kiloPascal

k_w – coeficiente de permeabilidade da água

k_w^{sat} – coeficiente de permeabilidade do solo saturado

mm – milímetro

m³ - metro cúbico

m_{vg} - Parâmetro de ajuste da equação de CCSA de van Genuchten (1980)

n_{vg} - Parâmetro de ajuste da equação de CCSA de van Genuchten (1980)

NASA – North Amercian Spatial Agency

RJ – Rio de Janeiro

SC – Santa Catarina

sen – seno

tan - tangente

u_a – poropressão de ar

$(u_a – u_w)$ – Sucção matricial

u_w – poropressão de água

v_a – taxa de fluxo de ar

v_w – taxa de fluxo de água

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Uma cumulus nimbo adaptada do trabalho de Krebiel (1986) sobre a região central do Novo México (Rakov; Uman, 2003). 21

Figura 2.2 - (a) Torre de Cumulus. (b) Estágio de Maturidade. (c) Dissipação. Adaptado de Carnavale, (2013). 22

Figura 2.3 - Distribuição de relâmpagos ao redor do mundo (NASA, 2002). 23

Figura 2.4 - Exemplos de fulguritos (Carnavale, 2013). 30

Figura 2.5 – Esquema mostrando a explicação original do Efeito Lisse (adaptado de Weeks, 2002). 31

Figura 2.6 - Contornos de poropressão de ar e grau de saturação obtidos nas análises numéricas de Zhang, Zhu e Fang (2009). 34

Figura 3.1 - Volume elementar representativo de uma massa de solo e os fluxos q em suas respectivas faces. 36

Figura 3.2 – Volume elementar representativo (VER) de um solo e as tensões atuantes em cada face. Adaptado de Fredlund e Gitirana Jr (2004). 47

Figura 3.3 - Forças em equilíbrio estático em uma fatia. 50

Figura 5.1- (a) Geometria original do talude de Fung Fai Terrace, Hong Kong; (b) Geometria simplificada utilizada nas análises numéricas. 63

Figura 5.2 – Medições *in situ* da sucção matricial ao longo do ano de 1980 por Sweeney (1982) *apud* Fredlund e Rahardjo (1993). 64

Figura 5.3 - Contornos de poropressões de água iniciais (valores em kPa) 64

Figura 5.4 – Distribuição temporal do pulso de pressão de ar. 67

Figura 5.5 – Perfis usados como referência nas condições iniciais. 67

Figura 5.6 - Propriedades hidráulicas dos solos estudados: (a) CCSA; e (b) Curvas de permeabilidade. (a) 69

Figura 5.7 - Curvas ao longo do tempo relacionadas ao caso C11: (a) perfis de poropressão de ar (b) histórico de poropressão de água (c) perfis de poropressão de água (d) histórico de poropressão de água (e) perfis de sucção matricial 73

Figura 5.8 - Verificação dos erros relativos a EDP para o fluxo de água. 73

Figura 5.9 - Perfis de poropressão de ar para (a) t = tp; (b) t = 2tp; e perfis de poropressão de ar normalizada para (c) t = tp; (d) t = 2tp; (e) t = 10tp; e (f) t = 100tp. 75

Figura 5.10 – Perfil de poropressão de ar para o caso C11 76

Figura 5.11- Perfis de poropressão de ar para (a) tp = 1x10-4, Pmax = 250 kPa e t = tp; (b) tp = 1x10-4, Pmax = 250 kPa e t = 2tp; (c) tp = 1x10-3, pmax = 1000 kPa e t = tp; e (d) tp = 1x10-3, pmax = 1000 kPa e t = 2tp. 78

Figura 5.12 – Histórico de poropressão de ar ao longo da análise paras elevações de (a) 9,8 metros e (b) 9,2 metros. 78

Figura 5.13 – Perfis de poropressão de ar para casos com diferentes condições iniciais de sucção matricial para (a) t = tp; e (b) t =2tp 79

Figura 5.14 – Histórico do fator de segurança para diferentes profundidades para os casos (a) A12; (b) B12; (c) C12; e (d) D12 81

Figura 5.15 – Contornos de poropressão de ar para o caso 01 na região mais superficial do talude. 83

Figura 5.16 – Cunhas de ruptura circulares adotadas para o monitoramento do fator de segurança. 86

Figura 5.17 – Evolução do FS para as seis superfícies de rupturas ao longo do tempo para o caso 01. 87

Figura 5.18 - Evolução do FS para as seis superfícies de rupturas ao longo do tempo para o caso 02. 87

Figura 6.1 - Perfis relativos ao caso 01 para diferententes instantes da análise: (a) Poropressão de ar; (b) Poropressão de água; (c) Sucção matricial e (d) Grau de saturação..... 93

Figura 6.2 - Perfis de poropressão de ar relativos aos seis casos estudados decorridas oito horas após o início da chuva..... 94

Figura 6.3 - Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1, 2 e 3..... 96

Figura 6.4 - Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1 e 4..... 97

Figura 6.5 - Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1, 5 e 6..... 98

Figura 6.6 - Comparação dos perfis de FS para o instante t = 8 horas: (a) Casos 01, 02, 03; (b) Casos 01 e 04; (c) Casos 01, 05, e 06..... 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Propriedades hidráulicas adotadas em cada caso das análises paramétricas. . 71

Tabela 5.2 – Propriedades da descarga atmosférica adotadas nas análises paramétricas. ... 71

Tabela 6.1 - Caracterização dos casos na análise paramétrica 1D relativa ao estudo do efeito Lisse 90

SUMÁRIO

RESUMO **9**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS **11**

LISTA DE FIGURAS **13**

LISTA DE TABELAS **15**

SUMÁRIO **16**

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO **18**

CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA **20**

2.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E FENÔMENOS ASSOCIADOS 21

2.1.1. Formação dos relâmpagos *21*

2.1.2. Características do pulso de ar gerado por descargas atmosféricas *24*

2.1.3. O efeito do aumento de temperatura do relâmpago *27*

2.2. FLUXO DE AR EM SOLOS NÃO SATURADOS 30

2.2.1. O Efeito Lisse *30*

2.2.2. Efeito na estabilidade de taludes *33*

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **36**

3.1. TEORIA DE FLUXO 36

3.1.1. Fluxo de água *37*

3.1.2. Fluxo de ar *39*

3.1.2.1. Lei de fluxo de ar *39*

3.1.2.2. Armazenamento de ar *40*

3.1.2.3. Equação diferencial parcial governante para o fluxo de ar *41*

3.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS SATURADOS/ NÃO SATURADOS 43

3.2.1. Curva característica solo-água (CCSA) *43*

3.2.2. Permeabilidade ao fluxo de água *44*

3.2.3. Permeabilidade ao fluxo de ar *45*

3.3. ESTABILIDADE DE TALUDES 45

3.3.1. Resistência ao cisalhamento considerando pressões de ar *46*

3.3.2. Análise 2D de tensões para a condição de deformações planas *47*

3.3.3. Formulação para talude infinito (1D) considerando variações na poropressão de ar *50*

CAPÍTULO 4 IMPLEMENTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DOS MODELOS DE ANÁLISE **55**

4.1. FERRAMENTAS NUMÉRICAS 55

4.1.1. FlexPDE *55*

4.2. VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS 57
4.2.1. Simulação do ensaio de translação de eixos 57
4.2.1.1. Geometria, condições inicial e de contorno 57
4.2.1.2. Propriedades do solo e parâmetros adotados na validação 58
4.2.1.3. Resultados da simulação da técnica de translação de eixos 58
4.2.2. Verificação do Safe-DP para obtenção da superfície crítica.. ***Erro! Indicador não definido.***

CAPÍTULO 5 O EFEITO DO PULSO DE PRESSÃO DE AR GERADO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 61

5.1. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ANALISADOS 61
5.1.1. Geometria, condições iniciais e de contorno 62
5.1.1.1. Modelo bidimensional 62
5.1.1.2. Modelo unidimensional 66
5.1.2. Propriedades dos materiais 67
5.1.3. Sumário de casos propostos 70
5.2. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA UNIDIMENSIONAL 72
5.2.1.1. Comportamento transiente típico 72
5.2.1.2. Influência das características do pulso de pressão nas poropressões de ar no solo 74
5.2.1.3. Influência da permeabilidade do solo nas poropressões de ar 77
5.2.1.4. Influência da condição inicial de sucção matricial nas poropressões de ar 79
5.2.1.5. Análise de estabilidade unidimensional 80
5.3. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA BIDIMENSIONAL 82
5.3.1. Avanço das poropressões de ar e variações nas tensões líquidas 82
5.3.2. Variações do fator de segurança ao longo de diferentes superfícies de rupturas 85

CAPÍTULO 6 A INFLUÊNCIA DO EFEITO LISSE NA ESTABILIDADE DE TALUDES 89

6.1. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ANALISADOS 89
6.1.1. Geometria, condições iniciais e de contorno 89
6.1.2. Propriedades dos materiais 90
6.1.3. Sumário de casos propostos 90
6.2. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA UNIDIMENSIONAL 91
6.2.1. Comportamento típico transiente 91
6.2.2. Comparações entre os diversos cenários 94

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES 101

7.1. ESTUDO DO AR DESLOCADO PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA 101
7.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EFEITO LISSE 102

REFERÊNCIAS 105

APÊNDICE A – SCRIPTS DO FLEXPDE ..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Desastres naturais relacionados a deslizamentos de massas de terra já causaram milhares de mortes e dezenas de milhares de desabrigados no mundo inteiro. Para citar alguns, os deslizamentos de Chunchi, no Equador, foram responsáveis por mais de 150 mortes em 1983, Benitez (1989) apontou em sua pesquisa. Zhang, Chen e Tao (2002) estudaram outro deslizamento em 1983 que resultou em 237 óbitos na Província de Gansu, na China. Rautela e Paul (2007) estudaram grandes deslizamentos de terra que causaram mais de 300 mortes nas regiões dos vales de Kali, Kaliganga, e Madhyamaheshwar, na Índia, durante o período de monções de 1998.

No Brasil, escorregamentos catastróficos de mesma magnitude também tiraram centenas de vidas nas últimas décadas. Uma das séries de escorregamentos com piores consequências ocorreu em janeiro de 2011, quando precipitações intermitentes que atingiram a região serrana do Rio de Janeiro entre os dias 11 e 15 totalizaram 355 mm, sendo 280 mm concentrado nos dois primeiros dias nas regiões de Nova Friburgo e Teresópolis (DRM-RJ,2011). Diversos autores (CORREIA *et al*.; 2011, MEDEIROS; BARROS; 2011) estudaram este evento que ficou conhecido como o "Megadesastre 11 da Região Serrana do Rio de Janeiro" e resultou em quantidades impressionantes de movimentos de massa de terra com destaque para os ocorridos nas cidades de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis. Os escorregamentos afetaram encostas urbanas e rurais de sete municípios, provocaram 916 mortes e deixaram mais de 20 mil desabrigados.

O número de pessoas afetadas direta ou indiretamente por esses desastres, além do fato de na maioria dos casos os eventos ocorrerem de maneira generalizada, afetando tanto áreas urbanas quanto rurais, com ou sem vegetação original, torna-os importantes objetos de estudo.

A verificação da estabilidade de encostas é um problema complexo, pois depende de uma série de fatores, como a topografia do terreno, a sua estratigrafia e características hidráulicas e mecânicas dos materiais, a interação solo-atmosfera, as características da cobertura do solo, como no caso de vegetação, dentre outros. A complexidade do problema resulta em diversos níveis de abordagem de análise, que pode ser realizada em uma, duas ou três dimensões,

incluindo o papel da não saturação do solo, quantificando os fluxos no solo devido à distribuição da precipitação em infiltração e escoamento superficial, para citar apenas alguns dos fatores tradicionalmente quantificados.

Dados meteorológicos como a precipitação, a umidade relativa, a temperatura, a radiação solar, e os ventos, além de taxas de evapotranspiração de água do solo, são muito importantes quando se deseja considerar a influência de ações atmosféricas na região mais superficial de uma massa de solo. De acordo com Cardoso (2014), do ponto de vista geotécnico, os dados meteorológicos mais importantes são a precipitação, umidade relativa e a temperatura, pois são os mais fáceis de se quantificar e deles dependem trocas de água entre o solo e a atmosfera. Ainda segundo a autora, estas trocas resultam de um balanço entre a massa de água que entra por infiltração com a massa que sai por evaporação, denominadas como balanço hídrico. De acordo com Gitirana Jr. (2005), a quantificação de riscos geotécnicos relacionados ao clima requer a habilidade de modelar a complexa influência que o clima exerce e as condições do terreno na estabilidade de taludes.

Experiências recentes têm mostrado que é comum a ocorrência de rupturas de taludes em condições antes consideradas seguras. O que se observa frequentemente, é que a infiltração e a redução das poropressões negativas muitas vezes não são, na prática, o suficiente para justificar todos os escorregamentos observados.

As poropressões de ar nos maciços não são consideradas na análise da estabilidade de taludes. Um dos raros estudos a respeito do efeito da pressão de ar na estabilidade de taludes diz respeito à aplicação artificial de pressões abaixo da atmosférica, para estabilização (BA-TE, 2004). Um argumento para a desconsideração de poropressões de ar é o fato de que a permeabilidade é relativamente elevada, podendo o ar escapar com facilidade dos maciços, evitando a geração de pressões positivas. Desta forma, não se encontram trabalhos que considerem possíveis mecanismos de instabilização.

Pressões de ar superiores à atmosférica, caso geradas, resultariam na redução das tensões totais líquidas, e consequentemente da resistência mobilizada por atrito. Por outro lado, podem ocorrer também alterações na sucção matricial favoráveis à resistência, o que também deveria ser considerado. Dois possíveis mecanismos de geração de pressão de ar são intimamente relacionados à interação solo-atmosfera. O primeiro, está associado ao pulso de pressão de ar produzido por descargas atmosféricas. Conforme amplamente reportado nos

trabalhos de Uman (2012) e Rakov e Uman (2003), pressões entre 2 e 10 atm podem ser geradas na vizinhança do ponto de contato com a superfície que recebe a descarga atmosférica. Tais fenômenos, além de potencialmente alterar de forma desfavorável o estado de tensões em maciços, causam vibrações no terreno, cujos efeitos foram estudadas por Carnavale (2013).

Outro fenômeno também pouco estudado, é o do aumento da poropressão de ar devido ao aprisionamento do mesmo por frentes de molhagem que podem ser produzidas durante precipitação, também conhecido como efeito Lisse. O efeito Lisse foi amplamente demonstrado na literatura em trabalhos como os de Wang *et al*. (1997), Weeks (2002), e Miyazaki, Ibrahimi e Nishimura (2012). O aprisionamento do ar, além de causar variações no estado de tensão total líquida que reduzem a resistência ao cisalhamento, causa o retardo do avanço da frente de molhagem, neste caso, um efeito favorável à estabilidade dos maciços. Apesar de serem encontrados estudos a respeito do efeito Lisse, o impacto na estabilidade de maciços não foi demonstrado.

Neste contexto, esta dissertação tem como principal objetivo estudar como os efeitos da chuva e descargas atmosféricas podem afetar as poropressões de ar e o correspondente impacto na estabilidade de taludes. Pode-se citar como alguns objetivos secundários:

- Desenvolver modelos numéricos para a análise acoplada de fluxo de água e ar;
- Produzir análises *benchmarks* para verificação dos modelos desenvolvidos;
- Demonstrar, por meio de análises de sensibilidade, a importância de cada mecanismo de instabilização e dos parâmetros envolvidos.

CAPÍTULO 2
REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo tem como principal objetivo apresentar os dois fenômenos estudados nesta dissertação relacionados com o aumento das poropressões de ar: as descargas atmosféricas e o efeito Lisse.

2.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E FENÔMENOS ASSOCIADOS

A literatura é rica em informações a respeito dos processos de formação e características das descargas atmosféricas. No entanto, pode-se afirmar que o principal foco dos estudiosos da área é na previsão e prevenção de descargas elétricas, sendo a avaliação dos seus impactos deixada em segundo plano. Mesmo assim, importantes informações podem ser encontradas na literatura a respeito das características das descargas elétricas que sejam relevantes ao entendimento do impactos destas na superfície do solo. Esta seção visa explicar o processo de formação das nuvens de tempestade, as descargas atmosféricas, e os produtos das mesmas quando atingem superfícies de solo, como as características dos pulsos de acréscimo de pressão de ar.

2.1.1. Formação dos relâmpagos

As nuvens de tempestade, também conhecidas como *cumulus nimbo*, formam-se, de acordo com Uman (2012), a partir da combinação de correntes de ar frio, denso e à alta altitude, com ar quente, úmido à baixa altitude. As massas de ar quente, menos densas, sobem a elevada altitude formando nuvens enquanto as massas de ar frio mais denso se deslocam numa trajetória descendente.

A distribuição e movimento das cargas elétricas de uma nuvem de tempestade é complexa e se altera continuamente à medida que a nuvem se desenvolve. Segundo Rakov e Uman (2003), estas cargas elétricas se originam de partículas de água líquida e congelada na atmosfera, além de alguns íons livres. A composição básica da estrutura de cargas de uma *cumulus nimbo* consiste de uma rede de cargas positivas próximas ao topo da nuvem, uma rede de cargas negativas abaixo e uma camada adicional de cargas positivas na base da nuvem, conforme é ilustrado na Figura 2.1 de Krebiel adaptada por Rakov e Uman (2003). Esta camada adicional de cargas positivas pode não estar sempre presentes. As duas cargas principais indicadas na Figura 2.1 formam um dipolo (ou tripolo quando da presença cargas positivas na base da nuvem) elétrico positivo.

Figura 2.1- Uma cumulus nimbo adaptada do trabalho de Krebiel (1986) sobre a região central do Novo México (*apud* RAKOV; UMAN, 2003).

Para o desenvolvimento de nuvens deste tipo são necessárias as seguintes condições: a presença de umidade, provocada pelos processos de evaporação e evapotranspiração, e a instabilidade convectiva, causada pela ascensão de ar quente (menos denso) e subsidência de ar frio (mais denso). Este processo de formação das *cumulus nimbo* pode ser dividido em três etapas: Torre de Cumulus, Estágio de Maturidade, e Dissipação. Estas três fases são ilustradas na Figura 2.2, retirada do trabalho de Carnavale (2013).

Figura 2.2 - (a) Torre de Cumulus. (b) Estágio de Maturidade. (c) Dissipação. Adaptado de Carnavale, (2013).

A Torre de Cumulus refere-se ao desenvolvimento vertical gerado pela corrente de ar ascendente que existe na nuvem. O Estágio de Maturidade é caracterizado pela ascensão do ar

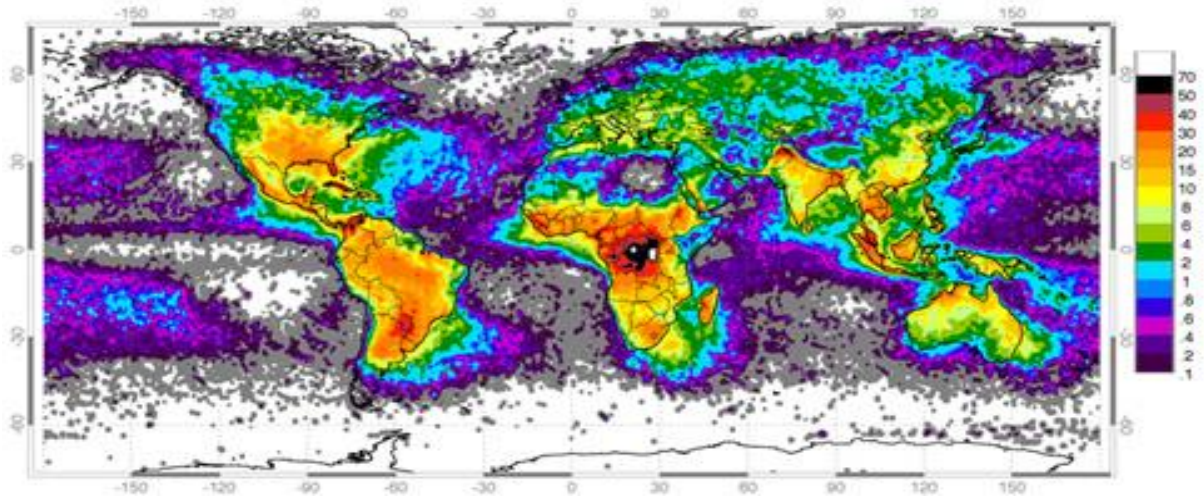
quente e subsidência do ar frio. A dissipação começa quando as correntes descendentes de ar frio atingem o solo, a chuva resfria o ar nos níveis mais baixos e nenhuma nova fonte de instabilidade está presente.

De acordo com Rakov e Uman (2003), é consenso entre os pesquisadores da área que o mecanismo predominante na formação de cargas elétricas dentro de uma nuvem de tempestade ocorre principalmente por meio das partículas de granizo e cristais de gelo presentes em gotas de água no interior das nuvens. As cargas elétricas são produzidas por meio de colisões entre pedaços de granizo com milímetros de espessura, pequenos cristais de gelo na presença de gotas de água com as partículas carregadas, que se deslocam devido à gravidade.

Quando o carregamento ocorre por convecção, os íons positivos situados juntamente à superfície terrestre são carregados por correntes ascendentes de ar quente para dentro da nuvem. Deste modo, com o aumento de altitude da nuvem verifica-se um aumento na quantidade de íons livres ao longo da área. A porção da nuvem que possui carregamento positivo passa a atrair os íons de cargas negativas, geralmente no interior das nuvens, resultando na estrutura de dipolo ou tripolo (vistas na Figura 2.1), que aumentam o campo elétrico próximo ao solo e causando as descargas elétricas nuvem-solo (RAKOV e UMAN, 2003).

O mapa da Figura 2.3 apresenta a distribuição de relâmpagos ao redor do mundo com uma escala de cores indicando o número anual de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado. As medições foram realizadas por uma equipe da Agência Espacial Norte Americana (NASA), e o mapa apresenta dados retirados em um período de 11 anos por meio de um detector transiente e um sensor de imagem de relâmpagos ao redor do mundo. As áreas em amarelo e vermelho indicam alta incidência de relâmpagos. Nota-se que há uma elevada distribuição de descargas atmosféricas nas regiões mais próximas dos trópicos. Ao mesmo tempo, as mesmas regiões que são suscetíveis a escorregamentos deflagrados por eventos de precipitação extremos, são também áreas de grande incidência de descargas atmosféricas.

Figura 2.3 - Distribuição de relâmpagos ao redor do mundo (NASA, 2002).



2.1.2. Características do pulso de ar gerado por descargas atmosféricas

Pode-se afirmar que o trovão é a evidência mais óbvia da magnitude dos impactos físicos do relâmpago. O trovão é definido como a parte audível do relâmpago, e seus componentes são classificados como estalo (*peal* ou *clap*) e estrondo (*roll* ou *rumble*). Apesar destes termos serem pouco utilizados na literatura, Uman (2012) apresenta uma breve definição em sua obra: os estalos consistem nos sons altos e súbitos que ocorrem durante um estrondo prolongado, e são normalmente separados por intervalos de 1 s ou mais; os estrondos são caracterizados com a parte do trovão com sons relativamente mais fracos e de longa duração. Os mesmos estão diretamente ligados à distância e à intensidade das descargas atmosféricas, de modo que, quanto maior a distância do relâmpago ao ponto observador, mais demorado será o tempo para audição de um trovão.

De acordo com Carnavale (2013), o tempo de audição de um trovão em uma determinada área permite aos pesquisadores compreenderem a distância e a localização das áreas de incidência dos mesmos por meio de uma triangulação, que interpola os dados de tempo e pressão, obtidos na captação de som com geofones. A localização dos pontos exatos de incidência dos trovões é importante, pois o fenômeno acarreta no acréscimo de pressão atmosférica próximo ao canal luminoso do relâmpago.

O estrondo produzido por descargas de eletricidade atmosférica, popularmente conhecida como trovão, é a onda sonora que apresenta uma energia máxima em frequência por volta de 100 Hz (SILVA, 2007). Embora não seja usual trabalhar com o conceito de energia em frequência, a quantidade de energia de uma onda de luz está diretamente relacionada com a

sua frequência. Ou seja, uma onda de luz de alta frequência possui energia alta, enquanto que luzes de baixa frequência possuem energia baixa.

De acordo com Uman (2012), a primeira gravação de variações de pressão devido a trovões foi publicada por Schmidt[2] (1914), que fez medições utilizando dois instrumentos: o primeiro tinha capacidade para medir pressões amostrando valores em frequências na faixa de 0,2-3 Hz, enquanto que o segundo media variações com frequência de 25- 100 Hz, embora este não fosse perfeitamente calibrado. As variações de pressões gravadas no equipamento de baixa frequência foram feitas com períodos entre 0,2 e 0,54 segundos e amplitudes de 10^{-5} atm. As variações de pressões mais fortes gravadas pelo equipamento eram rarefações. Precedendo cada rarefação mais forte um compressão mais curta era gravada. Já com o uso do seu instrumento que media altas frequências, Schmidt descobriu que frequências entre 25 e 40 Hz e entre 75 e 120 Hz eram as mais comuns.

Rakov e Uman (2003) apresentam em seu livro uma coletânea de alguns trabalhos com dados medidos para a magnitude das sobrepressões de ar e para duração do pulso destas sobrepressões. Por exemplo, os resultados da pesquisa de Arabadzhi[3] (1952), que com um dispositivo para medição de baixas frequências fez leituras e concluiu que as máximas energias presentes nos trovões correspondiam à frequências entre 0,25 e 2 Hz, com as mais frequentes observadas com frequência de 0,5 Hz. Aradbazhi também apresentou variações de pressão de baixa frequência da ordem de 10^{-3} atm para descargas a 1 km de distância do ponto de incidência das descargas atmosféricas. Em um trabalho posterior publicado em 1957, Arabadzhi[4] *apud* Uman (2012) apresentou medições de pressões absolutas com um dispositivo que media frequências até 10 kHz, e concluiu que as frequências contidas nos trovões variam de 0,25 a 500 Hz, e que a energia fundamental do trovão está contida nas frequências muito baixas.

De acordo com Rakov e Uman (2003), os acréscimos das pressões de ar oriundas dos trovões são da ordem de até 10 atm nos primeiros 5 μs no contato com os canais aquecidos das descargas atmosféricas. Few[5] (1970) *apud* Rakov e Uman (2003) observou que sobrepressões a 1 km de distância do ponto de impacto possuem magnitudes geralmente menores que 10^{-4}

[2] Schmidt, W. Über den Donner, Meteorol. Z., 487-498, 1914.
[3] Arabadzhi, V. Certain Characteristics of Thunder, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 82, p. 377-378, 1952.
[4] Arabadzhi, V. Some Characteristics of the Electrical State of Thunderclouds and Thunderstorm Activity, Uch. Zap. Minsk. Gos. Ped. Inst., im A. M. Gorkogo Yubil. Vypusk, Ser. Fiz-Mat, n. 7, 1957.
[5] Few, A. A. Lightning channel reconstruction from thunder measurements. J. Geophys. Res. 75: 7517-23.

atm. Newman *et al.* [6] (1967) *apud* Rakov & Uman (2003) mediram sobrepressões de uma descarga atmosférica artificial, fazendo quatro leituras que variaram entre 0,3-2 atm a uma distância de 35 cm do canal luminoso. Para Depasse[7], (1994) *apud* Rakov & Uman (2003), para um sinal acústico emitido a 70 metros do ponto de audição, o acréscimo foi da ordem de 0,0000493 atm.

O trabalho de Newman, único com dados experimentais medindo a sobrepressão da onda de choque nas proximidades do canal do relâmpago, consistiu em descargas atmosféricas artificialmente iniciadas por meio do disparo de cabos metálicos finos na atmosfera sobre nuvens de tempestade. A maioria das descargas começaram com pulsos de tempo relativamente baixos (da ordem de milissegundos), e então iniciou-se um movimento das descargas no sentido ascendente (solo-nuvem). Para Uman (2012), uma vez que os pulsos de tempo destas descargas foram relativamente lentos, é esperado que as sobrepressões medidas fossem menores que as sobrepressões emitidas por uma descarga atmosférica nuvem-solo usual. Segundo o autor, medidas usuais do pulso de tempo são da ordem de 5 μs.

De acordo com Uman (2012), a energia por unidade de comprimento de uma descarga é da ordem de 10^5 Joules/m. Uma porção considerável dessa energia aparece na forma do canal de expansão. O canal de expansão consiste em uma onda de choque de forma cilíndrica que se expande a partir do eixo de incidência da descarga atmosférica. De acordo com Lin[8] (1954) *apud* Uman (2012) a posição radial de uma onda de choque cilíndrica pode ser dada pela Eq. (2.1):

$$r = S\left(\frac{W}{p_0}\right)^{1/4} t^{1/2} \tag{2.1}$$

onde : S é um fator que depende das propriedades do gás; W é a fração de energia liberada (assumida como instantânea) por unidade de comprimento; e p_0 é a densidade atmosférica.

De acordo com Uman (2012) a pressão da frente de onda de choque pode ser calculada a qualquer ponto distante r do ponto de emissão, por meio da seguinte equação:

[6] Newman, M.M.; Stahmann, J.R.; Robb, J.D. Experimental Study of Triggered Natural Lightning Discharges. Report DS-67-3, Project 520-002-03X, Federal Aviation Agency, Washington, DC, 1967.
[7] Depasse, P. Lightning Acoustic Signature. J. Geophysics Res., n. 99,:25, p. 933-940.
[8] Lin, S.C.. Cylindrical Shock Waves Produced by Instantaneous Energy Release. Journal of Applied Phhysics, vol. 25, p. 54-57, 1954.

$$P = 0,2x10^{-3}\frac{W}{r^2} \tag{2.2}$$

onde: P é a pressão (kPa).

As equações (2.1) e (2.2) somente serão válidas se o pulso de pressão for muito maior do que a pressão atmosférica. Uma vez que a pressão da onda de choque decai com o quadrado do raio do cilindro, uma onda de choque forte irá eventualmente se transformar numa onda fraca (UMAN, 2012). Segundo o autor, não há uma teoria disponível para ondas de choque de baixa magnitude (i.e., na faixa de 0.1 a 10 atm).

Jones (1968) desenvolveu um modelo teórico para as variações da sobrepressão ao longo da distância do ponto de impacto da descarga atmosférica até o ponto central do ponto de impacto das análises.

Troutman (1969) realizou um cálculo numérico para a simulação do pulso de pressão de uma descarga atmosférica. O autor usou como método para seus cálculos um esquema bidimensional cilíndrico. A computação dos cálculos realizados pelo autor iniciou-se aplicando-se uma energia interna fixa ao longo de um modelo teórico cilíndrico no eixo de simetria. Procede-se com a computação hidrodinâmica ao longo do tempo, e o histórico completa da sobrepressão gerada e sua propagação é calculado. Este método usa uma equação real para o equilíbrio de estado do ar, que consiste em um ajuste analítico para dados empíricos. Os cálculos terminavam quando os pulsos de pressão tinham propagados para distâncias radiais em torno de 2 a 11 metros. O autor concluiu que para um raio de 1 km, a sobrepressão calculada pelo modelo teórico era algo entre 1 e 10 mb (milibars), dependendo da magnitude da energia inicial liberada. Ainda de acordo com os resultados obtidos pelo autor, para raios de 10 cm as sobrepressões atingiam valores de quae 10 atm.

2.1.3. O efeito do aumento de temperatura do relâmpago

Embora grande parte das descargas atmosféricas ocorram entre nuvens (raio), a maior parte dos estudos se dedicam a descargas atmosféricas nuvem-superfície terrestre (relâmpago). No entanto, poucas pesquisas se dedicam a incidência de relâmpagos em solos. Os estudos de Wakasa *et al*. (2012) apontam como possíveis fatores para a quantidade limitada de pesquisa relacionada ao assunto: (1) descargas atmosféricas são fenômenos pontuais, e portanto, não

têm chamado tanta atenção de pesquisadores, e (2) relâmpagos são fenômenos difíceis de se mensurar diretamente devido à sua natureza perigosa e impulsiva.

Grande parte dos estudos à cerca do tema são voltados para a análise do efeito do relâmpago em rochas. Appel, Abramhansen e Rasmussen (2006) estudaram transformações na estrutura mineral de rochas decorrentes da incidência de relâmpagos na Groelândia. Os autores descreveram os estragos causados pela incidência de dois relâmpagos, incluindo explosão da superfície rochosa, formada originalmente por anfibolitos e gnaisses, além das transformações ocorridas na mineralogia das rochas com a formação de fulguritos. Grapes e Müller-Sigmund (2010) fizeram um estudo semelhante estudando a fusão de gabro e formação de fulguritos em superfícies rochosas consequentes de descargas atmosféricas nos alpes italianos. Knight e Grab (2014) fizeram um estudo de como descargas atmosféricas atuam no intemperismo físico de rochas.

As descargas atmosféricas nuvem-solo são capazes de produzir correntes elétricas que variam de 10 kA a 300 kA (WAKASA *et al*., 2012; KNIGHT; GRAB, 2014) com um aquecimento instantâneo na superfície do terreno de até 30.000°C em um período menor ou de aproximadamente um milissegundo (RAKOV; UMAN, 2003; GRAPES; MÜLLER-SIGMUND, 2010). Tais condições podem causar superaquecimento e expansão do ar e umidade dentro da superfície do terreno, o que pode levar a uma série de impactos físicos como: (1) formação de fulguritos (GRAPES; MÜLLER-SIGMUND, 2010); (2) explosão de superfícies rochosas devido ao superaquecimento e expansão do ar nas fissuras e fraturas (WAKASA *et al*., 2012).

Uman (2012) afirma em sua obra que os aparelhos utilizados para medição de temperaturas nos relâmpagos apresentam seu pico na faixa de 30.000°C. Portanto, no caso de a temperatura for, por exemplo, 50.000°C durante 0.1 μs e da ordem de 30.000°C durante 4.9 μs, análises das radiações emitidas mediriam valores de temperatura da ordem de 30.000°C durante todo o intervalo de 5 μs do pulso. O autor conclui que, com base nos valores de onda de choque encontrados na literatura, é possível que valores de sobrepressão atinjam magnitudes superiores aos 10 atm já encontrados.

No trabalho de Knight e Grab (2014), os autores estudaram descargas atmosféricas contribuem geomorfologicamente como agentes remodeladores de montanhas rochosas. Estes fizeram um estudo de caso em uma encosta montanhosa situada no Lesoto Oriental, na África

Central, região com alta incidência de descargas atmosféricas. Os autores concluíram em seu estudo que quando um relâmpago atinge uma superfície rochosa o aumento abrupto da temperatura vaporiza toda a água presente nas fendas, que expande ao passar para o estado gasoso em alta pressão e temperatura, gerando uma explosão na região atingida pelo relâmpago.

Wakasa *et al*. (2012) fizeram um experimento em laboratório para analisar o que acontece quando um relâmpago artificial criado em laboratório, incide em três amostras de rochas diferentes (tufo, riorito e granito) com uma corrente de 20 kA. A amostra de tufo explodiu durante a descarga, enquanto que a amostra de riorito, apesar de não explodir, se fraturou. A descarga elétrica não conseguiu atravessar a amostra de granito.

García *et al*. (2015) fizeram uma correlação entre a incidência de relâmpagos nuvem-solo com relação ao tipo de solo. Os autores levaram em consideração dados de 11 anos de relâmpagos (2000-2010) na região de Castilla-Leon, na Espanha, que possui uma das maiores incidências de descargas atmosféricas na Europa. Os autores avaliaram a taxa de incidência de descargas atmosféricas em 16 grupos de solos da região e descobriram haver uma ocorrência maior de relâmpagos em três grupos de solos: *rendzinas* (solo não lixiviado, com rico em matéria orgânica, com coloração escura, superficial desenvolvido a partir de rochas calcárias); *podzols* (solo lixiviado, altamente ácido e rico em matéria orgânica, coloração que varia de marrom à alaranjada, com alta concentração de óxidos de ferro e alumínio); e *phaeozems* (solo rico em matéria orgânica, com alta alcalinidade, coloração escura, sem presença de material calcário no primeiro metro mais superficial).

García *et al.* (2015) também descobriram haver uma menor incidência de relâmpagos em dois grupos de solos: os gleissolos (solos úmidos, com encharcamento intermitente causados por uma drenagem inibida da água da chuva ou pela presenção do nível freático); e solos salinos (com coloração branca ou acinzentada, típico de regiões áridas e semi-úmidas, com pobres condições de drenagem).

Quando um raio atinge uma superfície de solo, a elevada temperatura do relâmpago, da ordem de 30000°C, atinge o solo e todo o percurso feito pela descarga atmosférica. Isto resulta na fusão do material disposto no caminho feito pelo raio. Pode-se verificar em alguns casos a fusão de quartzo e outros compostos. Ao cessar da descarga atmosférica, rapidamente a temperatura volta ao normal, solidificando todo o material previamente fundido. Estes novos

minerais formados são os chamados fulguritos (Figura 2.4), apresentando uma forma tubular indicando o caminho feito pelo raio.

Figura 2.4 - Exemplos de fulguritos (Carnavale, 2013).

Os fulguritos possuem uma forma tubular vítrea por dentro e com um aspecto fosco em seu exterior e são muito frágeis, podendo se desfazer com o simples manuseio. Viemeister (1983) catalogou fulguritos encontrados nos Estados Unidos mostrando que os mesmos podem apresentar várias formas e tamanhos.

2.2. FLUXO DE AR EM SOLOS NÃO SATURADOS

A maioria dos casos de rupturas de taludes encontrados na literatura apresentam como principal agente causador de escorregamentos a água. Esta pode ocasionar rupturas de diversas formas, por meio de geração de poropressões positivas de água, erosão superficial ou interna (*piping*), redução de sucção, dentre outras. Alguns fenômenos menos convencionais não são levados em consideração. Esta seção dedica-se a apresentar um destes mecanismos, que é consequência do aumento da poropressão de ar decorrente do efeito Lisse.

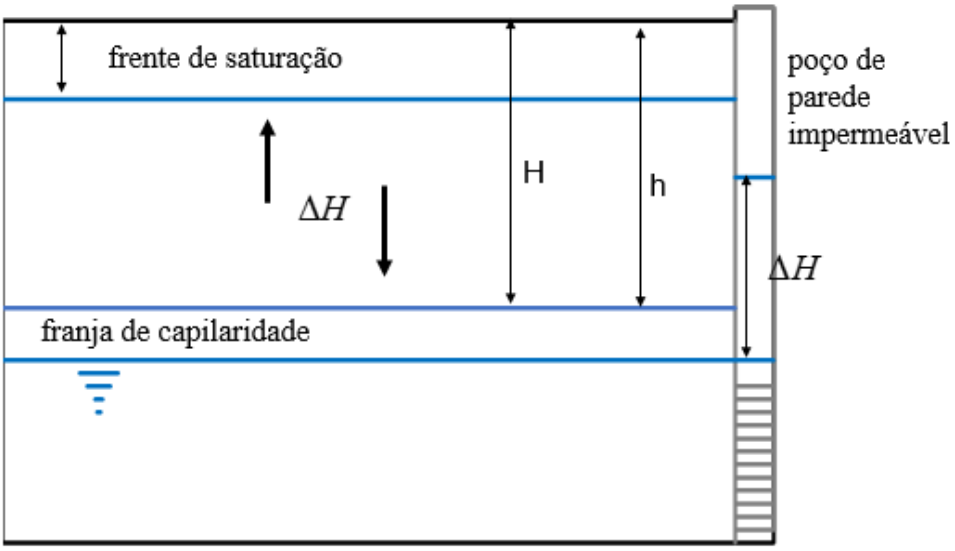
2.2.1. O Efeito Lisse

O efeito Lisse é um fenômeno que ocorre quando a infiltração causada por chuva intensa veda a região superficial do solo para o fluxo de ar, aprisionando ar na zona não saturada do solo (WEEKS, 2002; WANG *et al.*, 1997). Desta forma, o ar aprisionado é comprimido a medida em que a frente de saturação na superfície do solo avança, gerando aumento de poropressão de ar no interior da massa de solo.

Uma vez que a água da chuva infiltra no solo, a região mais próxima da superfície do terreno atinge a condição saturada, impedindo o fluxo de ar livre entre o solo e a atmosfera. Esse processo aumenta a poropressão de ar no solo. Enquanto essa poropressão é menor que o valor de entrada de ar do solo, o ar continua aprisionado e a poropressão de ar aumenta. Quando a poropressão de ar ultrapassa o valor de entrada de ar do solo o ar passa a escapar na forma de bolhas para a atmosfera.

A Figura 2.5 apresenta um esquema com a explicação original do efeito Lisse, de acordo com Weeks (2002). Segundo esta explicação, o fenômeno ocorre durante chuvas intensas, com a infiltração da água nas camadas mais próximas à superfície do terreno formando uma frente de solo saturado. Na camada de solo abaixo desta frente de saturação o ar fica aprisionado, e a medida que a frente de saturação avança as poropressões ar nessa camada aumentam de $\Delta H = P_{wc}\left[m/(h-m)\right]$, onde P_{wc} é a pressão atmosférica em termos de altura de coluna de água e m é a espessura da frente de saturação. Esse aumento de pressão de ar resulta no aumento do nível d'água em ΔH em um poço de observação com as paredes impermeáveis e fundo permeável.

Figura 2.5 – Esquema mostrando a explicação original do Efeito Lisse (adaptado de Weeks, 2002).



Análises de observações documentadas do efeito Lisse por outros autores indicam que o fenômeno ocorre normalmente em solos arenosos com lençol freático próximo à superfície do terreno. Hooghoudt[9] (1947) apud Weeks (2002) descreve que o fenômeno foi notado pela

[9] Hooghoudt, S.B. Waarnemingen van grondwaterstanden voor de landbouw. Comissie voor Hydrologisch TNO, Verslagen Technische Bijeenkomsten, 1-6, p. 185-201, 1947. Em holandês.

primeira vez em poços na cidade de Lisse, na Holanda, em um solo arenoso com nível freático à 0,6 m da superfície do terreno. Meyboom10 (1967) apud Weeks (2002) notou o fenômeno em áreas com o nível freático menor que 1,3 m em poços situados nas proximidades do rio Assiniboine, em Saskatchewan. O solo local também era arenoso. Heliotus e De Witt (1987) fizeram uma campanha de ensaios in situ para observar a elevação do lençol freático em resposta ao efeito Lisse. Os ensaios foram feitos em um solo do tipo turfa na região norte de Michigan durante dois verões. Os autores observaram 20 ocorrências do fenômeno nesse período. O sucesso dos autores em identificar o efeito Lisse em um solo não arenoso sugere que o efeito Lisse pode ocorrer em outras situações envolvendo um nível freático superficial.

Wang et al. (1997) desenvolveram um modelo de equações de fluxo acoplado água-ar com o objetivo de simular os efeitos do aprisionamento do ar na infiltração de água da chuva. A validação da equação desenvolvida pelos autores ocorreu por meio de ensaios em laboratórios que mostraram uma relativa acurácia, de acordo com os próprios autores, com o modelo numérico.

Para Weeks (2002) o fenômeno pode não ser notado em outras situações devido às pequenas irregularidades na superfície do terreno, a presença de macroporos e ao instável avanço da frente de saturação que ocorre na forma de *fingering*. As irregularidades na superfície do terreno resultam em uma frente de saturação de espessura variável que permite o escape do ar nas regiões de menor espessura. Os macroporos situados na zona não saturada permitem o escape de ar dos microporos depois que estes são saturados pela frente de molhagem. A ocorrência de *fingering* permite que a água adentre pela massa de ar confinada. Quando isso ocorre há a tendência de diminuição da espessura da frente de saturação na região destes avanços, permitindo o escape de ar para a atmosfera.

Weeks (2002) afirma em sua pesquisa que o efeito da pressão de ar confinada no avanço da frente de infiltração deve ser considerado, e portanto, leva à conclusão que a pressão confinada de ar é função da carga hidráulica imediatamente abaixo da frente de saturação.

Guo, Jiao e Weeks (2008) utilizaram um modelo tridimensional e transiente para estudar o fluxo acoplado entre ar e água no solo durante uma precipitação. Os autores tinham dois

[10] Meyboom, P. Groundwater studies in the Assiniboine River drainage basin: Part II. Hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in south-central Saskatchewan. Geological Survey of Canada Bulletin 139, 1967.

objetivos: avaliar a teoria do efeito Lisse apresentada por Weeks (2002) para prever sua magnitude por meio de modelagens que simulam a complexidade física de aquíferos reais, e conduzir estudos paramétricos para avaliar a influência que as propriedades do solo e a precipitação exercem no aumento do nível d'água no poço. Os resultados da simulação revelaram que a magnitude do Efeito Lisse aumenta com o aumento lâmina de água sobre o terreno.

Terra *et al*. (2015) também fizeram análises numéricas para simular o efeito Lisse e obtiveram resultados parecidos. Os autores tinham como objetivo avaliar a ocorrência do efeito Lisse em amostras de solos sujeitas ao ensaio de desagregação por imersão total. Foram realizados estudos paramétricos para avaliar a influência de três fatores na geração de poropressão de ar: o tipo de solo (laterítico ou saprolítico), a carga hidráulica de ensaio (ou seja, a altura da lâmina de água acima do topo da amostra), e o grau de saturação inicial da amostra de solo. Os autores concluíram que as poropressões de ar são maiores para maiores cargas hidráulicas de ensaio e para o solo com menor grau de saturação inicial.

Miyazaki *et al*. (2012) realizaram uma revisão com alguns fenômenos relacionados com flutuações na franja de capilaridade, dentre eles o efeito Lisse. Segundo os autores, o efeito Lisse só ocorrerá em casos de precipitações bastante intensas.

2.2.2. Efeito na estabilidade de taludes

O estudo de fluxo multifásicos em solos tem grandes aplicações em áreas como transporte de contaminantes, extração de petróleo, reservatórios geotérmicos e estabilidade de taludes não saturados. Em resposta à um eventual aumento nas poropressões de ar, a tensão líquida do solo é reduzida (Fredlund e Morgenstern, 1977). Consequentemente, a resistência ao cisalhamento do solo também pode sofrer grandes reduções. Isto significa que, em problemas de estabilidade de taludes, o aumento nas poropressões de ar pode ocasionar escorregamentos de terra.

Problemas relacionado com os efeitos do fluxo de água em solos não saturados e seus efeitos na estabilidade de taludes tem sido amplamente estudado na engenharia geotécnica. No entanto, a maioria das soluções existentes assumem que há uma conexão livre entre o ar contido nos poros do solo e a atmosfera, e, portanto, as poropressões absolutas de ar dentro do

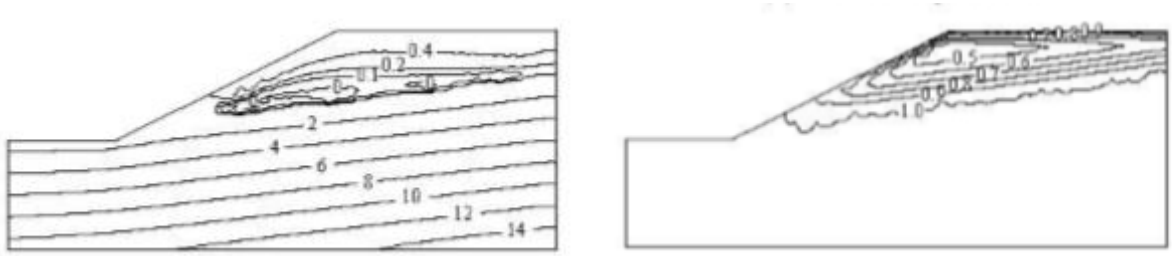
solo são consideradas zero nestas análises. Consequentemente, tais soluções podem não ser aplicáveis na simulação de problemas em que variações na poropressão de ar de são comuns.

O trabalho de Ba-Te (2004) analisa o efeito de variações nas poropressões absolutas de ar no solo. O autor desenvolveu um sistema emergencial de estabilização à vácuo de taludes, que funciona por meio de uma aplicação de poropressões negativas de ar no solo (estabelecendo o vácuo), o que diminui as poropressões absolutas de ar, aumentando as tensões líquidas.

Zhang, Zhu e Fang (2009) avaliaram, por meio de análises numéricas, a influência do fluxo de ar no solo durante uma análise de estabilidade de taludes bidimensional genérico e homogêneo, cuja a geometria é apresentada na Figura 2.6. Os autores simularam o talude sobre situações normais (sem chuva) e em um exemplo genérico de precipitação. Os autores utilizaram um programa de elementos finitos em suas análises e concluíram que em condições normais o ar não oferece nenhuma influência na estabilidade de taludes, porém para as análises realizadas simulando a ação de chuvas as poropressões de água reduziram, e as poropressões de ar aumentaram em decorrência do acréscimo de pressão do ar que oferece resistência à infiltração de água. Observações semelhantes foram feitas por Xiong *et al*. (2014), que observaram aumento de poropressões de ar em análises de estabilidade de taludes simulando o processo de precipitação. Os autores usaram um programa de elementos finitos que fazia o acoplamento solo-água-ar por meio do método das diferenças finitas, e observaram geração de poropressões de ar em suas análises de precipitação.

Figura 2.6 - Contornos de poropressão de ar e grau de saturação obtidos nas análises numéricas de Zhang, Zhu e Fang (2009).

(a) Contornos de poropressão de ar (kPa) (b) Contornos de grau de saturação



Os resultados obtidos por Zhang, Zhu e Fang (2009) mostram que ocorre um aumento nas poropressões de ar na zona não saturada do talude (Figura 2.6a). A Figura 2.6b mostra o que não há o aprisionamento de uma massa de ar entre o lençol freático e uma frente de saturação na superfície do terreno, contudo, pode ser que uma precipitação mais intensa e duradoura

pode ser o suficiente para criação de uma frente de saturação na superfície do talude.

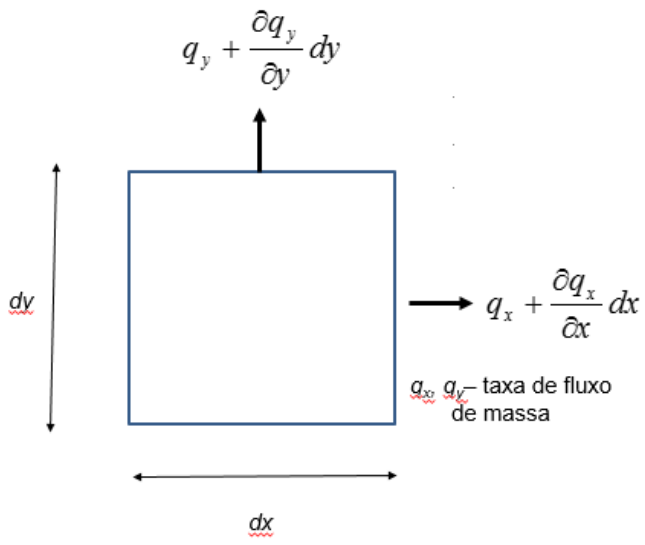
CAPÍTULO 3
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo desenvolver e apresentar as equações diferenciais parciais governantes associadas com a conservação de massa e fluxo de água e ar, utilizadas nas análises da dissertação. Também serão apresentadas formulações para a análise de estabilidade de taludes considerando poropressões de ar.

3.1. TEORIA DE FLUXO

Essa seção tem como principal objetivo desenvolver as equações diferenciais parciais (EDPs) que descrevem a conservação e o fluxo de água e ar em solos. As EDP's podem ser desenvolvidas a partir de um volume elementar representativo (VER), como o da Figura 3.1

Figura 3.1 - Volume elementar representativo de uma massa de solo e os fluxos q em suas respectivas faces.



. A equação diferencial bidimensional de conservação da massa de ar pode ser obtida considerando as taxas de fluxo de ar que entram e saem do VER e a variação de massa armazenada ao longo do tempo:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + Q = -\frac{1}{V_0}\frac{\partial M}{\partial t} \tag{3.1}$$

onde q_i é a taxa de fluxo de massa de ar ou água na direção *i* através de uma unidade de área de solo (kg m^{-2} s^{-1}); V_0 é o volume de referência (m³); M é a massa de fluído (ar ou água) armazenada no VER (kg); *t* é o tempo (s); e Q representa drenagem interna (kg m^{-3} s^{-1}).

3.1.1. Fluxo de água

Para reduzir a Eq (3.1) para fluxo de água à apenas uma variável principal, a taxa de fluxo de água e a quantidade de massa armazenada são normalmente escritas com base na lei de Darcy, que expressa o fluxo de água da seguinte forma:

$$v_y^w = -k_y^w \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w} + y\right) \tag{3.2}$$

onde: v_y^w é a velocidade de fluxo de água (m s^{-1}); k_y^w é a permeabilidade do solo ao fluxo de água (m³ m^{-2} s^{-1}), que pode ser expresso em função do conteúdo volumétrico de água do solo ou da sucção matricial; u_w é a poropressão de água (kPa); e γ_w é o peso unitário da água, $\approx 9{,}81$ kN m^{-3}.

A Eq. (3.3) apresenta o teor volumétrico de água armazenada no solo, em função de variações de volume total ($d\varepsilon_v$) e de sucção matricial ($u_a - u_w$):

$$d\theta_w = \beta_1^w d\varepsilon_v + \beta_2^w d(u_a - u_w) \tag{3.3}$$

onde: V_w é o volume de água no VER; $\beta_1^w = m_1^w / m_1^s$; e $\beta_2^w = m_2^w - m_1^w m_2^s / m_1^s$; $m_1^w = \frac{S}{1+e_0}\frac{de}{\mathrm{d}(\sigma_{média} - \mathrm{u}_a)} + \frac{e}{1+e_0}\frac{dS}{\mathrm{d}(\sigma_{média} - \mathrm{u}_a)}$; $m_2^w = \frac{S}{1+e_0}\frac{de}{\mathrm{d}(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)} + \frac{e}{1+e_0}\frac{dS}{\mathrm{d}(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)}$

$m_1^s = \frac{de}{\mathrm{d}(\sigma_{média} - \mathrm{u}_a)} = \frac{e}{1+e_0}\frac{de}{\mathrm{d}(\sigma_{média} - \mathrm{u}_a)}$; $m_2^s = \frac{d\varepsilon_v}{\mathrm{d}(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)} = \frac{e}{1+e_0}\frac{de}{\mathrm{d}(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)}$; e e_0 é o índice de vazios inicial.

O armazenamento de água do VER pode ser expresso em termos de massa específica e conteúdo volumétrico de água no solo:

$$\frac{1}{V_0}\frac{\partial M_w}{\partial t} = \frac{\partial(\rho_w \theta_w)}{\partial t} = \theta_w \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \tag{3.4}$$

onde: ρ_w é a massa específica da água (kg m^{-3}).

Considerando que a água é incompressível, a derivada no tempo da massa específica na Eq. (3.4) é zero. Para desenvolver o termo da Eq. (3.4) que contém a derivada no tempo do conteúdo volumétrico de água, não será considerada a água que ocorre na forma de vapor d'água dissolvido no ar, por se tratar de uma quantidade pequena que pode ser desprezada. Substituindo-se as equações (3.2), (3.3), e (3.4) na Eq. (3.1), tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[k^w \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w} + y\right)\right] = \beta_1^w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \beta_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \tag{3.5}$$

A Eq. (3.5) pode ser escrita de forma mais simplificada. Em casos que não haja necessidade de considerar as variações de conteúdo volumétrico de água com relação às variações de tensões líquidas ($m_1^w = 0$), a parcela referente à derivada parcial do conteúdo volumétrico de água pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[k^w \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_w}{\gamma_w} + y\right)\right] = m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \tag{3.6}$$

A Eq. 3.6 apresenta as poropressões de ar e água como variáveis principais. Em análises de percolação de água que desconsideram as pressões de ar, o termo da derivada no tempo é simplificado, considerando a pressão de ar constante. No caso de problemas com pressões de ar variáveis, será necessária uma segunda equação diferencial para tornar o sistema determinado.

É importante também sublinhar que dois tipos de variações de poropressão de ar interferem no regime de fluxo de água. A variações temporais terão impacto direto no termo de armazenamento. Variações de poropressão de ar causam variações de igual magnitude na sucção matricial e, portanto, na quantidade de água armazenada. Por outro lado, para que a variação de água armazenada seja efetivada, fluxos de água serão gerados, ocasionando variações nas poropressões de água. As taxas de fluxo de água, por sua vez, dependerão da permeabilidade à água, que é função da sucção matricial, também dependente da poropressão

de ar. Vê-se, dessa forma, que se tem um sistema com acoplamento íntimo e vários mecanismos de dependência entre o fluxo de água e ar.

3.1.2. Fluxo de ar

Para reduzir a Eq. (3.1) para fluxo de ar à apenas uma variável principal, a taxa de fluxo e a quantidade de massa armazenada devem ser escritas utilizando relações constitutivas e variáveis de estado apropriadas, tais como a Lei de Fick e a equação dos gases ideais. As sessões a seguir tratarão do desenvolvimento destes termos.

3.1.2.1. Lei de fluxo de ar

A taxa de fluxo de ar livre no solo é geralmente representada utilizando a Lei de Fick, que estabelece que o fluxo é provocado por gradientes de concentração de massa de ar em uma unidade de volume de solo. Uma modificação comumente realizada, neste caso, é substituir o gradiente de concentração pelo gradiente de pressão de ar, utilizando desta forma uma permeabilidade modificada (Fredlund & Gitirana Jr., 2005). Outra proposição que pode ser encontrada na literatura (GeoSlope Intenational, 2012) considera gradientes espaciais de pressão e de massa especifica do ar como agentes provocadores de fluxo de ar. Nesta última formulação de fluxo, que parece ser baseada em uma definição mais generalista da energia livre na fase ar, considera-se a seguinte definição de energia potencial na fase ar, H_a :

$$H_a = \frac{u_a}{g\rho_{a0}} + \frac{\rho_a}{\rho_{a0}} y \tag{3.7}$$

onde: ρ_{a0} é uma massa específica do ar de referência (kg m^{-3}).

Desta forma, a equação para o fluxo de ar toma uma forma semelhante à Lei de Darcy, expressando a taxa de fluxo de ar em termos volumétricos, da seguinte forma:

$$v_y^a = -k_y^a \frac{\partial H_a}{\partial y} \tag{3.8}$$

onde: k_y^a é a permeabilidade do solo ao fluxo de ar (m³ m^{-2} s^{-1}). O sinal negativo indica o fluxo de ar na direção de um menor gradiente de pressão piezométrica.

Fredlund & Gitirana Jr (2005) apresentam equações para mecanismos adicionais de fluxo de ar, quais sejam, os fluxos de ar dissolvido na água por difusão e por advecção. Esses mecanismos de fluxo serão desconsiderados no presente trabalho, por serem considerados de magnitude inferior e menor importância nos problemas aqui estudados.

3.1.2.2. Armazenamento de ar

O armazenamento de ar do VER pode ser expresso com base na massa específica do ar e no conteúdo volumétrico de ar no solo:

$$\frac{1}{V_0}\frac{\partial M_a}{\partial t} = \frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} = \theta_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \rho_a \frac{\partial \theta_a}{\partial t} \tag{3.9}$$

onde: $\rho_a = M_a / V_a$ é massa específica do ar (kg m^{-3}); V_a é o volume de ar no VER; e $\theta_a = V_a / V_0$ é o conteúdo volumétrico de ar.

O ar é altamente compressível, podendo sua massa específica ser expressa usando a lei dos gases ideais:

$$\rho_a = \frac{\bar{u}_a}{R_a T} \tag{3.10}$$

onde $\bar{u}_a$ é a pressão absoluta do ar, $u_a + u_{atm}$ (kPa); u_a é a poropressão de ar (kPa); u_{atm} é a pressão atmosférica, 101,325 kPa; $R_a = R / W_a$ é a constante individual do ar, 286,9 J kg^{-1} K^{-1}; R é a constante dos gases ideais, 8,314 J mol^{-1} K^{-1}; W_a é a massa molecular do ar no poro, 0,028966 kg mol^{-1}; e T é a temperatura (K).

Desta forma, o termo da Eq. (3.9), contendo a derivada parcial da massa específica de ar, pode ser combinado com a Eq. (3.10) e expandido utilizando a regra da cadeia:

$$\theta_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \frac{\theta_a}{R_a T}\frac{\partial u_a}{\partial t} + \frac{\theta_a \bar{u}_a}{R_a}\frac{\partial (1/T)}{\partial t} \tag{3.11}$$

Para desenvolver o segundo termo da Eq. (3.9), que contém a derivada do conteúdo volumétrico de ar, o volume de ar pode ser considerado composto por ar livre e por ar dissolvido da água do solo, como segue (Fredlund & Gitirana Jr, 2005):

$$\theta_a = \frac{V_v}{V_0} - \left(1 - H_c\right)\frac{V_w}{V_0} \tag{3.12}$$

onde: $H_c = V_{ad} / V_w$ é o coeficiente de solubilidade volumétrica de Henry (0,02 para o ar); V_{ad} é o volume de ar dissolvido na água do poro; e V_w é o volume de água nos poros. Consequentemente, variações do conteúdo volumétrico de ar podem ser determinadas com base nas variações correspondentes de volume total e de volume de água armazenada:

$$d\theta_a = \beta_1^a d\varepsilon_v + \beta_2^a d(u_a - u_w) \tag{3.13}$$

onde:

$$\beta_1^a = 1 - \left(1 - H_c\right)\beta_1^w = 1 - \left(1 - H_c\right) m_1^w / m_1^s \;;$$

$$\beta_2^a = -\left(1 - H_c\right)\beta_2^w = -\left(1 - H_c\right)\left(m_2^w - m_1^w m_2^s / m_1^s\right);$$

Finalmente, a segunda parcela da Eq. (3.9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\rho_a \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = \rho_a \beta_1^a \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \rho_a \beta_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \tag{3.14}$$

Considerando-se que não há variação na quantidade de água armazenada no solo quando se varia a tensão líquida, o valor de m_1^w se aproxima de zero, e consequentemente, β_2^a se aproxima de $-m_2^w(1 - H_c)$.

3.1.2.3. Equação diferencial parcial governante para o fluxo de ar

A equação que governa o fluxo de ar no solo pode ser obtida combinando as equações (3.1), (3.7), e (3.9). Considerando, por simplicidade, condições unidimensionais de fluxo, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\rho_a k_y^a \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_a}{g\rho_{a0}} + \frac{\rho_a}{\rho_{a0}} y\right)\right] + Q_a = \theta_a \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \rho_a \frac{\partial \theta_a}{\partial t} \tag{3.15}$$

Deve-se, em seguida, agregar as equações que exprimem o volume de ar armazenado no solo (3.11) e (3.14):

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\rho_a k_y^a \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_a}{g\rho_{a0}}+\frac{\rho_a}{\rho_{a0}}y\right)\right]+Q_a=\frac{\theta_a}{R_aT}\frac{\partial u_a}{\partial t}+\frac{\theta_a\bar{u}_a}{R_a}\frac{\partial(1/T)}{\partial t}+\rho_a\beta_1^a\frac{\partial\varepsilon_v}{\partial t}+\rho_a\beta_2^a\frac{\partial(u_a-u_w)}{\partial t} \quad (3.16)$$

Constata-se a natureza complexa do fenômeno de fluxo de ar no solo, que pode ser influenciado pelas significantes variações de massa específica do ar, controlado pela pressão do ar, pela sua temperatura, por variações no volume total do solo que alteram o volume de vazios disponível para armazenamento de ar e, finalmente, pelade sucção matricial, que altera a quantidade de água no solo compartilhando com o ar o volume de vazios.

Versões simplificadas da EDP governante podem ser obtidas, para casos particulares. Desprezando variações volumétricas totais e considerando condições isotérmicas, obtém-se a seguinte EDP:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\rho_a k_y^a \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_a}{g\rho_{a0}}+\frac{\rho_a}{\rho_{a0}}y\right)\right]+Q_a=\frac{\theta_a}{R_aT}\frac{\partial u_a}{\partial t}+\rho_a\beta_2^a\frac{\partial(u_a-u_w)}{\partial t} \quad (3.17)$$

Mesmo dispensando a modelagem de variações térmicas e da compressibilidade do solo, esta EDP ainda exige o seu acoplamento com a equação governante de fluxo da água no solo. O programa Air/W (Geoslope International, 2007), por exemplo, faz uso desta EDP e de apenas duas simplificações adicionais. O conteúdo volumétrico de água no solo é considerado como sendo independente a tensão total líquida e o volume de ar dissolvido em água é desprezado, tendo-se assim $\beta_2^a=-m_2^w$.

A desconsideração de variações de sucção matricial seria possível apenas caso fosse considerada uma condição de não drenagem da fase água. Neste caso, variações de poropressão de ar causariam iguais variações de poropressão de água, sendo, portanto, mantida constante a sucção matricial. Neste caso, teria-se:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\rho_a k_y^a \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u_a}{g\rho_{a0}}+\frac{\rho_a}{\rho_{a0}}y\right)\right]+Q_a=\frac{\theta_a}{R_aT}\frac{\partial u_a}{\partial t} \quad (3.18)$$

As equações (3.6) e (3.17) serão utilizadas, neste trabalho, para a análise do efeito do aumento da pressão de ar causado por descargas elétricas e pelo efeito Lisse, na estabilidade de taludes.

3.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS SATURADOS/ NÃO SATURADOS

Esta seção tem como principal objetivo estabelecer as propriedades dos solos não saturados adotadas nas análises de fluxo acoplado de ar e água desta dissertação. As propriedades necessárias são: a curva característica solo-água (CCSA), a função de permeabilidade ao fluxo de água e a função de permeabilidade ao fluxo de ar.

3.2.1. Curva característica solo-água (CCSA)

A CCSA possui um papel fundamental na determinação de funções de propriedades do solo não saturado (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Valores experimentais obtidos podem ser ajustados e representados por uma série equações matemáticas. Diversos modelos de relação constitutiva para o conteúdo volumétrico de água são encontrados na literatura, podendo-se destacar os modelos de Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976), van Genuchten (1980), e Fredlund & Xing (1994). A Eq. (3.19) apresenta a equação de van Genuchten (1980) para CCSA:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_{vg}\psi)^{n_{vg}}\right]^{m_{vg}}} \tag{3.19}$$

onde: $\theta_w = V_w / V_0$ é o conteúdo volumétrico de água (m^3m^{-3}); θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual (m^3m^{-3}); θ_{sat} é o conteúdo volumétrico de água para o solo saturado (m^3m^{-3}); ψ é sucção (kPa); α_{vg}, n_{vg} e m_{vg} são parâmetros de ajuste.

O parâmetro α_{vg} do modelo de van Genuchten relaciona-se com o inverso do valor de entrada de ar (unidades em kPa^{-1}). Portanto quanto maior o valor de α_{vg}, menor será o valor de entrada de ar da CCSA. O parâmetro n_{vg} é relacionado com a taxa de retirada de água do solo uma vez que o valor de entrada de ar é excedido. Portanto, quando maior o valor deste mais acentuada é a inclinação da CCSA entre o valor de entrada de ar e a sucção residual. Finalmente, o parâmetro de ajuste m_{vg} é relacionado com o conteúdo volumétrico de água residual. Quanto maior o valor de m_{vg}, menor é o valor de sucção em que necessária para que toda a água retida no solo fosse reduzida ao conteúdo volumétrico de água residual.

A definição da variável m_2^w, da Eq. 3.20, é diretamente obtida a partir da CCSA, tomando a derivada com respeito à sucção matricial:

$$m_2^w = \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} = -\frac{m_{vg} n_{vg} (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[\alpha_{vg} \left(u_a - u_w \right) \right]^{n_{vg}}}{\psi \left\{ 1 + \left[\alpha_{vg} \left(u_a - u_w \right) \right]^{n_{vg}} \right\}^{m_{vg}} \left[1 + \left[\alpha_{vg} \left(u_a - u_w \right) \right]^{n_{vg}} \right]} \tag{3.20}$$

3.2.2. Permeabilidade ao fluxo de água

Diferentemente do que ocorre nos solos saturados, onde a condutividade hidráulica é constante, nos solos não saturados esta depende do conteúdo de água volumétrico ou do grau de saturação, que por sua vez, se relacionam com a sucção do solo.

Os modelos estatísticos se baseiam no fato de tanto a CCSA quanto a condutividade hidráulica serem obtidas a partir da distribuição do tamanho dos poros do solo. Portanto, muitos dos autores que obtiveram uma relação constitutiva para o conteúdo volumétrico de água também propuzeram relações constitutivas para a condutividade hidráulica não saturada, como são o caso de Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976), Van Genuchten (1980), e Fredlund & Xing (1994). Os modelos de Mualem e van Genuchten foram adotados para as análises deste trabalho. Com o objetivo de se obter uma equação para determinação da condutividade hidráulica relativa a partir da CCSA, Mualem chegou na seguinte equação:

$$k_r^w = S_e^q \left[\int_{\theta_r}^{\theta_w} \frac{1}{\left(u_a - u_w \right)} d\theta_w \Big/ \int_{\theta_r}^{\theta_{sat}} \frac{1}{\left(u_a - u_w \right)} d\theta_w \right]^2 \tag{3.21}$$

onde q é uma constante igual a 0,5, cujo o valor ótimo foi sugerido por Mualem baseado em resultados de ensaios para 45 amostras de solo; dada na forma de função da saturação efetiva (S_e):

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \tag{3.22}$$

Com base no modelo de Mualem (1976), van Genuchten (1980) reduziu os três parâmetros de ajustes para dois, estabelecendo-se uma correlação entre os parâmetros n_{vg} e m_{vg}. Esta correlação é dada por $m_{vg} = 1 - 1/n_{vg}$. Deste modo, a redução para dois parâmetros de ajustes

tornou-se possível a obtenção de uma função de permeabilidade fechada para o solo não saturado (Eq. 2.4) a obtenção de integrais fechadas para as da Eq. 3.21, obtendo-se:

$$k^w = k_{sat}^w \frac{\left\{1-(\alpha_{vg}\psi)^{n_{vg}-1}\left[1+\left(\alpha_{vg}\psi\right)^{n_{vg}}\right]^{-m_{vg}}\right\}^2}{\left[\left(\left(1+\alpha_{vg}\psi\right)^{n_{vg}}\right)^{\frac{m_{vg}}{2}}\right]^{0.5}} \tag{3.23}$$

3.2.3. Permeabilidade ao fluxo de ar

Assim com no caso do fluxo de água, o coeficiente de permeabilidade ao ar no solo é baseado na distribuição do tamanho dos poros e na curva característica . Van Genuchten (1980) propôs uma equação para determinação do coeficiente de permeabilidade ao fluxo de ar baseada numa equação do grau de saturação efetivo do modelo de Mualem (1976), que foi adotada neste trabalho. O resultado é uma expressão fechada para a permeabilidade relativa do ar, que é assumida como função do grau de saturação efetivo. O modelo de van Genuchten-Mualem (1980) para a função do coeficiente de permeabilidade do ar é o seguinte:

$$k^a = k_d^a (1-\mathrm{S}_e)^{1/2}(1-\mathrm{S}_e^{1/q})^{2q} \tag{3.24}$$

onde: k_d^a é o coeficiente de permeabilidade ao fluxo de ar do solo seco (m s^{-1}).

3.3. ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes é geralmente definida em termos de um fator de segurança, F_s, que corresponde ao fator pelo qual a resistência ao cisalhamento do solo deve ser reduzida, de forma a trazer a massa de solo a um estado de equilíbrio limite. Tal equilíbrio é geralmente expresso em termos dos esforços ao longo de uma superfície de ruptura qualquer, da seguinte maneira:

$$F_s = \frac{S_f}{S_a} = \frac{\int_0^{\beta} \tau_{ff} d\beta}{\int_0^{\beta} \tau_a d\beta} \tag{3.25}$$

onde: S_f é a resultante dos esforços resistentes; S_a é a resultante dos esforços atuantes; τ_{ff} é a tensão cisalhante resistente no momento da ruptura; e τ_a é a tensão cisalhante atuante na superfície de ruptura.

Tal definição de fator de segurança, comum a todos os métodos de "equilíbrio limite", é adotada nos métodos clássicos de fatias e no "método aperfeiçoado", de Kulhawy (1969). Devido à ampla aceitação da abordagem de equilíbrio limite da prática de Geotecnia, este método será adotado neste trabalho, para quantificar o impacto das poropressões de ar na estabilidade de maciços.

Nas próximas seções serão apresentadas as formulações para quantificar as tensões atuantes e resistentes ao longo da superfície de ruptura, incluindo o efeito das poropressões de ar.

3.3.1. Resistência ao cisalhamento considerando pressões de ar

A teoria de resistência ao cisalhamento de solos não saturados é normalmente apresentada como extensões aos conceitos e formulações da mecânica dos solos saturados. Fredlund e Morgenstern (1977) apresentaram uma análise teórica do estado de tensões baseados na mecânica de solos multifásicos e concluíram que o estado de tensão de um solo não saturado pode ser descrito por duas das seguintes variáveis: $(\sigma_n - \mathrm{u}_a)$, $(\sigma_n - \mathrm{u}_w)$, e $(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)$, também denominadas tensão líquida, tensão efetiva, e sucção matricial, respectivamente. O modelo de Fredlund, Morgenstern e Windger (1978) descreve o estado de tensões do solo não saturado em termos de tensão líquida e sucção matricial, como pode ser visto na Eq. (3.26). O mesmo será utilizado nos scripts do FlexPDE desenvolvidos nesta pesquisa:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w)_f \tan\phi^b \tag{3.26}$$

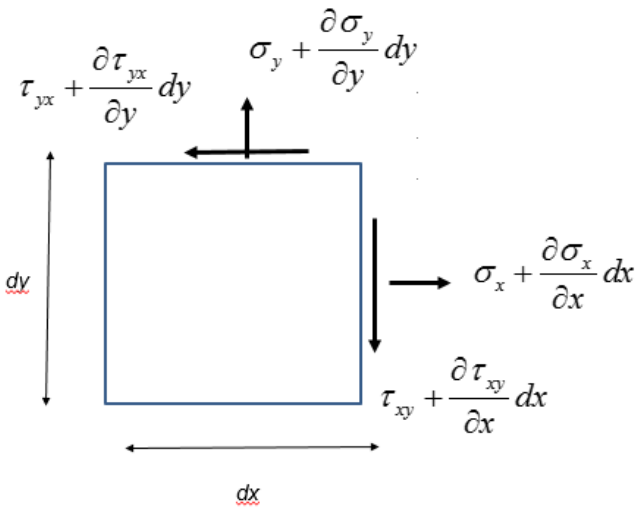
onde: c' é o intercepto de coesão efetiva (kPa); $(\sigma_n - \mathrm{u}_a)_f$ é a tensão normal líquida na ruptura (kPa); $(\mathrm{u}_a - \mathrm{u}_w)_f$ é a sucção matricial na ruptura (kPa); ϕ' é o ângulo de atrito interno (°); e ϕ^b é o ângulo indicativo da taxa de variação da resistência ao cisalhamento com a variação da sucção matricial (°).

Para Fredlund e Rahardjo (1993) esta combinação é mais satisfatória em termos práticos, pois possui a separação da tensão total com a poropressão de água, que são as propriedades que mais variam. Deste modo, separam-se os efeitos de mudança na tensão total dos efeitos de mudança na poropressão de água.

3.3.2. Análise 2D de tensões para a condição de deformações planas

A distribuição de tensões totais dentro de uma massa de solo não saturado é governada pelo equilíbrio estático de forças. As tensões atuantes em cada face do VER da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** podem ser decompostas em componentes normal e cisalhante nas direções x e y. As equações de equilíbrio para esse sistema, são:

Figura 3.2 – Volume elementar representativo (VER) de um solo e as tensões atuantes em cada face. Adaptado de Fredlund e Gitirana Jr (2004).



$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0 \tag{3.27}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y = 0 \tag{3.28}$$

As EDPs utilizadas nas análises de tensões e deformações considerando o efeito da poropressão de ar, foram desenvolvidas, por simplicidade, com base na teoria da elasticidade. Para isso, considerando as variáveis de tensão do solo não saturado e o estado plano de deformações bidimensional, tem-se:

$$d\varepsilon_x = \frac{1}{E}d(\sigma_x - \mathrm{u}_a) - \frac{\upsilon}{E}d(\sigma_y - \mathrm{u}_a) - \frac{\upsilon}{E}d(\sigma_z - \mathrm{u}_a) + \frac{1}{H}d(u_a - u_w) \tag{3.29}$$

$$d\varepsilon_y = -\frac{\upsilon}{E}d(\sigma_x - \mathrm{u}_a) + \frac{1}{E}d(\sigma_y - \mathrm{u}_a) - \frac{\upsilon}{E}d(\sigma_z - \mathrm{u}_a) + \frac{1}{H}d(u_a - u_w) \tag{3.30}$$

$$d\varepsilon_z = -\frac{\upsilon}{E}d(\sigma_x - \mathrm{u}_a) - \frac{\upsilon}{E}d(\sigma_y - \mathrm{u}_a) + \frac{1}{E}d(\sigma_z - \mathrm{u}_a) + \frac{1}{H}d(u_a - u_w) = 0 \tag{3.31}$$

$$d\gamma_{xy} = \frac{2(1-\upsilon)}{E}d\tau_{xy} \tag{3.32}$$

onde: $d\varepsilon_i$ são as deformações infinitesimais na direção i (x,y); $d(\sigma_i - \mathrm{u}_a)$ são as tensões líquidas na direção i; $d\tau_{xy}$ são as tensões cisalhantes; υ é o coeficiente de Poisson; E é o módulo de elasticidade; e H é o módulo de elasticidade relativo à sucção matricial.

Invertendo a relação tensão-deformação, de forma a colocar as tensões líquidas em evidência, tem-se:

$$d(\sigma_x - \mathrm{u}_a) = c_{11}d\varepsilon_x + c_{12}d\varepsilon_y - h_1 d(u_a - u_w) \tag{3.33}$$

$$d(\sigma_y - \mathrm{u}_a) = c_{12}d\varepsilon_x + c_{11}d\varepsilon_y - h_1 d(u_a - u_w) \tag{3.34}$$

$$d(\sigma_z - \mathrm{u}_a) = c_{12}d\varepsilon_x + c_{12}d\varepsilon_y - h_1 d(u_a - u_w) \tag{3.35}$$

$$d\tau_{xy} = c_{44}d\gamma_{xy} \tag{3.36}$$

onde: $c_{11} = E(1-\upsilon)/\left[(1+\upsilon)(1-2\upsilon)\right]$; $c_{12} = E\upsilon/\left[(1+\upsilon)(1-2\upsilon)\right]$; $c_{44} = E/\left[2(1+\upsilon)\right]$; e $h_1 = E/\left[H(1-2\upsilon)\right]$.

Substituindo a relação tensão x deformação nas equações de equilíbrio obtém-se as equações diferenciais governantes para relativas ao comportamento tensão x deformação:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\sigma_{x0} + c_{11}d\varepsilon_x + c_{12}d\varepsilon_y - h_1 d(u_a - u_w) + (u_a - u_{a0})\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_{44}d\gamma_{xy}\right) + F_x = 0 \tag{3.37}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(c_{44}d\gamma_{xy}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\sigma_{y0} + c_{12}d\varepsilon_x + c_{11}d\varepsilon_y - h_1 d(u_a - u_w) + (u_a - u_{a0})\right] + F_y = 0 \tag{3.38}$$

As deformações específicas podem ser expressas em termos dos deslocamentos u e v, de forma a tornar do sistema definido.

É importante observar que o termo de poropressão de ar, geralmente desprezado, tem papel fundamental na análise de tensões nos maciços sujeitos aos processos de pulso de pressão de ar externa imposto por descargas elétricas ou pelo efeito Lisse.

Um solo saturado de água possui variações na quantidade de água armazenada igual à variação volumétrica total. Assim, variações de poropressão de água são diretamente relacionados com carregamentos externos e o acoplamento entre o processo de balanço de massa e fluxo de água e equilíbrio de forças é importante. Por outro lado, o solo no estado não saturado possui vazios preenchidos por ar que permitem certa drenagem da fase água e que tornam o acoplamento entre fluxo de água e análises de tensões menos relevante para uma acurada representação dos processos de interesse. Por outro lado, a natureza rápida do pulso de pressão de ar associado com uma descarga atmosférica pode impor condições não drenadas às fases ar e água por um breve espaço de tempo. Neste caso, a desconsideração da variação de volume total do solo pode ser considerada adequada apenas em solos relativamente rígidos. Em síntese, a desconsideração da variação de volume total do solo na análise de balanço de fluxo de ar e água pode ser considerada mais adequada para materiais que atendam à duas condições simultaneamente: que sejam não saturados e que sejam relativamente rígidos.

Trazendo agora a atenção às equações de equilíbrio de momento linear e angular e de análise de tensões e deformações, admitindo a hipótese de que o solo é relativamente rígido e que a variação volumétrica é pequena para a amplitude de variação de sucção matricial de interesse, o termo associado com variações de sucção pode ser descartado. Assim, tem-se o seguinte par de equações:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\sigma_{x0}+c_{11}d\varepsilon_x+c_{12}d\varepsilon_y+\left(u_a-u_{a0}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left(c_{44}d\gamma_{xy}\right)+F_x=0 \tag{3.39}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(c_{44}d\gamma_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[\sigma_{y0}+c_{12}d\varepsilon_x+c_{11}d\varepsilon_y+\left(u_a-u_{a0}\right)\right]+F_y=0 \tag{3.40}$$

Numa análise convencional de solos não saturados, a parcela referente as poropressões de ar poderia ser desconsiderada a partir do pressuposto que estas são iguais às pressões atmosféricas. No entanto, para as análises realizadas nesta dissertação estas parcelas são importantes para as análises, uma vez que as mesmas estão relacionadas com variações nas

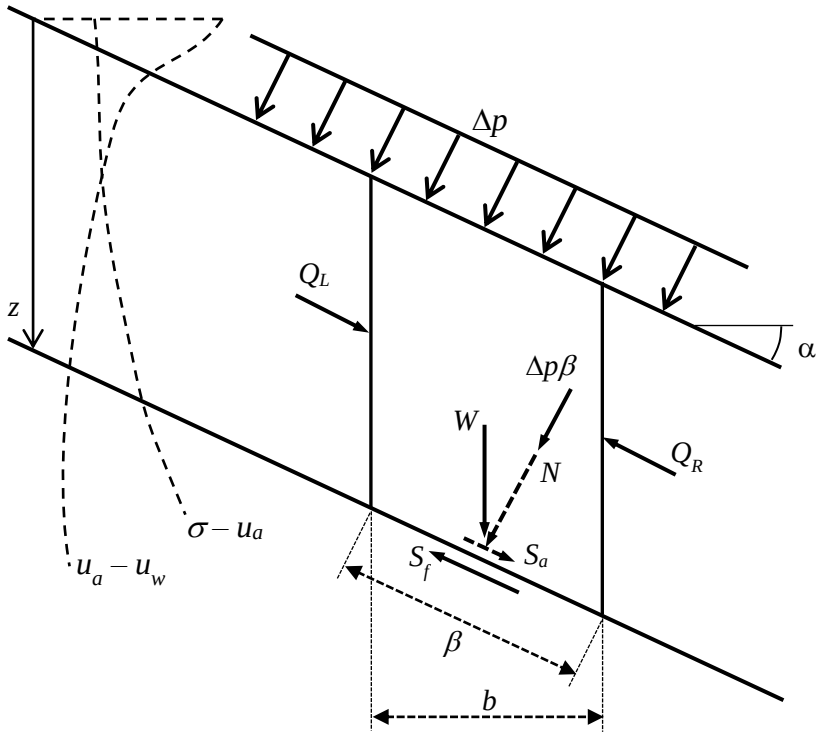
poropressões de ar. Carregamentos externos, causados por pulsos de pressão de ar, podem ser equilibrados em parte por acréscimos de poropressão de ar. No entanto, como o alcance espacial do aumento de poropressão de ar é limitado pela permeabilidade do meio, tem-se um sistema não homogêneo, com variações no estado de tensão que depende de todos esses fatores.

Com a distribuição de tensões totais obtida em função das condições de fronteira do problema, tal como o carregamento do pulso de ar, pode-se realizar a pesquisa das tensões ao longo de qualquer cunha de ruptura de interesse. Este é, em sua essência, o método de equilíbrio limite aperfeiçoado, proposto por Kulhawy (1969). A alteração fundamental, aqui incluída, é a incorporação de poropressões de ar.

3.3.3. Formulação para talude infinito (1D) considerando variações na poropressão de ar

Em taludes de grande extensão, onde a espessura da cunha de ruptura estudadaé pequena em relação à extensão do talude, é comum a realização de análises considerando as forças atuantes em uma fatia única (i.e., considerando o talude infinito). Nesses casos, a superfície de ruptura é considerada paralela à superfície do talude, conforme ilustrado pela Fig. XX. Será apresentada a seguir uma formulação para taludes infinitos, desenvolvida nesse trabalho. A adoção de tal formulação torna as análises computacionalmente simples e pode ser justificada pelas características espaciais dos fenômenos estudados, todos envolvendo mecanismos de ruptura relativamente rasos.

Figura 3.3 - Forças em equilíbrio estático em uma fatia.



A Figura XX apresenta todas as forças em equilíbrio estático que atuam numa fatia de um talude genérico: o vetor W representa o peso próprio da massa de solo, que pode ser decomposta em um componente normal à base (N) e outro tangencial à base (S_a); duas componentes de esforços laterais que e anulam (Q_R e Q_L); e um componente de esforço resistente ao cisalhamento (S_f), que deve ser reduzida para trazer a massa de solo a um estado de equilíbrio limite:

O fator de segurança F_s é definido como o fator pelo qual a força resistente ao cisalhamento do solo (S_f) deve ser reduzida para trazer a massa de solo a um estado de equilíbrio limite:

$$S_m = \frac{S_f}{F_s} \tag{3.41}$$

onde: S_m é a força cisalhante mobilizada, sendo $S_m = S_a$ e S_a a força cisalhante atuante. Rearranjando a Eq. (3.41) e expressando as forças em termos de integrais das tensões:

$$F_s = \frac{S_f}{S_a} = \frac{\int_0^\beta \tau_{ff} d\beta}{\int_0^\beta \tau_a d\beta} = \frac{\tau_{ff}\beta}{\tau_a \beta} = \frac{\tau_{ff}}{\tau_a} \tag{3.42}$$

A resistência ao cisalhamento pode ser expressa de acordo com a equação de Mohr-Coulomb, estendida para o caso geral de solos não saturados, da seguinte forma:

$$\tau_{ff} = c' + (u_a - u_w)_f \tan\phi^b + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' \tag{3.43}$$

onde: c' é a coesão efetiva (kPa), $\tan\phi^b$ é a taxa de variação de resistência ao cisalhamento com a sucção matricial, $(u_a - u_w)$, ϕ' é o ângulo de atrito efetivo (°), u_a e u_w são as poropressões de ar e água (kPa), respectivamente, na profundidade z.

Os termos da equação podem ser determinados analisando o equilíbrio vertical de forças e decompondo a força na base da fatia em termos dos componentes normal e cisalhante. O peso total de fatia pode ser determinado considerando uma condição genérica onde o peso específico do material varia ao longo da profundidade:

$$W = \beta \cos\alpha \int_0^z \gamma dz \tag{3.44}$$

onde: β é o comprimento na base da fatia (m); α é a inclinação do talude (°); e Δp é o valor da carregamento atuante na superfície da fatia (kN) devido à sobrepressão gerada pela descarga atmosférica.

Deve-se observar que a pressão externa normal ao talude foi considerada utilizando seu componente vertical. Além disso, foi considerada uma condição genérica onde o peso específico do material varia ao longo da profundidade.

A tensão normal à base da fatia é obtida considerando o componente do peso da fatia e um incremento devido pressão externa normal ao talude, Δp, como é o caso da pressão externa de ar é obtida da seguinte forma:

$$\sigma_f = \frac{N + \Delta p \beta}{\beta} = \frac{W \cos\alpha + \Delta p \beta}{\beta} = \frac{\beta \cos^2\alpha \int_0^z \gamma dz + \Delta p \beta}{\beta} = \cos^2\alpha \int_0^z \gamma dz + \Delta p \tag{3.45}$$

Finalmente, a tensão cisalhante atuando na base da fatia é dada por:

$$\tau_a = \frac{S_a}{\beta} = \frac{W \sin\alpha}{\beta} = \sin\alpha \cos\alpha \int_0^z \gamma dz \tag{3.46}$$

Tem-se, dessa forma, a seguinte equação para o fator de segurança de um talude infinito:

$$F_s = \frac{c' + (u_a - u_w)_f \tan\phi^b + \left[\cos^2\alpha \int_0^z \gamma dz + \Delta p - u_a\right]_f \tan\phi'}{\sin\alpha\cos\alpha \int_0^z \gamma dz} \tag{3.47}$$

Deve-se observar que valores de $(u_a - u_w)$ negativos não possuem significado físico. Conforme o valor de $(u_a - u_w)$ se aproxime de zero, a tensão normal líquida se torna a tensão normal efetiva, respeitando desta forma esta condição limite do estado de tensões. Na condição limite, o fator de segurança é dado pela seguinte equação:

$$F_s = \frac{c' + \left[\cos^2\alpha \int_0^z \gamma dz + \Delta p - u_w\right]_f \tan\phi'}{\sin\alpha\cos\alpha \int_0^z \gamma dz} \tag{3.48}$$

Finalmente, deve-se observar que no cálculo do fator de segurança as tensões normais líquidas ou efetivas que assumam eventuais valores negativos devem ser consideradas como tensões nulas.

A partir das equações (3.42) e (3.43) pode-se calcular o fator de segurança em função da profundidade. Neste caso, tem-se um fator de segurança crítico, correspondente ao menor valor determinado. No caso de perfis submetidos à precipitação, por exemplo, deve-se esperar que a posição que corresponda ao menor fator de segurança seja função da profundidade cujas poropressões sofreram aumento devido ao processo de infiltração de água.

Casos particulares da equação genérica aqui apresentada podem ser verificados, como uma forma de avaliar que a formulação desenvolvida é coerente com equações para casos mais simples encontradas na literatura.

No caso particular onde a pressão externa e as poropressões são desconsideradas, assumindo que o peso específico é constante e que trata-se de um solo não coesivo, tem-se:

$$F_s = \frac{\gamma z \cos^2\alpha \tan\phi'}{\gamma z \sin\alpha\cos\alpha} = \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha} \tag{3.49}$$

Neste caso particular clássico, o fator de segurança independe da profundidade avaliada.

No caso particular semelhante ao anterior, porém considerando um solo puramente coesivo, tem-se:

$$F_s = \frac{S_u}{\tau_m} = \frac{S_u}{\gamma z \sin\alpha \cos\alpha} \tag{3.50}$$

Neste caso particular o fator de segurança decresce indefinitivamente conforme aumenta a profundidade avaliada.

Finalmente, desconsiderando a pressão externa, considerando o solo completamente submerso (i.e., nível d'água na superfície do terreno, com fluxo paralelo à superfície do terreno), assumindo que o peso específico é constante e que se trata de um solo não coesivo, tem-se:

$$F_s = \frac{\left[\left(\int_0^z \gamma dz\right)\cos^2\alpha - u_w\right]_f \tan\phi'}{\left(\int_0^z \gamma dz\right)\sin\alpha\cos\alpha} = \tag{3.51}$$

$$\frac{(\gamma z \cos^2\alpha - \gamma_w z \cos^2\alpha)_f \tan\phi'}{\gamma z \sin\alpha \cos\alpha} = \frac{(\gamma - \gamma_w)_f \tan\phi'}{\gamma \tan\alpha}$$

Novamente, ao se considerar um solo não coesivo o fator de segurança se torna independente da profundidade avaliada.

CAPÍTULO 4
IMPLEMENTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DOS MODELOS DE ANÁLISE

Este capítulo tem como objetivo apresentar as ferramentas numéricas utilizadas nas análises e a validação do modelo numérico desenvolvido.

4.1. FERRAMENTAS NUMÉRICAS

As análises numéricas realizadas nesta dissertação foram realizadas com auxílio de dois programas computacionais: FlexPDE versão 6 (PDE Solutions, 2008), e Excel (Microsoft, 2013).

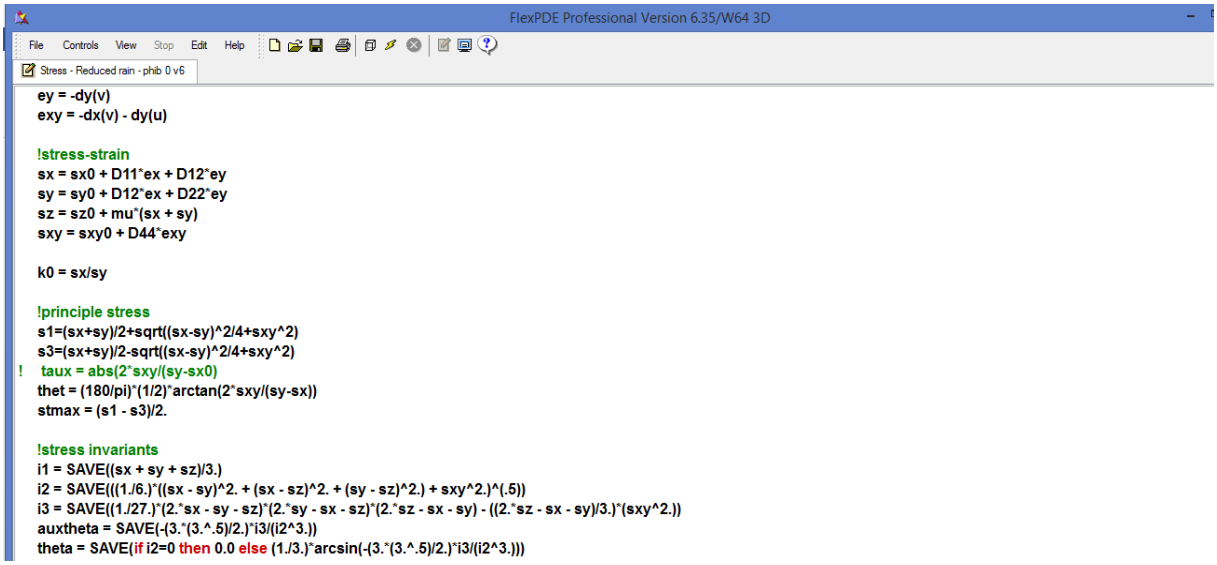
4.1.1. FlexPDE

A utilização da ferramenta numérica FlexPDE 6 é relativamente simples. O programa pode ser utilizado para resolver vários tipos de problemas, pois apresenta uma série de funções necessárias para solução de sistemas de EDP's. Por meio de um *script* desenvolvido pelo usuário (Figura 4.1a), o FlexPDE constrói um modelo elementos finitos, resolve o sistema, e apresenta os resultados de forma gráfica (Figura 4.1b). Para utilizar o programa, as equações governantes do problema físico precisam ser computadas na forma de código. Podem ser utilizadas diferentes regiões com diferentes propriedades dos materiais.

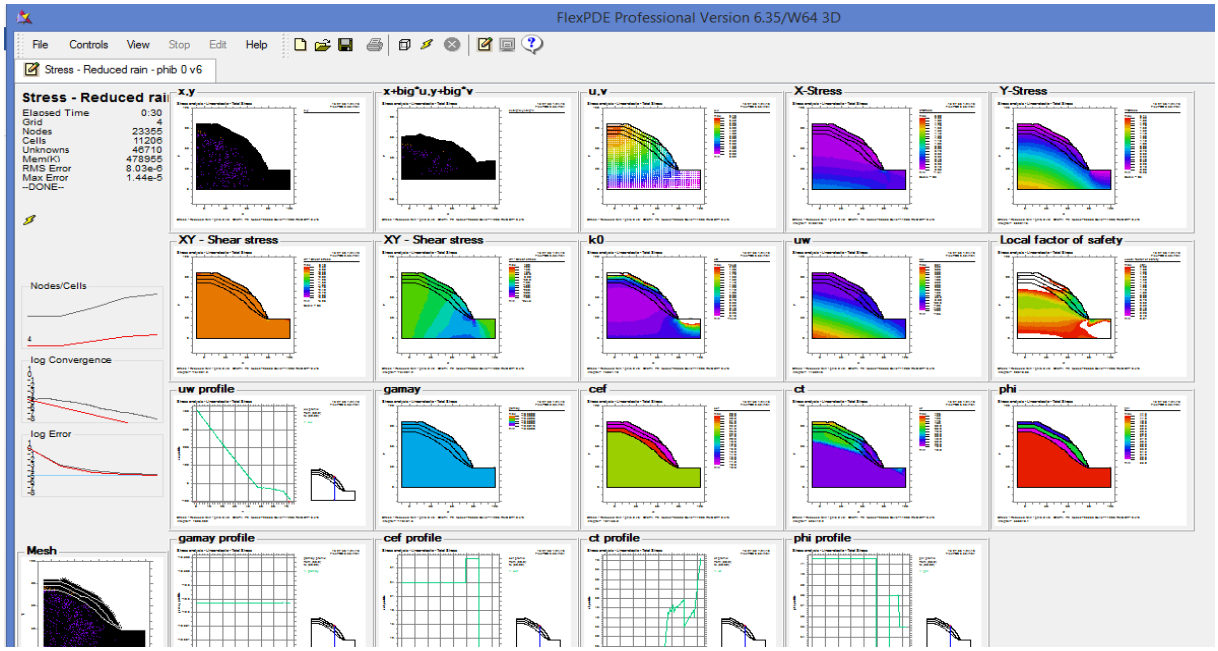
O FlexPDE resolve problemas com EDP's de primeira ou segunda ordem em eixos de coordenada cartesianas ou axi-simétricas em duas dimensões ou no sistema de coordenadas cartesianas em uma e três dimensões. Ele resolve problemas nos estados estacionário e transiente, e equações múltiplas podem ser vinculadas em um único problema. As equações diferenciais parciais podem ser lineares ou não-lineares. Sistemas não-lineares são resolvidos por meio da aplicação de um processo modificado de Newton-Raphson. Qualquer número de equações simultâneas pode ser resolvido, sujeito às limitações de processamento do computador em que o FlexPDE é executado e estas equações são resolvidas pelo método dos elementos finitos (GITIRANA JR, 2005).

Figura 4.1 – FlexPDE: (a) ambiente para edição de *scripts*; e (b) exemplos de resultados gráficos obtidos.

(a)



(b)



As equações governantes para o problema de fluxo acoplado entre água e ar foram apresentadas no Capítulo 03 desta dissertação, sendo adotado as equações de van Genuchten (1980) para previsão da CCSA (Eq. 3.19) e condutividade e hidráulica (Eq. 3.23); e a equação de Mualem (1976) para previsão da condutividade do ar (Eq. 3.24). As equações governantes para o fluxo acoplado de água e ar foram as equações 3.6 e 3.17.

As condições iniciais e de contorno serão explicadas com detalhe nos Capítulos 05 e 06, uma vez que serão realizadas diferentes análises com diferentes condições iniciais e de fronteira.

Nesta pesquisa, o FlexPDE 6 é utilizado para resolver problemas de fluxo acoplado de água e ar na condição transiente em exemplos de fluxo 1D, e nas condições estacionária e transiente em exemplos de fluxo 2D.

4.2. VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Esta seção apresenta a verificação dos modelos numéricos desenvolvidos no capítulo 03 desta dissertação. Escolheu-se um problema relativamente simples, com solução conhecida para a verificação do modelo. A validação do modelo é feita por meio de comparações com soluções obtidas usando ferramentas numéricas conhecidas.

A validação do problema unidimensional foi feita com auxílio do pacote AIR/W do programa GeoStudio (GeoSlope International, 2013), e consiste na simulação da técnica de translação de eixos. A verificação do problema bidimensional foi feita com a comparação com uma solução já apresentada no trabalho de Fredlund e Rahardjo (1993).

4.2.1. Simulação do ensaio de translação de eixos

A validação do modelo numérico para fluxo unidimensional foi feita por meio de uma simulação da técnica de translação de eixos. Escolheu-se esta simulação pois trata-se de um problema que simula a aplicação das pressões de água e ar, o que permite verificar o acoplamento do modelo. A análise, realizada por meio do programa FlexPDE versão 6, teve seu resultado comparado com os de uma análise similar feita pelo pacote AIR/W do programa GeoStudio versão 2012.

4.2.1.1. Geometria, condições inicial e de contorno

O exemplo da validação consiste em uma coluna de solo com 2 cm de altura. Por se tratar de uma análise unidimensional, a largura da coluna não influenciará nos resultados.

Com relação à condição hidráulica inicial do problema, adotou-se uma carga hidráulica de 0,2 cm na base da coluna de solo. Para condição inicial de pressões de ar adotou-se que a poropressão de ar igual à pressão atmosférica para o solo acima do nível d’água. Para o solo abaixo do nível d’água, as poropressões de ar são iguais às poropressões de água.

Com relação à condição de contorno, aplicou-se uma pressão de ar no topo da coluna, que aumentou de 0 a 100 kPa nos 60 segundos iniciais da análise, permanecendo os 100 kPa de pressão de ar aplicados durante 48 horas.

4.2.1.2. Propriedades do solo e parâmetros adotados na validação

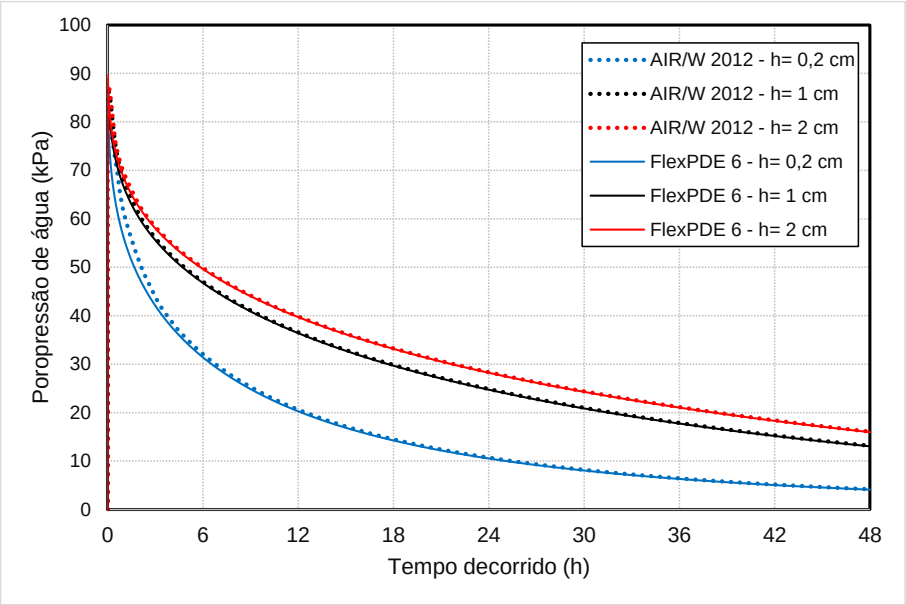
Considerou-se as propriedades hidráulicas e os parâmetros a seguir: θ_{sat}^{w} = 0,51 (m^3 m^{-3}); θ_{res}^{w} = 0,035 (m^3 m^{-3}); k_{sat}^{w} = 1x10^{-5} (m s^{-1}); k_d^a = 1x10^{-4} (m s^{-1}); α_{vg} = 0,100; n_{vg} = 2,500; m_{vg} = 0,600; e q_m = 0,500. Onde α_{vg}, n_{vg} e m_{vg} são os parâmetros de ajuste de van Genuchten (1980), e q_m é o parâmetro de ajuste usado por Mualem (1976).

4.2.1.3. Resultados da simulação da técnica de translação de eixos

Os resultados obtidos nas análises feitas pelos programas FlexPDE 6 e pelo pacote AIR/W 2012 do programa GeoStudio para o exemplo de translação de eixos convergiram, como pode ser visto pelas curvas de poropressão de água (Figura 4.2) e sucção matricial (Figura 4.3) ao longo do tempo. Portanto, conclui-se que o script implementado no FlexPDE 6 funciona bem, e o mesmo pode ser utilizado para as demais análises.

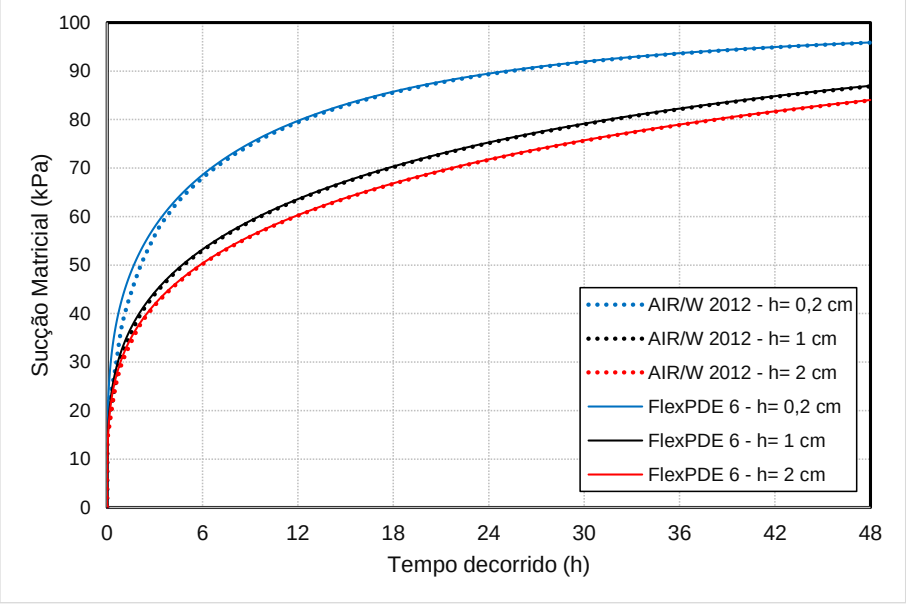
A Figura 4.2 apresenta as poropressões de água para três alturas da coluna de solo: à 0,2 cm (posição do nível d'água inicial), 1 cm (metade da coluna), e 2 cm (topo da coluna). Observa-se que quando se aumenta a poropressão de ar no topo da amostra para 100 kPa no início do ensaio também há um aumento de quase 100 kPa na poropressão de água. No entanto, enquanto a pressão de ar é mantida constante, ocorre a dissipação das poropressões de água, devido à drenagem que ocorre na base da coluna. Ao se observar as variações de sucção matricial (Figura 4.3) nota-se que a sucção matricial é maior na base da amostra durante todo o processo. Isso confirma que a drenagem ocorre pela base da coluna.

Figura 4.2- Variações da poropressão de água para diferentes cotas da amostra durante o período de análise.



Durante todo o processo as poropressões de ar são mantidas em torno de 100 kPa ao longo de toda a coluna. Isso ocorre devido à baixa permeabilidade ao fluxo de ar do material. No caso de um material com baixa permeabilidade ao fluxo de ar, por exemplo, em torno de $1x10^{-9}$ m/s, as poropressões de ar seriam menores na base da amostra, e a drenagem não ocorreria de forma tão imediata.

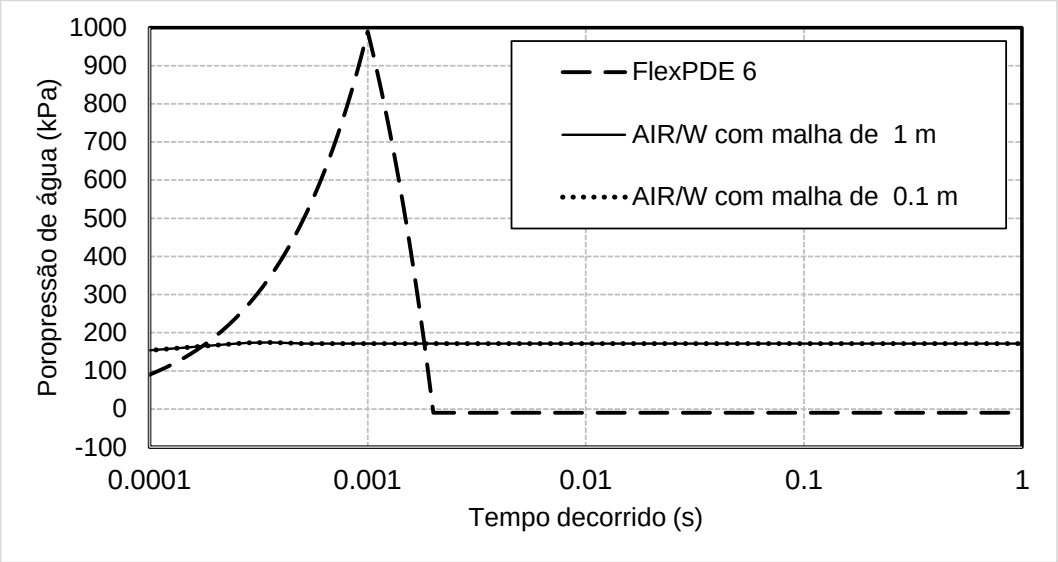
Figura 4.3 - Variações de sucção matricial para diferentes cotas da amostra durante o tempo de análise.



Apesar de a análise do AIR/W para a translação de eixos ter apresentado resultados esperados, observou-se que para análises com pulsos breves de pressão de ar o GeoStudio apresenta

dificuldades de encontrar uma solução numérica adequada. Esta dificuldade do AIR/W pode ser vista na Figura 4.4.

Figura 4.4– Comparação entre os históricos de poropressão de água no topo do terreno durante análise do efeito do ar deslocado pela descarga.



CAPÍTULO 5
O EFEITO DO PULSO DE PRESSÃO DE AR GERADO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Este capítulo estuda os efeitos do pulso de pressão de ar gerado por relâmpagos na estabilidade de taludes. A formulação desenvolvida para fluxo acoplado de água e ar será aplicada nas análises de estabilidade de taludes.

5.1. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ANALISADOS

Uma série de análises unidimensionais e bidimensionais será apresentada neste capítulo, tendo como base as características do talude de *Fung Fai Terrace*, situado em Hong Kong e estudado por Fredlund (1989), entre outros autores. A topografia de Hong Kong é acidentada, sendo comuns taludes naturais íngremes, de solos residuais. O solo é composto basicamente por rocha vulcânica decomposta (um silte) e granito decomposto (uma areia siltosa). As precipitações são elevadas e sazonais, com uma média de 2000 mm/ano, de acordo com os trabalhos de Lumb (1975), Fredlund (1989) Fredlund e Rahardjo (1993). A região é historicamente afetada por movimentos de massa e é, por isso, muito estudada.

A escolha de tal talude para o estudo de caso foi feita por dois motivos: o mesmo apresenta uma riqueza de dados relativos às propriedades hidráulicas e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo; e os dados relativos ao talude são de amplo conhecimento e foram apresentados em diversas publicações, como Fredlund e Rahardjo (1993).

Apesar deste talude real ser a inspiração para o conjunto de análises realizados, serão estudadas diversas variações nas condições de fronteira e propriedades dos materiais, de forma a permitir uma avaliação aprofundada do impacto das poropressões de ar considerando um espectro amplo de condições.

Análises de estabilidade de taludes são frequentemente realizadas considerando um domínio bidimensional, mas análises unidimensionais podem também ser desenvolvidas, considerando a condição de um talude infinito. Será apresentada uma quantidade significativa de análises unidimensionais, uma vez que tal modelagem do fenômeno é relativamente menos

demandante do ponto de vista computacional. De forma complementar, análise 2D serão apresentadas, permitindo avaliar em maior detalhe a posição dos mecanismos de rupturas produzidos.

Uma seleção criteriosa dos parâmetros e propriedades do solo considerado foi realizada. Especial atenção deve ser dada às propriedades relacionadas à permeabilidade do ar e às propriedades relacionadas à descarga atmosférica, para os quais se dispõe de escassos dados na literatura Eventuais limitações no estado de conhecimento acerca de certas propriedades e variáveis podem ser consideradas como importantes motivadores para as análises paramétricas propostas aqui.

Os dados do talude estudado foram obtidos de Chiang, Sweeney e Fredlund (1984), Fredlund (1989), e Fredlund e Rahardjo (1993). Serão apresentadas, a seguir, as características do talude.

5.1.1. Geometria, condições iniciais e de contorno

A Figura 5.1a apresenta a geometria do talude de Fung Fai Terrace. Trata-se de um perfil típico de solo residual, formado por quatro camadas de materiais: um colúvio mais próximo à superfície; uma camada de solo residual maduro, formado por um granito completamente intemperizado; um terceiro horizonte de solo residual completamente a altamente intemperizado; além de uma camada mais profunda de granito altamente intemperizado (Fredlund e Rahardjo, 1993). De acordo com Ching, Sweeney e Fredlund (1984), os taludes de solo residual de Hong Kong originados a partir de uma rocha granítica tendem a apresentar ângulo de atrito interno (ϕ') na faixa de 35 a 40°. O ângulo de atrito deste solos tende a aumentar com o aumento da massa específica e do tamanho dos grãos que formam o solo.

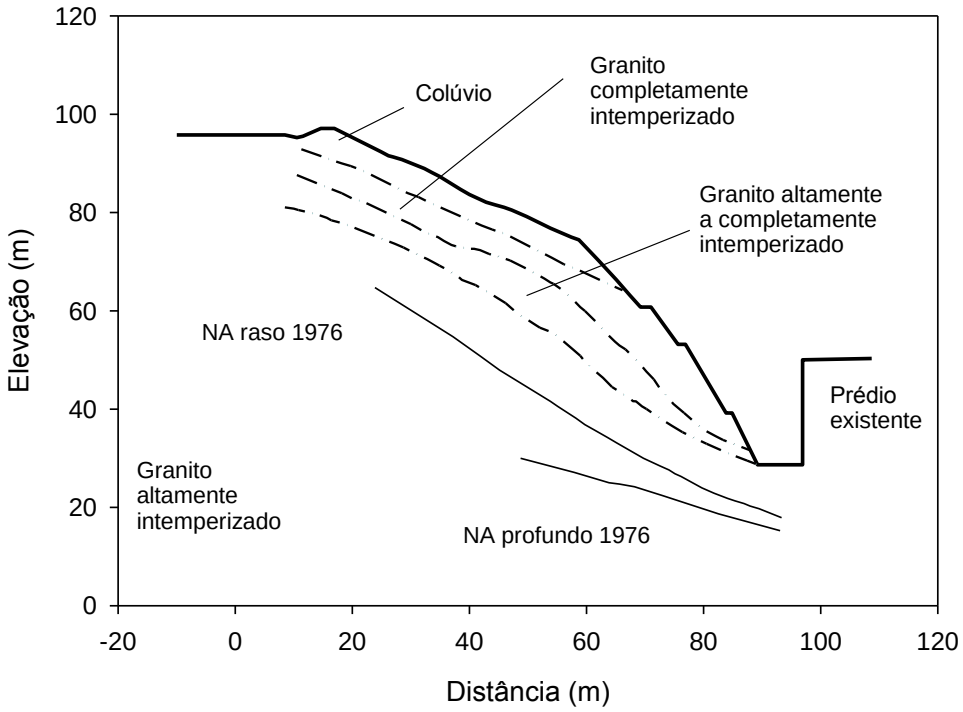
5.1.1.1. Modelo bidimensional

Adotou-se uma geometria simplificada para as análises 2D, conforme apresentado na Figura 5.1b. Uma inclinação de 40° foi considerada nas análises 2D, correspondente à inclinação média do terreno.

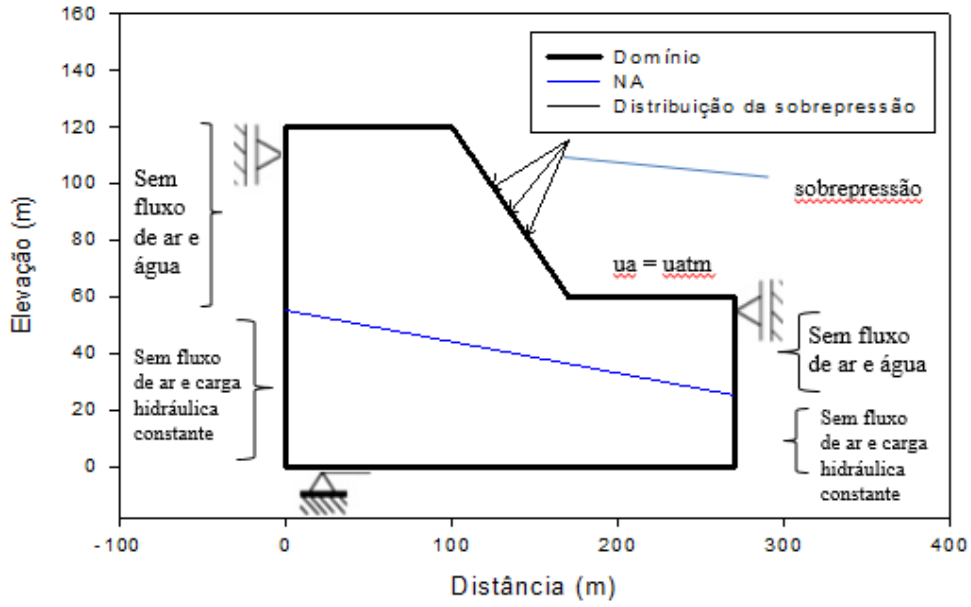
A Figura 5.2 apresenta dados referentes às medições de sucção matricial no perfil de solo apresentados por Fredlund e Rahardjo (1993). Foram medidos dados do período de março à novembro de 1980, incluindo períodos mais chuvosos e secos.

Figura 5.1- (a) Geometria original do talude de Fung Fai Terrace, Hong Kong; (b) Geometria simplificada utilizada nas análises numéricas.

(a)



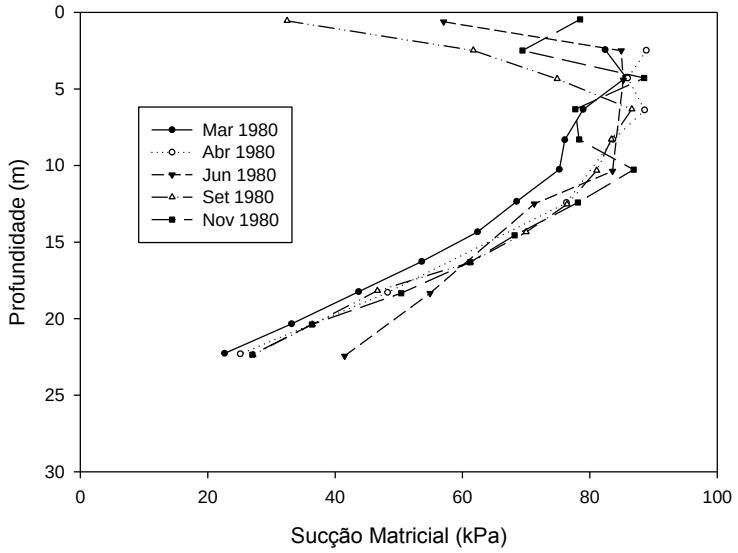
(b)



A partir destes dados, juntamente com a posição da linha freática apresentada na Figura 5.1b, foram definidas as condições iniciais seca e úmida das análises 1D e 2D. Observa-se um perfil de poropressões proporcionais à distância em relação ao nível d'água, porém com sucções que

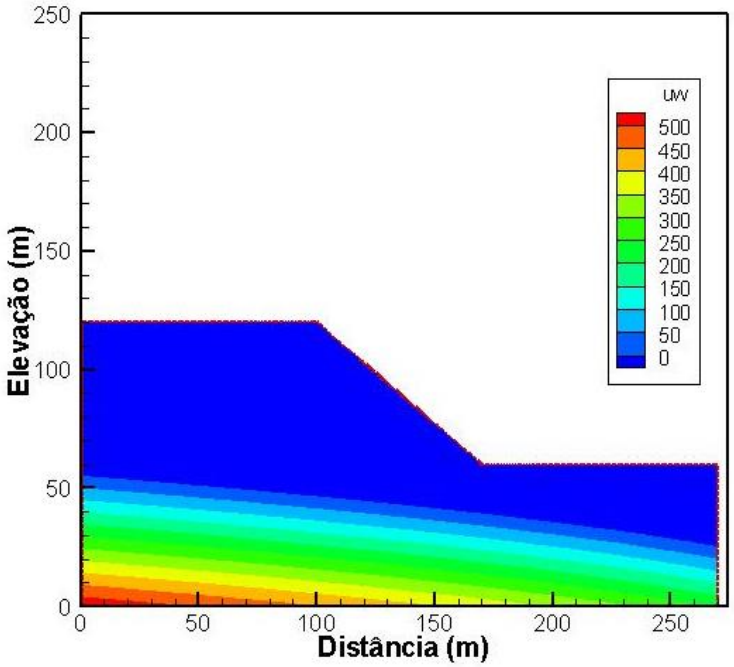
atinge um valor máximo limitado, de 70 a 90 kPa. Este valor máximo de sucção é indicativo de infiltração.

Figura 5.2 – Medições *in situ* da sucção matricial ao longo do ano de 1980 por Sweeney (1982) *apud* Fredlund e Rahardjo (1993).



A poropressão de ar inicial adotada corresponde à pressão atmosférica. Quanto às condições iniciais de poropressão de água adotadas nas análises transientes, estas foram geradas a partir de uma análise estacionária desacoplada de fluxo de água.

Figura 5.3 - Contornos de poropressões de água iniciais (valores em kPa)



Os contornos de poropressão de água apresentados na Figura 5.3 ilustram os valores adotados para as condições iniciais aplicadas na análise transiente. A linha freática está definida entre as elevações 55 m (na lateral esquerda do domínio) e 25 metros (na lateral direita do domínio). Para tal, foi empregada uma condição de carga hidráulica constante nos limites laterais do domínio, abaixo da freática e de fluxo nulo acima da freática. Os limites inferior e superior do domínio também receberam condições de fronteira de fluxo nulo.

A partir dos resultados da análise de percolação estacionária, foi aplicado um limite artificial à sucção matricial obtida. Acima do lençol freático, limitou-se a sucção matricial a um valor máximo de 50 kPa. A limitação imposta é, em parte, uma tentativa de reproduzir condições representativas daquelas apresentadas no perfil de campo da Figura 5.2. A sucção de 50 kPa corresponde à um valor inferior à sucção média de 80 kPa da estação seca e superior à mínima sucção de 30 kPa, medida no período chuvoso, representado pelos dados de abril e junho na Figura 5.2.

Uma vez estabelecida as distribuições iniciais de poropressões, estas foram empregadas na análise transiente do efeito do pulso de pressão de ar. Na análise transiente, as condições de fronteira de fluxo de água foram mantidas. A inconsistência entre as condições iniciais alteradas pela limitação da sucção e as condições de fronteira é considerada desprezível, já que a análise transiente corresponderá à um evento de curta duração, com fluxos de água reduzidos.

Com respeito às condições de fronteira para a EDP de fluxo da ar, adotou-se fluxo nulo nos limites laterais e inferior. A superfície do terreno recebeu um valor de poropressão de ar constante, correspondente à pressão atmosférica, e uma condição de pressão de ar que representa o pulso de pressão, no ponto de impacto da descarga atmosférica. Considerou-se que o ponto de impacto é definido pelas coordenadas (135, 90), correspondente ao ponto médio do talude. Assumiu-se também que as sobrepressões atuam em uma área, partindo do ponto de impacto, formando um diagrama triangular. Este diagrama triangular de pressões é definido pela pressão no ponto central e pela área de aplicação. Considerou-se uma região de influência da descarga de 20 metros nas análises realizadas, conforme ilustrado na Figura 5.1b. Quanto ao valor no ponto central, este foi representado por uma distribuição temporal com duração e valor máximo variáveis. Os diferentes cenários foram baseados em sobrepressões de pico de p_{max} = 250 e 1000 kPa, com o pico do pulso em t_{pico} = 1x10^{-3} s. Para

todas as análises, o tempo da simulação foi de 1,0 s, tempo determinado como suficiente para observação os acréscimos e posteriores dissipações das pressões de ar.

As análises de tensão total, último passo para o cálculo do fator de segurança bidimensional, foram realizadas adotando condições de fronteira nos limites laterais e inferior do domínio com restrições de deslocamento conforme ilustrado na Figura 5.1b. No topo do domínio, na região de incidência do pulso de pressão de ar, foi aplicada um carregamento externo obedecendo exatamente o padrão do pulso de pressão, sendo a carga distribuída de forma triangular e em função do tempo. A carga é aplicada em termos de tensões normais à superfície do terreno.

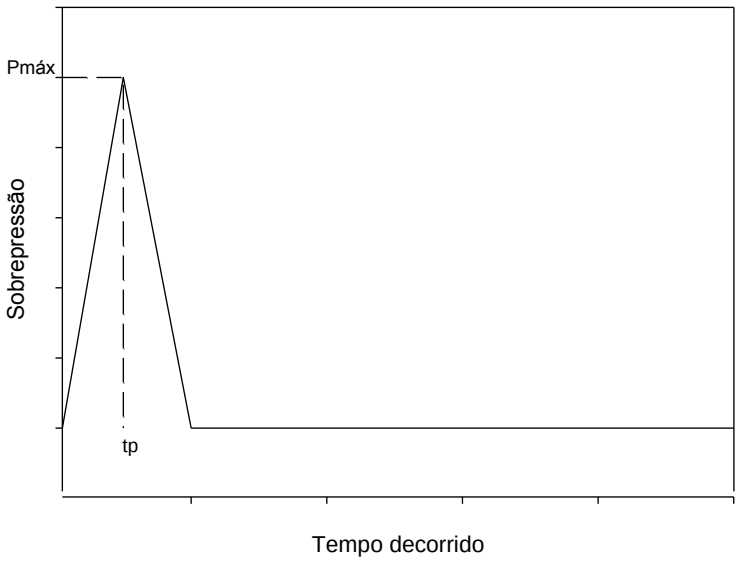
5.1.1.2. Modelo unidimensional

A representação unidimensional do talude pode ser vista como uma simplificação adequada apenas nos casos de mecanismos de ruptura com profundidade significantemente inferior à sua extensão. Com relação à geometria do problema unidimensional, considerou-se um domínio de 10 metros de profundidade. A inclinação do talude de 40°, é considerada apenas no momento do cálculo do fator de segurança, não sendo relevante na análise de fluxo de ar e água.

As condições iniciais para a fase ar são as mesmas em todos os casos das análises paramétricas, com a pressão do ar correspondendo à pressão atmosférica. Para a análise transiente, adotou-se na base do domínio uma condição de fluxo de ar nulo. Foi adotado no limite superior um valor de poropressão de ar especificado, de acordo com o pulso de pressão descrito na Figura 5.4. Foram adotados valores de pico de p_{pico} = 100, 250 e 1000 kPa, com o pico do pulso em t_{pico} = $1x10^{-6}$, $1x10^{-5}$, $1x10^{-4}$ e $1x10^{-3}$ s.

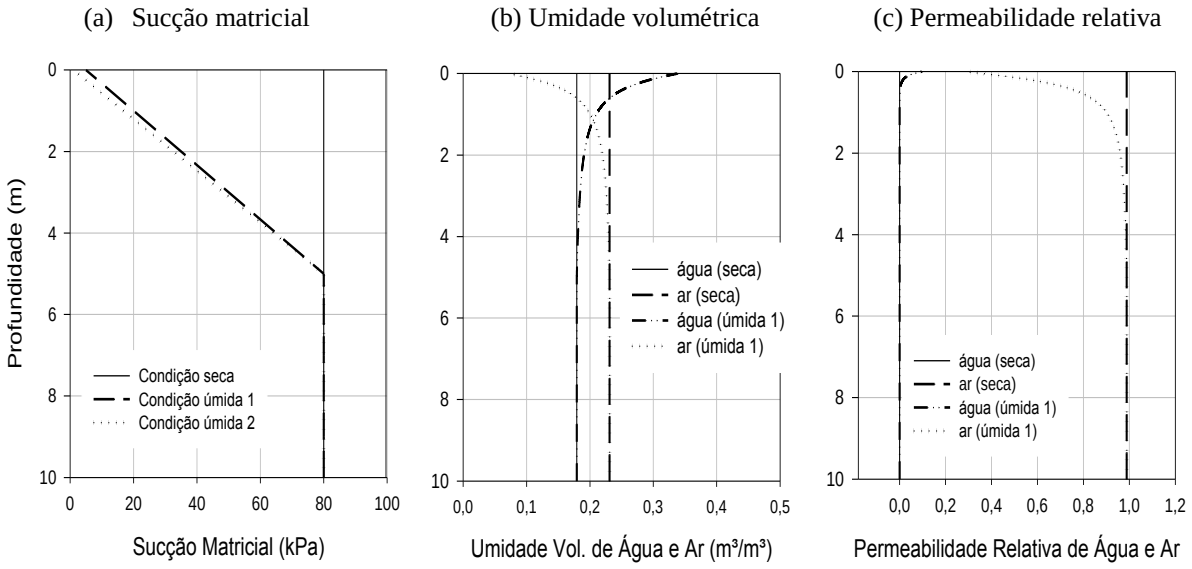
Os valores adotados para as condições de fronteira de ar e água formam diversos cenários, que serão expostos mais à frente. É importante observar a motivação para os valores adotados. Os pulsos de pressão de ar adotados possuem características que correspondem à faixa de valores reportados na literatura. Já as condições iniciais, além de serem baseadas em dados obtidos in-situ, possuem variações com objetivos específicos. A Figura 5.5c apresenta os valores de permeabilidade relativa ao ar e à água para os cenários de condição inicial. Os valores das funções de permeabilidade que deram origem a esse gráfico são apresentados na próxima seção.

Figura 5.4 – Distribuição temporal do pulso de pressão de ar.



Com relação à fase água, o perfil de poropressão negativa inicial é o apresentado na Figura 5.5a, inspirado nas faixas de valores de campo apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.5 – Perfis usados como referência nas condições iniciais.



5.1.2. Propriedades dos materiais

As propriedades hidráulicas adotadas nas análises foram baseadas em medições apresentadas nos trabalhos de Fredlund (1989) e Fredlund e Rahardjo (1993). Foram também adotadas variações para certas propriedades, com base em dados típicos de outros materiais.

Os valores de condutividade hidráulica saturada adotados tanto na análise 1D quanto na 2D variam entre $1x10^{-6}$ e $1x10^{-5}$ m/s. Tais valores foram escolhidos por se tratarem de valores próximos aos valores reportados por Fredlund e Rahardjo (1993). O colúvio e o granito completamente intemperizado possuem permeabilidades à água de $3{,}0x10^{-5}$ e $7{,}0x10^{-6}$, respectivamente. Além disso, é importante ressaltar que a faixa de valores adotados é típica para solos residuais maduros, como pode ser observado em diversos trabalhos, como Fredlund e Rahardjo (1993); Gerscovich (1994); Ng e Shi (1998); Mendes (2008); Correia *et al*. (2011); Leão Carvalho (2013); Coutinho, Silva e Severo (2013); e, Oh e Lu (2015).

Com relação à permeabilidade ao ar do solo no estado seco, k_d, necessária para o cálculo da função de permeabilidade ao ar, não foram encontrados dados experimentais na literatura para os solos do talude estudado. Desta forma, foram adotadas faixas de valores, estabelecidos considerando a permeabilidade do mesmo solo à água, como parâmetro referência. Autores como Ba-Te (2004) consideram a menor viscosidade dinâmica do ar e recomendam que a razão k_d/k_{sat} pode ser maior do que 1,0. Desta forma, valores de k_d serão variados, sempre com base nessas recomendações e atrelados ao valor de k_{sat} adotado em um dado cenário.

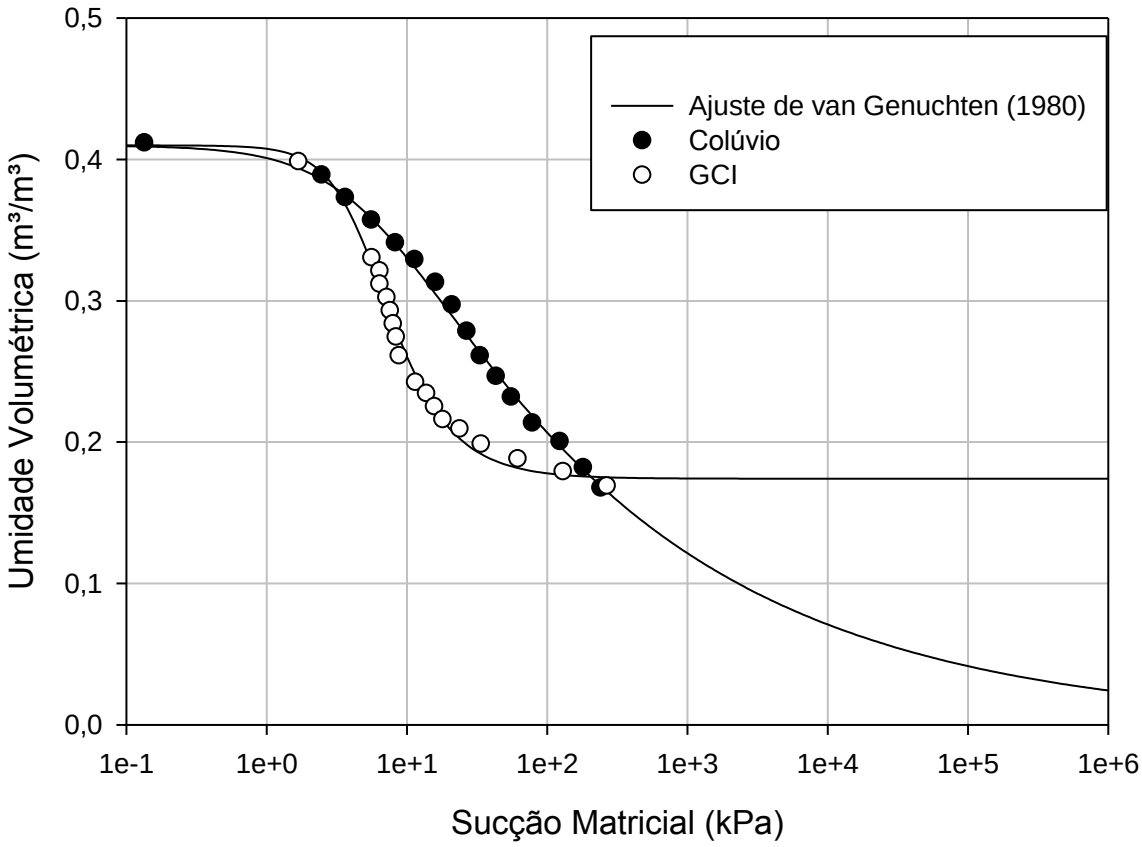
Com relação às curvas características solo-água adotadas, foram consideradas curvas medidas para os materiais do talude de Fung Fai Terrace. Para os solos constituintes do talude, os trabalhos de Fredlund (1989) e Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam curvas para o colúvio e o granito completamente intemperizado (GCI), que são os materiais mais superficiais e de interesse

A Figura 5.6 apresenta as CCSAs medidas e as funções de permeabilidade calculadas pelo método de Van Genuchten – Mualen, para o colúvio e o granito completamente intemperizado (GCI). Pode-se verificar que se tratam de materiais relativamente semelhantes, apesar do colúvio apresentar desaturação mais gradual. Devido à semelhança entre os dois materiais, foi adotada a CCSA do colúvio, para o domínio como um todo.

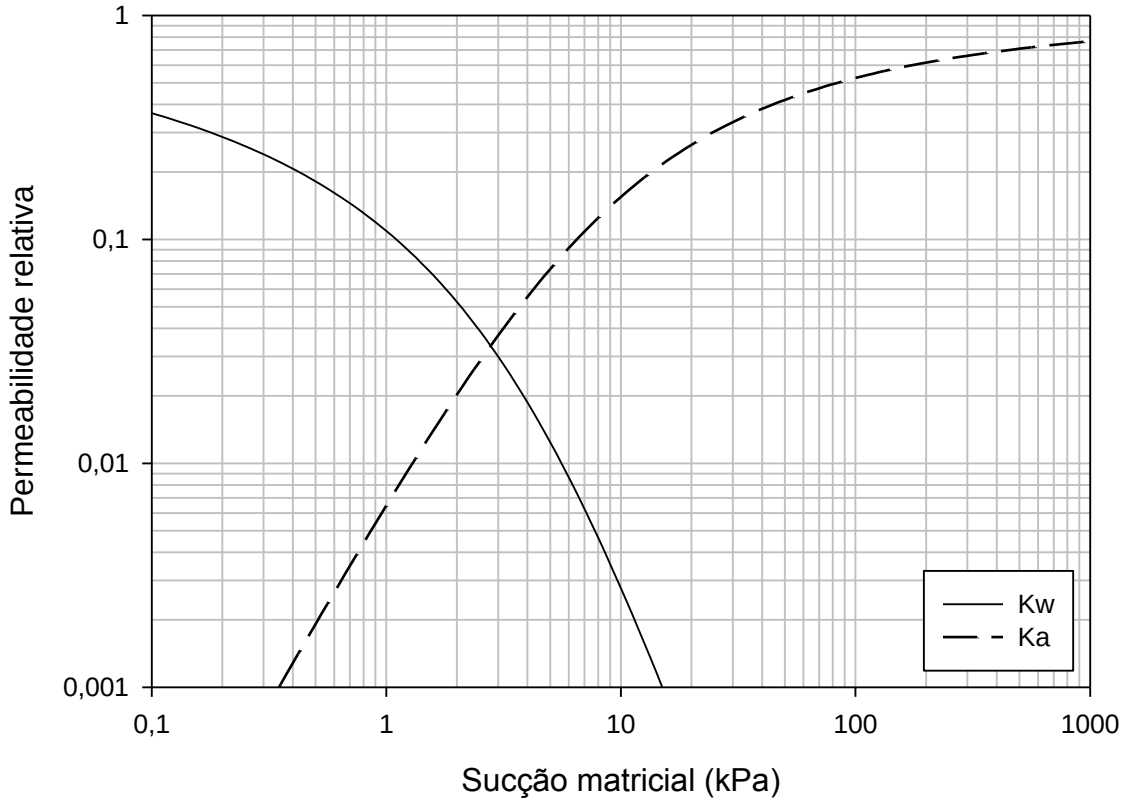
Os pontos experimentais foram ajustados por meio da equação de van Genuchten (1980) tanto para representação da CCSA, quanto para o cálculo das funções de condutividade ao ar e à água. Os parâmetros obtidos foram θ_{sat} = 0,410, θ_{res} = 0,00 α_{vg} = 0,185, n_{vg} = 1,233 e m_{vg} = 0,189. A Figura 5.6b apresenta as funções obtidas.

Figura 5.6 - Propriedades hidráulicas dos solos estudados: (a) CCSA; e (b) Curvas de permeabilidade.

(a)



(b)



Para a resistência ao cisalhamento do solo, necessária para a avaliação do fator de segurança, foram adotados os valores do colúvio, reportados por Fredlund e Rahardjo (1993). O material possui uma coesão efetiva de 10 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 35º. O ângulo de atrito com respeito à sucção matricial adotado foi 23,33º, correspondendo à 2/3 do valor do ângulo de atrito efetivo.

Finalmente, para a geração do estado de tensões foi considerado o peso específico do colúvio, de 19,6 kN/m^3. As tensões in-situ foram geradas considerando o peso próprio do material e o carregamento externo correspondente ao pulso de sobrepressão. Para geração das tensões foi adotado, por simplicidade, o modelo elástico linear, com módulo de elasticidade de 10 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

5.1.3. Sumário de casos propostos

Realizou-se uma série de análises paramétricas, totalizando 60 casos diferentes nas análises unidimensionais e cinco nas análises bidimensionais, onde foram analisadas as influências da permeabilidade do solo ao fluxo de água e ar, da condição inicial do solo, da magnitude da sobrepressão e da duração do pulso de sobrepressão.

Os 60 casos da análise 1D foram divididos em cinco grupos (A, B, C, D, E). Cada grupo contém 12 casos diferentes, sendo que todos os casos de determinado grupo apresentam as mesmas propriedades hidráulicas, porém diferentes propriedades relativas ao pulso de sobrepressão. A Tabela 5.1 apresenta o valor considerado paras propriedades hidráulicas do solo em cada caso.

Em todos os casos a condutividade ao ar no solo seco, k_d, é dependente da permeabilidade saturada, como observa-se na Tabela 5.1. Para os conjuntos de casos A, B e D, adotou-se que k_d é igual à k_{sat}, no conjunto C considerou-se uma razão k_d/k_{sat} igual a 10, e no conjunto E esta razão é igual a 100. Realizou-se uma série de análises paramétricas, totalizando 60 casos diferentes nas análises unidimensionais e cinco nas análises bidimensionais, onde foram analisadas as influências da permeabilidade do solo ao fluxo de água e ar, da condição inicial do solo, da magnitude da sobrepressão e da duração do pulso de sobrepressão uma razão igual a 100.

Com relação às propriedades relacionadas ao pulso de pressão gerado pela descarga atmosférica, três diferentes valores de sobrepressão máxima foram adotados (100, 250 e 1000 kPa), enquanto que quatro valores diferentes para a duração do pulso de tempo foram considerados, como pode ser visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Propriedades hidráulicas adotadas em cada caso das análises paramétricas.

Casos	**k_{sat} (m/s)**	**k_d (m/s)**	**Poropressão inicial**
A1-A12	$1x10^{-6}$	$1x10^{-6}$	Solo seco
B1-B12	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	Solo seco
C1-C12	$1x10^{-5}$	$1x10^{-4}$	Solo seco
D1-D12	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	Solo úmido
E1-E12	$1x10^{-5}$	$1x10^{-3}$	Solo seco

Tabela 5.2 – Propriedades da descarga atmosférica adotadas nas análises paramétricas.

Casos (A, B, C, D e E)	Duração do pulso de tempo (s)	Sobrepressão (kPa)
1	$1x10^{-6}$	100
2	$1x10^{-6}$	250
3	$1x10^{-6}$	1000
4	$1x10^{-5}$	100
5	$1x10^{-5}$	250
6	$1x10^{-5}$	1000
7	$1x10^{-4}$	100
8	$1x10^{-4}$	250
9	$1x10^{-4}$	1000
10	$1x10^{-3}$	100
11	$1x10^{-3}$	250
12	$1x10^{-3}$	1000

Para as análises bidimensionais foram realizados dois conjuntos de análises diferentes no estudo paramétrico com $P_{máx}$ = 250 e 1000 kPa. Para ambas as situações, foi adotado k_{sat} = $3x10^{-5}$ m s^{-1}, k_d/k_{sat} = 10 e tpico = $1x10^{-3}$ s. A região do pulso foi aplicada ao longo de um comprimento de 20 m, em um diagrama triangular, conforme explicado anteriormente e mostrado na Figura 5.1b.

5.2. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA UNIDIMENSIONAL

Esta seção apresenta os resultados obtidos na análise paramétrica unidimensional.

5.2.1.1. Comportamento transiente típico

O padrão de evolução das poropressões de ar, água, sucção e conteúdo volumétrico de água e ar ao longo do tempo e espaço é similar para todos os cenários analisados. Os resultados obtidos para os diferentes cenários diferem entre si com respeito à amplitude de variação das poropressões e com relação à profundidade afetada, conforme será mostrado nas seções seguintes.

A Figura 5.7 apresenta um exemplo típico de evolução das poropressões de ar. Nos perfis de poropressão de ar para diferentes tempos da análise (figura 5.7**Erro! Fonte de referência não encontrada.**a) observa-se o efeito do pulso de sobrepressão de ar ao longo do tempo, que chega a atingir um valor próximo a 75 kPa à 10 cm de profundidade (t = 0,002 s) e 30 kPa à 20 cm de profundidade (t = 0,004 s). Estes acréscimos podem sugerir que ocorre um acréscimo de sucção matricial simultaneamente, mas não é isso que acontece. Para todos os instantes analisados a sucção matricial permanece constante com um valor igual ao inicial. Conforme foi verificado, os acréscimos de poropressão de água são idênticos aos acréscimos de poropressão de ar, não havendo drenagem da água nos poros do solo. A condição de não drenagem da água nos poros durante o evento de pulso de pressão de ar é justificada pelo intervalo de tempo breve, quando comparada com a permeabilidade ao fluxo de água. Em síntese, é correto afirmar que, para todos os cenários analisados, o exame dos valores de poropressão de ar é suficiente para a interpretação do fenômeno unidimensional.

A Figura 5.8 apresenta os erros de balanço de massa resultantes da solução das EDPs ao longo do tempo, para alguns casos analisados. O erro foi determinado comparando o balanço de massa obtido pelos fluxos nas fronteiras com o balanço de massa obtido pela integral da massa armazenada no domínio. Todos os casos observados apresentam erros desprezíveis. Pode-se observar, também, que os erros de balanço de massa aumentam com o aumento da duração do pulso de tempo. Os erros relativos ao equilíbrio das equações relativas à fase ar também foram bastante reduzidos, de modo que pode-se concluir que o modelo numérico atende à esse critério de verificação de qualidade da solução.

Figura 5.7 - Curvas ao longo do tempo relacionadas ao caso C11: (a) perfis de poropressão de ar (b) histórico de poropressão de água (c) perfis de poropressão de água (d) histórico de poropressão de água (e) perfis de sucção matricial

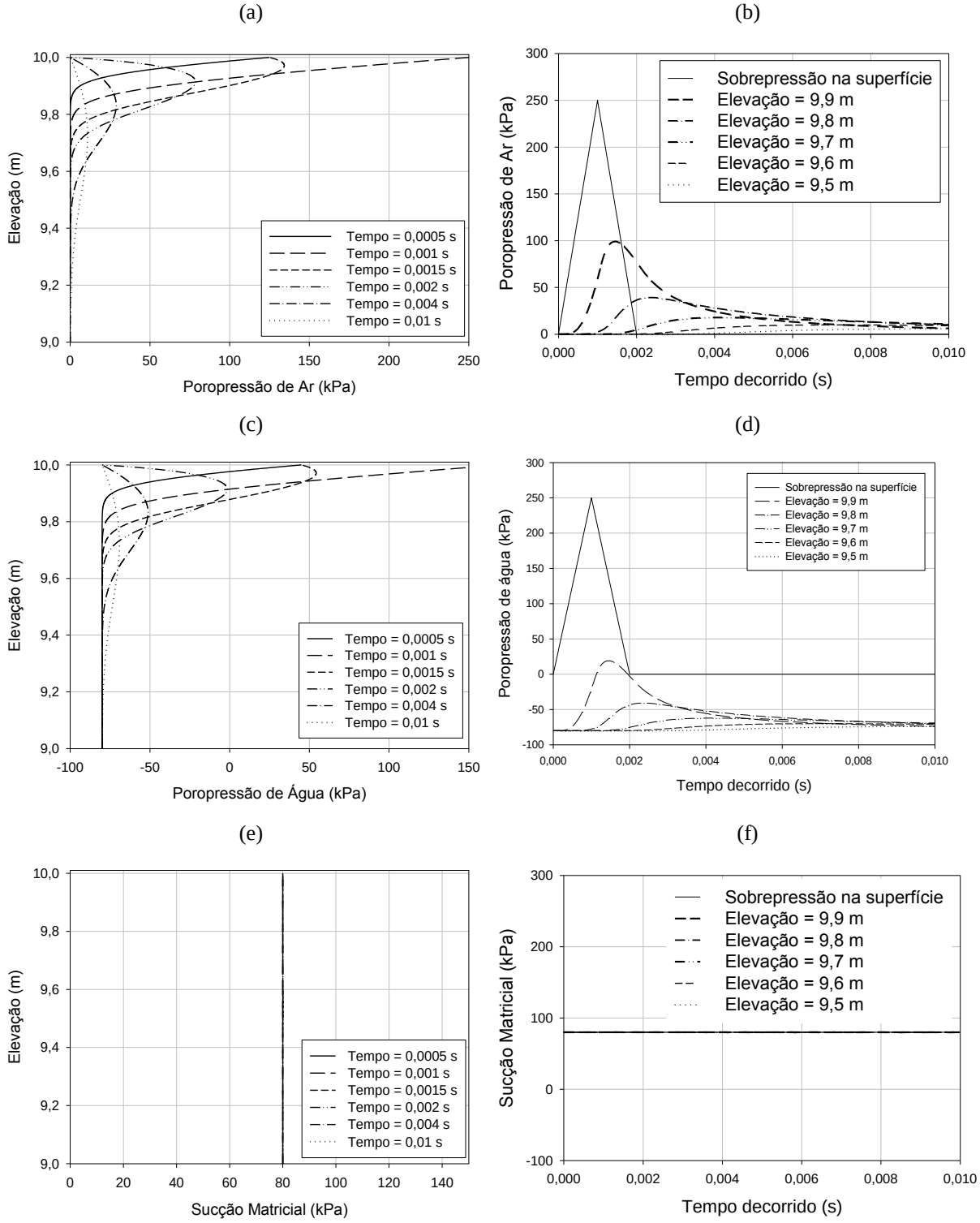
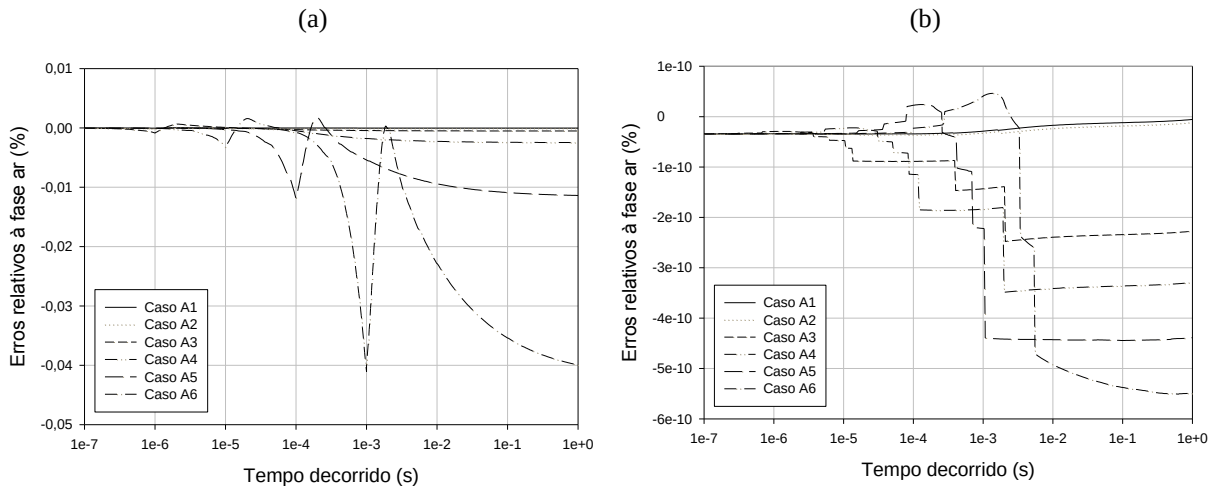


Figura 5.8 - Verificação dos erros relativos a EDP para o fluxo de água.



5.2.1.2. Influência das características do pulso de pressão nas poropressões de ar no solo

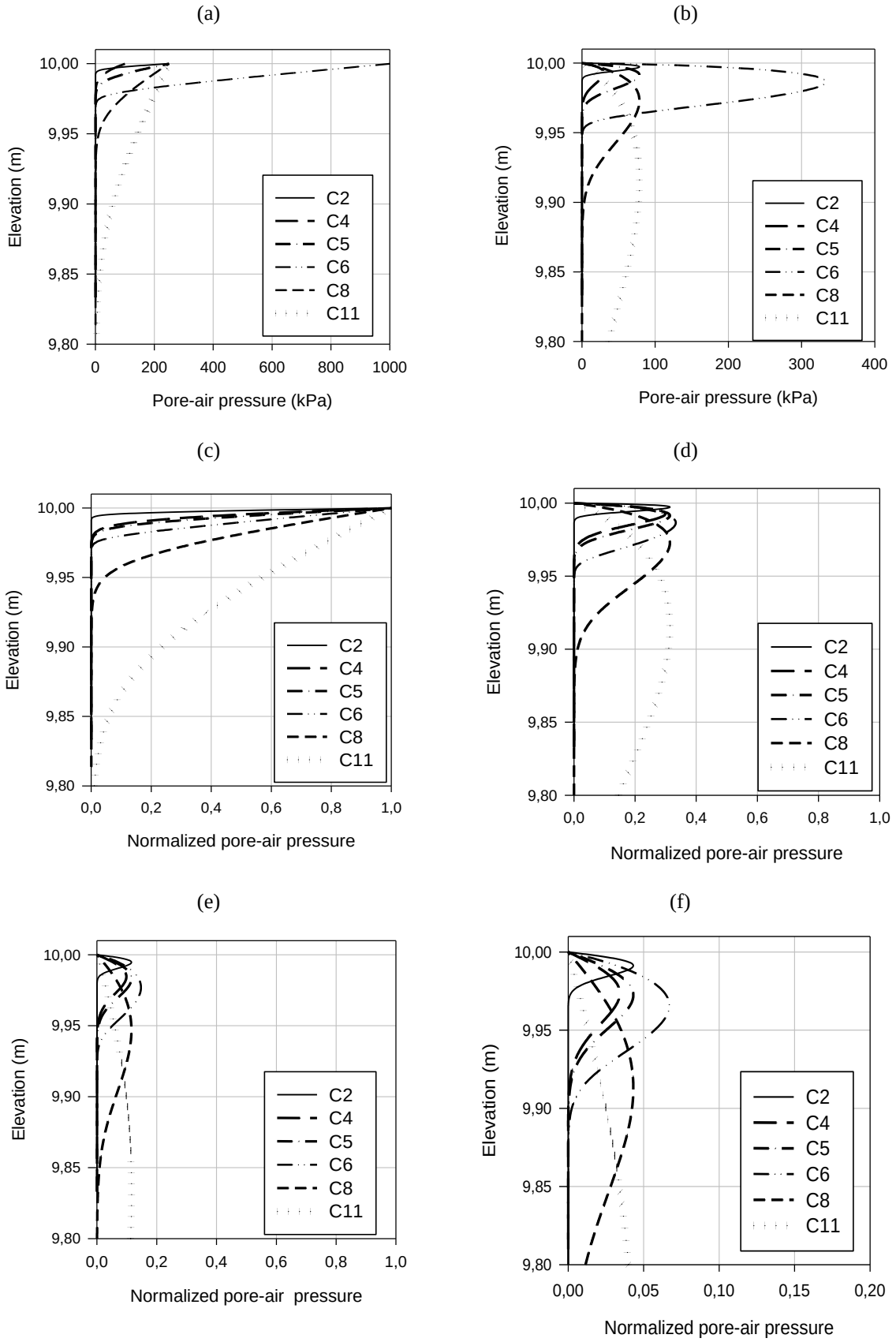
A Figura 5.9 mostra a influência da duração do pulso de tempo (tp) no fluxo de ar no solo. Os perfis de poropressão de ar são apresentados em diferentes instantes da análise para um conjunto de seis casos com as mesmas propriedades de solo (C2, C4, C5, C6, C8 E C11). As Figuras 5.9a e 5.9b apresentam perfis de poropressão de ar para instantes iguais a tp e $2tp$, enquanto as Figuras 5.9c a 5.9f apresentam perfis de poropressões de ar normalizadas pela sobrepressão máxima, $P_{\max}$, para os instantes tp, $2tp$, $10tp$ e $100tp$, respectivamente.

De acordo com as Figuras 5.9d a 5.9f, nota-se que independentemente da duração do pulso de tempo, em cada caso, para o mesmo instante, o valor máximo da poropressão de ar normalizada é aproximadamente o mesmo, ou seja, os picos das curvas coincidem.

A comparação dos casos C4, C5 e C6 permite avaliar a sensibilidade do avanço da frente de aumento de pressão de ar ao valor máximo de pressão do pulso aplicado. Percebe-se que tanto as magnitudes quanto a velocidade de propagação são afetadas, como esperado. No entanto, as magnitudes dos valores de poropressão são muito mais afetadas, sendo o pulso de 1000 kPa responsável por elevadas flutuações no maciço.

A comparação dos casos C2, C5, C8 e C11 revela que a duração do pulso de pressão é o fator mais importante, determinante da profundidade afetada pelos acréscimos de pressão de ar. Com relação à influência da duração do pulso de tempo, nota-se que quando maior a duração do pulso, maior será o avanço das sobrepressões no perfil de solo, e consequentemente, maior

Figura 5.9 - Perfis de poropressão de ar para (a) t = tp; (b) t = 2tp; e perfis de poropressão de ar normalizada para (c) t = tp; (d) t = 2tp; (e) t = 10tp; e (f) t = 100tp.

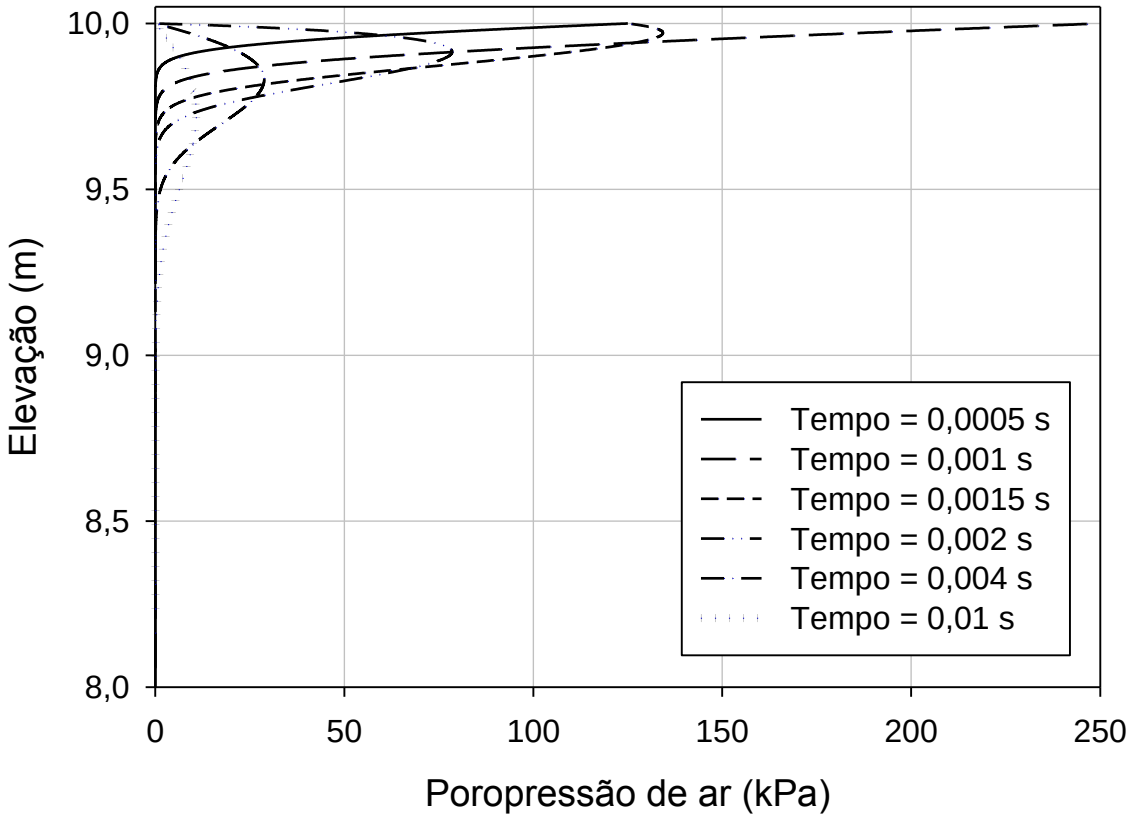


será o aumento das poropressões de ar, que por sua vez, implicam na diminuição das tensões líquidas, e consequentemente, do fator de segurança. Analogamente, no caso C2, com duração do pulso de tempo de $1x10^{-6}$ s, o avanço da sobrepressões é limitado aos três centímetros iniciais do perfil de solo.

Para o conjunto de propriedades analisadas, um pulso de $1x10^{-6}$ s tem o efeito limitado a poucos centímetros, enquanto que o pulso mais longo, de $1x10^{-3}$ s resulta em maiores profundidades afetadas. A Figura 5.10 apresenta apenas o caso C11, mas agora até a profundidade de 8 m. Pode-se observar que certos cenários, produzidos por múltiplas condições favoráveis, resultam e significativas profundidades afetadas.

Desta forma, pode-se dizer que a susceptibilidade de um maciço a efeitos de acréscimo de pressão produzido por uma descarga atmosférica é altamente sensível às características do pulso. Constata-se, também, a importância do estudo das características dos impactos físicos na atmosfera das descargas elétricas. Quanto mais bem determinadas a duração e amplitude do pulso de sobrepressão, melhor será a avaliação do impacto do pulso nas poropressões de maciços.

Figura 5.10 – Perfil de poropressão de ar para o caso C11



5.2.1.3. Influência da permeabilidade do solo nas poropressões de ar

Quatro combinações de permeabilidades k_{sat} e k_d foram adotadas nas análises paramétricas, conforme apresentado na Tabela 5.2. A Figura 5.11 apresenta curvas com os perfis de poropressão de ar normalizada para oito casos, agrupados em função das características das descargas atmosféricas. Os casos comparados apresentam as mesmas condições relativas às descargas atmosféricas, e mesmas condições iniciais de sucção matricial, porém, diferentes permeabilidades.

A Figura 5.11 mostra que a relação entre as permeabilidades ao ar e à água é importante, determinando o avanço e a magnitude das sobrepressões no perfil de solo.

Observa-se, por exemplo, que para o caso A8, com ambas a permeabilidades máximas iguais a $1x10^{-6}$ m s^{-1}, quase não ocorre o avanço das sobrepresssões no perfil de solo, de modo que este avanço ocorre em torno dos dois centímetros iniciais. Comparando-se os casos A8 e B8 (k_{sat} e k_d iguais a $1x10^{-5}$ m s^{-1}), observa-se que em B8, onde a permeabilidade é maior, o avanço das sobrepressões é maior, em torno dos 5 centímetros iniciais.

A medida que se aumenta a diferença entre k_d e k_{sat} (casos C8 e E8), o avanço de sobrepressões passam a ser mais significativos, como esperado. No caso C8, por exemplo, o avanço da sobrepressão atinge os 15 centímetros iniciais (Figura 5.11). No Caso E8, esse avanço de pressões chega a atingir os 30 centímetros iniciais do perfil do solo (Figura 5.11c). No pulso com pressão e duração maior, dos casos C12 e E12, por exemplo, se propagam até profundidades de 40 cm e 1,50 metros, respectivamente.

A Figura 5.12 apresenta um histórico do valor das poropressões de ar dos casos A8, B8, C8 e E8 ao longo do tempo, para duas profundidades diferentes, onde a poropressão de ar pode aumentar até 100 kPa (Caso E8).

Observa-se também que em uma profundidade de 20 cm abaixo do nível do terreno (Figura 5.12a), esse acréscimo de pressão de ar chega a 100 kPa para o caso mais favorável à ruptura (E8). A propagação da pressão de ar é mais significativa no caso do pulso com maior duração e maior pressão. Para 80 cm de profundidade, por exemplo, a pressão chega a 40 kPa.

Novamente, tais aumentos de poropressão de ar resultam em uma igual redução da tensão líquida, que por sua vez, reduz o fator de segurança.

Figura 5.11- Perfis de poropressão de ar para (a) tp = 1x10-4, Pmax = 250 kPa e t = tp; (b) tp = 1x10-4, Pmax = 250 kPa e t = 2tp; (c) tp = 1x10-3, pmax = 1000 kPa e t = tp; e (d) tp = 1x10-3, pmax = 1000 kPa e t = 2tp.

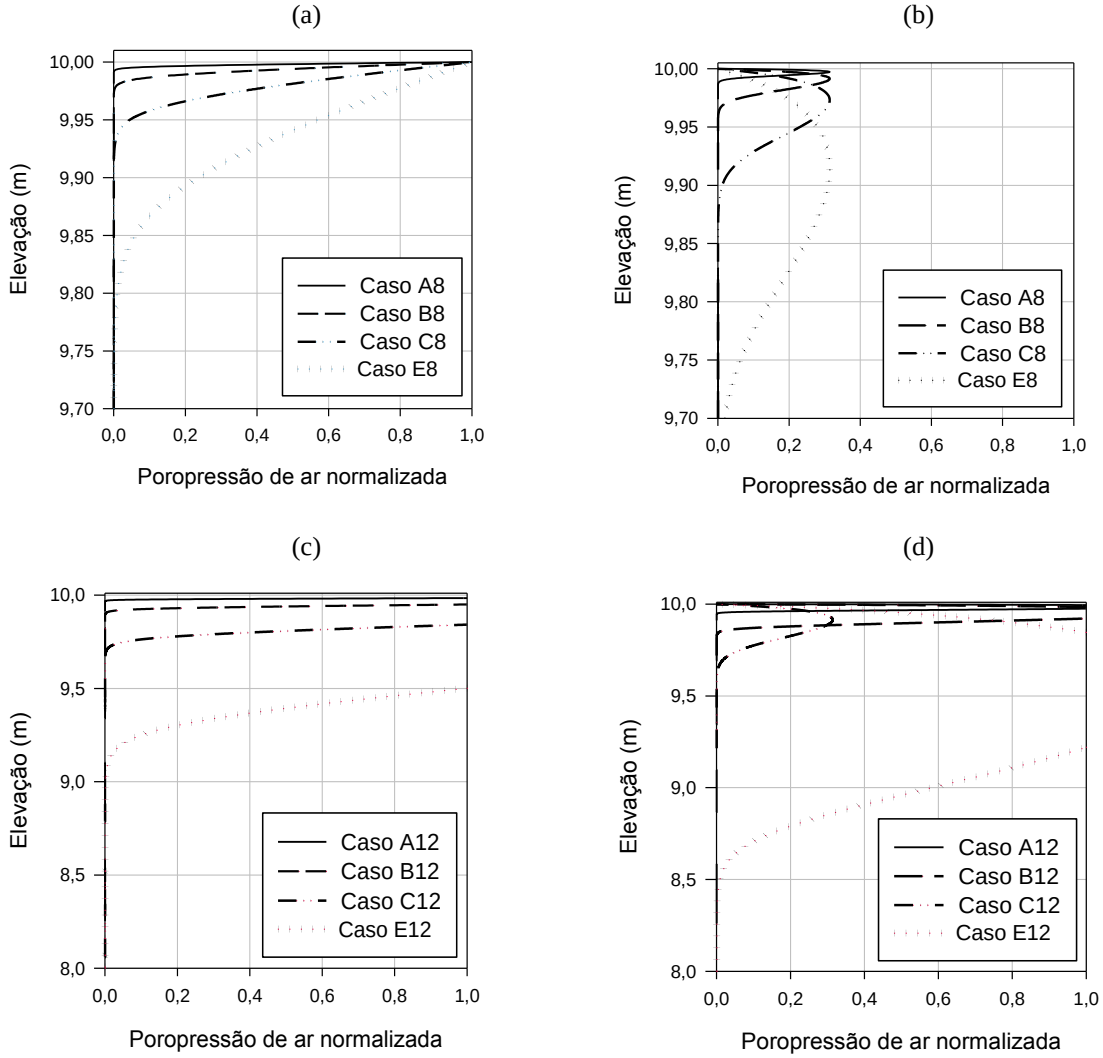
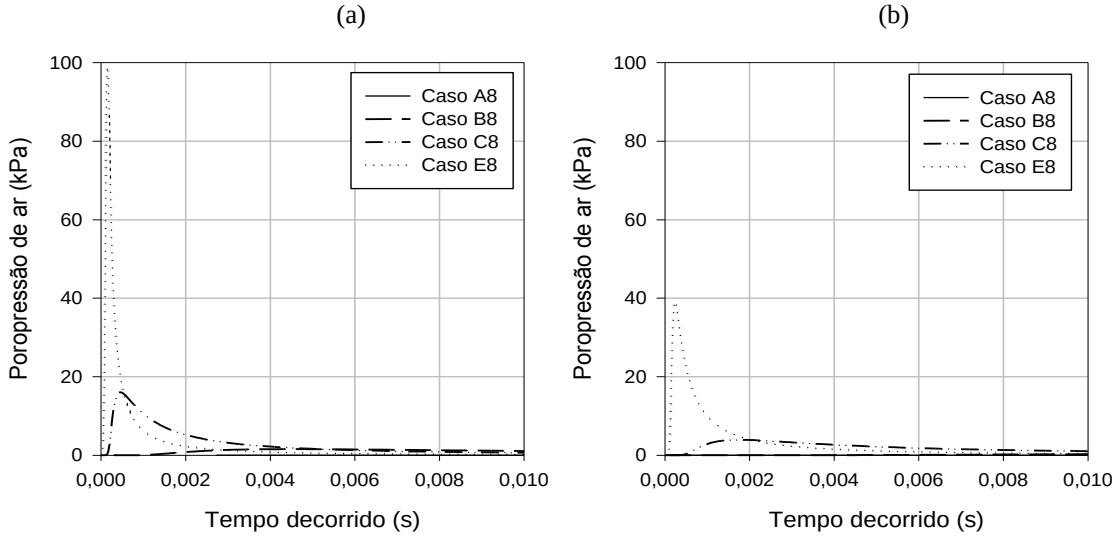


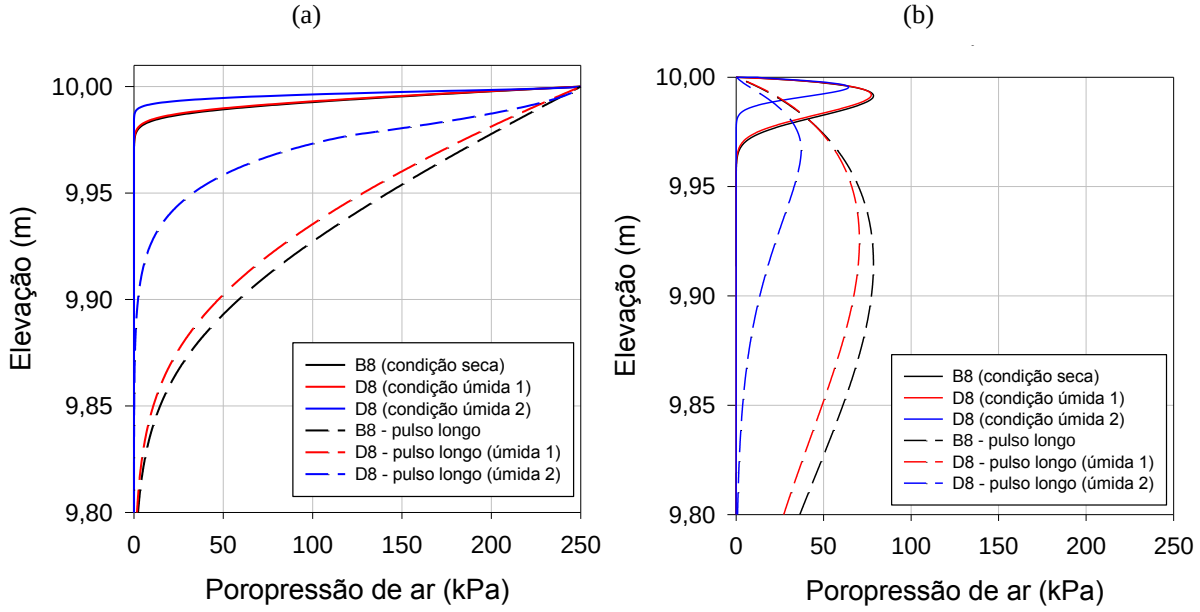
Figura 5.12 – Histórico de poropressão de ar ao longo da análise paras elevações de (a) 9,8 metros e (b) 9,2 metros.



5.2.1.4. Influência da condição inicial de sucção matricial nas poropressões de ar

A Figura 5.13 apresenta perfis de poropressão de ar para dois casos diferentes (B8 e D8), onde a única diferença entre ambos é a condição inicial para sucção matricial, que podem ser visualizados como condições *seca*, *úmida 1* e úmida 2. O objetivo desses cenários é avaliar se o maior grau de saturação na superfície, condição esperada após eventos de precipitação, pode resultar em uma atenuação significante do efeito do pulso de pressão. É importante ressaltar que a condição úmida 1, com uma baixa sucção de 5 kPa mantida na superfície do terreno, é mais comum. Gitirana Jr. (2005) demonstra que apenas precipitações com taxas significantemente maiores que a permeabilidade à água do solo saturado conseguem reduzir a poropressão na superfície a zero, sendo mais comum durante evento de precipitação não extrema a manutenção de um valor de sucção que corresponde exatamente ao valor de entrada de ar.

Figura 5.13 – Perfis de poropressão de ar para casos com diferentes condições iniciais de sucção matricial para (a) t = tp; e (b) t =2tp



Os resultados obtidos permitem observar que ambos as condições seca e úmida 1 apresentam curvas muito próximas. Isso pode ser explicado pelo fato de que a condição *úmida 1*, apesar de corresponder à uma sucção próxima do valor de entrada de ar, mantém um grau de saturação ligeiramente abaixo de 100%. Mesmo com valores significantemente elevados de grau de saturação, a permeabilidade ao fluxo de ar obtida pelo método de van Genuchten –

Mualem se mantém relativamente elevada, permitindo um avanço significativo as poropressões de ar.

Além do conjunto de 60 casos que formam as análises paramétricas, um conjunto com quatro casos adicionais foram executados com o objetivo de melhor retratar a influência da condição de sucção matricial inicial. Estes casos apresentam duas modificações: um pulso de tempo maior (0,01 s), que possibilita a drenagem da água no solo; e um novo perfil de sucção matricial (condição úmida 2), cuja a sucção matricial no nível do terreno é 1 kPa (isto é, menor que o valor de entrada de ar). Os casos B8 e D8 foram usadas como modelo para as análises.

Quando se compara as curvas de poropressão de ar com as curvas análogas para o pulso mais longo nota-se a diferença entre os casos B8 (condição *seca*) e D8 (condição *úmida 1*). Além do maior avanço da sobrepressão, que é esperado quando se aumenta a duração do pulso, observa-se que quando maior é a quantidade de água no solo, menor é o avanço da sobrepressão, ou seja, menor é o acréscimo de poropressão de ar. Essa diferença é ainda mais significativa quando se observa as curvas referentes à condição *úmida 2*, onde a sucção matricial na superfície do terreno é menor que o valor de entrada de ar. Em síntese, foi verificado que durante eventos de precipitação extrema, as encostas podem ser menos suscetíveis ao efeito do pulso de pressão da ar

5.2.1.5. Análise de estabilidade unidimensional

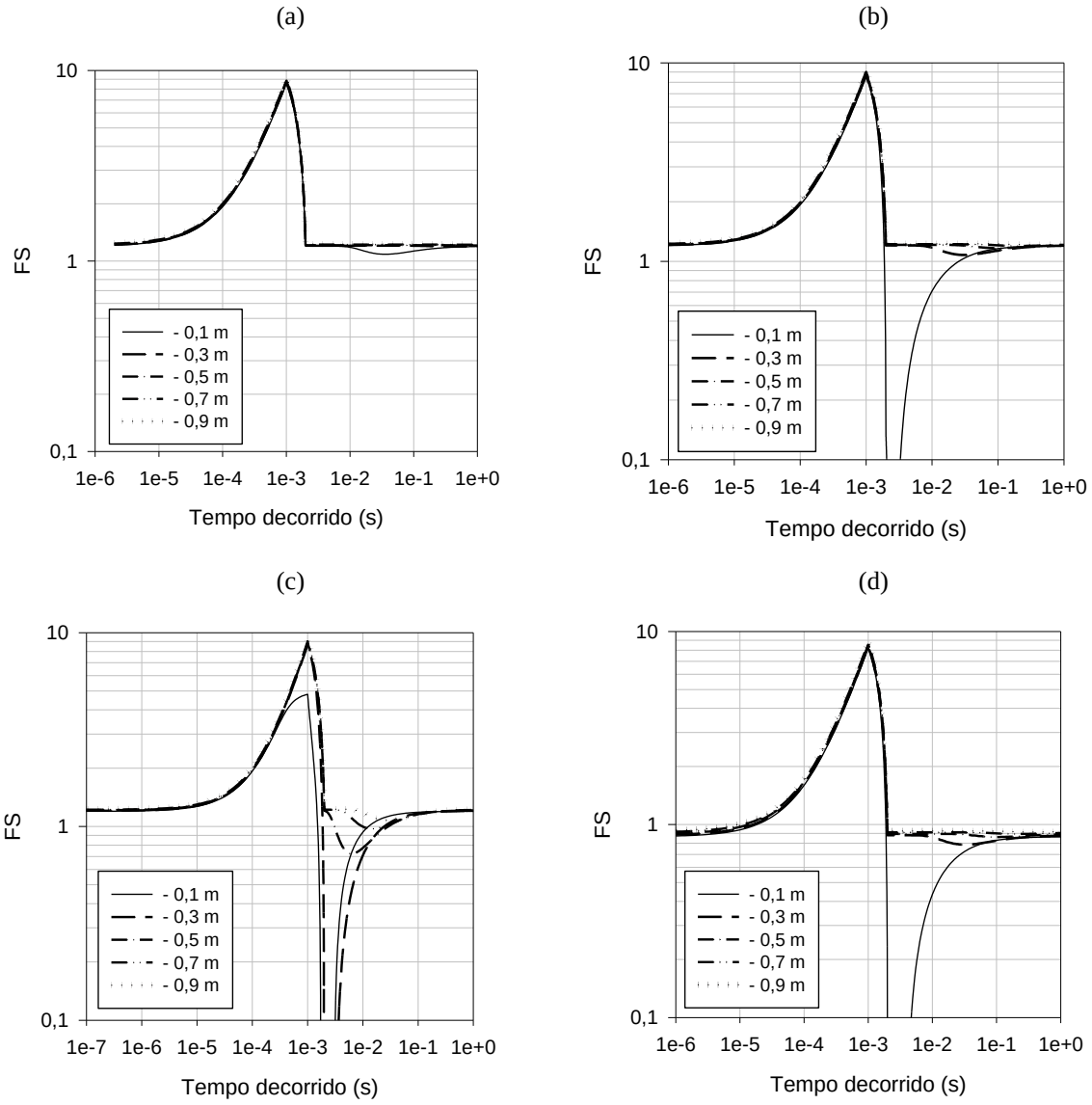
Apesar de ter sido dada maior ênfase às profundidades relativamente rasas do perfil, com elevações de poropressão de ar mais expressivas, é importante ressaltar que mesmo relativamente baixos acréscimos de pressão de ar, da ordem de 10 kPa, podem ter importante impacto no fator de segurança. Nesta seção, o impacto das poropressões de ar no fator de segurança será investigado.

A Figura 5.14 mostra algumas curvas do histórico do fator de segurança ao longo da análise para as 10, 30, 50, 70 e 90 cm de profundidade. Os gráficos são referentes aos casos A12, B12, C12 e D12. Obviamente, o trecho inicial das curvas, até $t = 1x10^{-3}$ s, corresponde a intervalo de tempo no qual a superfície do terreno recebe o carregamento correspondente ao pulso de pressão. Nesta primeira fase do evento, os acréscimos de poropressão de ar são sempre iguais ou inferiores ao carregamento externo, resultando em um aumento gradual do fator de segurança. Após o pico do pulso de sobrepressão, é iniciada uma segunda fase, na

qual poropressões de ar residuais permanecem no terreno, mesmo após o fim do pulso de pressão. É a partir desta fase, de certa forma análoga a um evento de rebaixamento de reservatório em barragens, que fatores de segurança podem ser reduzido a valores abaixo dos iniciais.

De modo geral, observou-se que durante o acréscimo da sobrepressão ocorre um significativo aumento no fator de segurança, e a partir do momento que a sobrepressão começa a decrescer, o mesmo acontece com o fator de segurança, com o mesmo podendo continuar reduzindo após o término do pulso para valores inferiores ao fator de segurança inicial.

Figura 5.14 – Histórico do fator de segurança para diferentes profundidades para os casos (a) A12; (b) B12; (c) C12; e (d) D12



No cenário A12 (Figura 5.14a), apenas para 10 cm de profundidade ocorre uma redução do fator de segurança após o término do pulso de tempo. As demais profundidades não são afetadas. Nos demais cenários, onde a permeabilidade do solo ao fluxo de água e/ou ar é menor (ver Tabela 5.1), esta redução ocorre de forma bem mais acentuada, com o fator de segurança atingindo valores inferiores 1,0 em diversos cenários, profundidades e momentos. Tais valores, em alguns pontos chegam a atingir valores nulos, devido à pressões de ar que superam as tensões totais, o que na prática é análogo à explosão do solo.

O efeito da descarga atmosférica é ainda mais destrutivo no caso C12 (Figura 5.14c). Neste caso, o fator de segurança atinge valores inferiores a 1 em uma profundidade de 50 cm, o que pode implicar e deslizamentos de uma camada ainda espessa de terra. De maneira geral, observa-se que as descargas atmosféricas podem de fato contribuir para escorregamentos de terra superficiais por meio da diminuição da tensão líquida que ocorre com o aumento das poropressões de ar, em condições específicas. Não parece ser possível, no entanto, atribuir o efeito do pulso de pressão de ar à mecanismos de movimento de massa profundos. Apenas movimentos de massa rasos seriam produzidos.

5.3. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA BIDIMENSIONAL

A análise bidimensional foi realizada simulando a geometria simplificada (Fig.5.1b) do talude de Hong Kong. As propriedades do solo consideradas são as mesmas para o colúvio encontrado no talude de *Fung Fai Terrace*, em Hong Kong. As propriedades hidráulicas, os parâmetros de ajuste de van Genuchten para a CCSA do colúvio e os parâmetro de resistência ao cisalhamento do material foram apresentados anteriormente.

5.3.1. Avanço das poropressões de ar e variações nas tensões líquidas

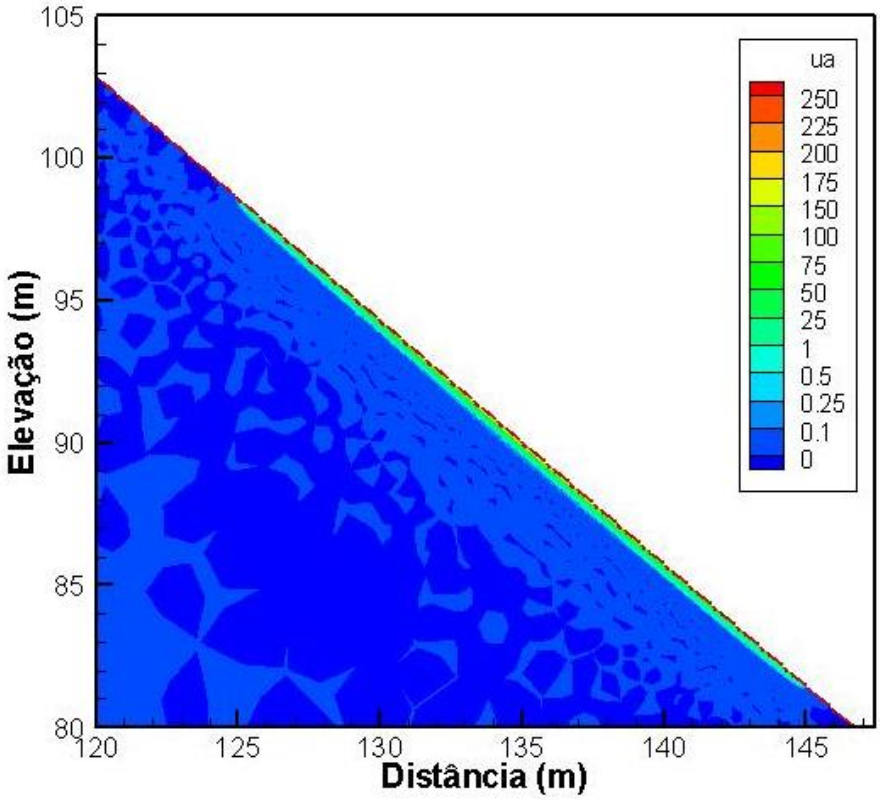
As análises bidimensionais do efeito do pulso de sobrepressão mostraram que ocorre um aumento de poropressão de ar dentro da massa de solo que constitui o talude, na região mais próxima à superfície onde ocorre o impacto da descarga atmosférica, como mostra a Figura 5.15. Os contornos de poropressão de ar para vários instantes e para os dois casos apresentados constam no Apêndice A.

A análise da Figura 5.15a mostra que durante o pico do pulso de pressão já ocorre um avanço de poropressão de ar na região de impacto da descarga, totalizando um aumento das

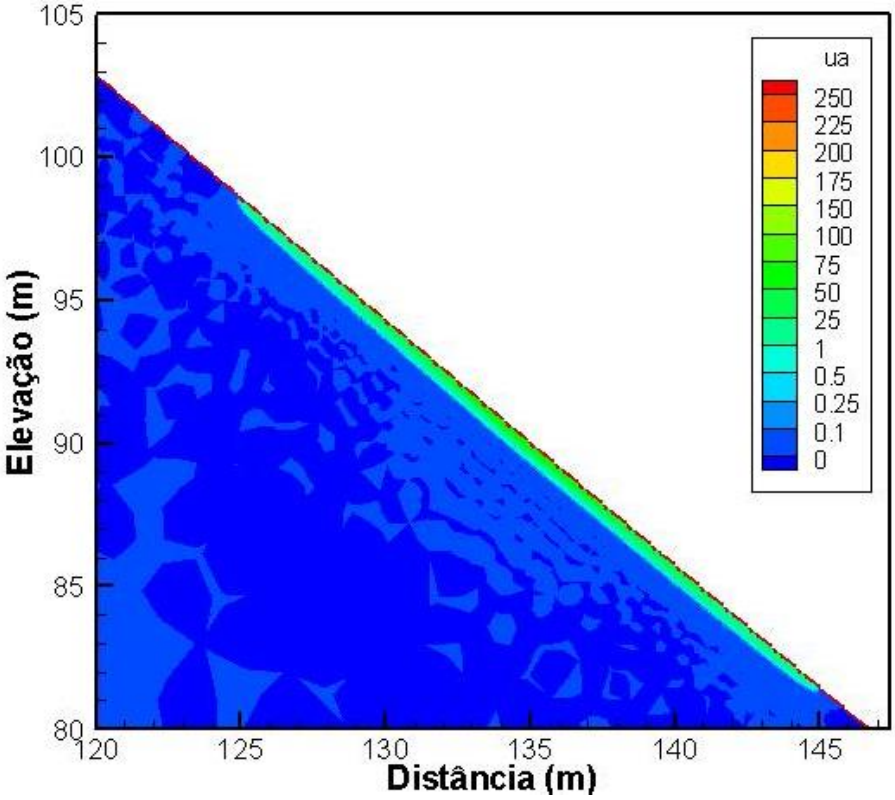
poropressões de ar numa camada de menos de 40 cm de espessura. Ao término do pulso (Figura 5.15b), o aumento das poropressões de ar atinge maiores profundidades, se aproximando de um metro. Após 0,1 s do início do pulso, os acréscimos de poropressão de ar já estão quase se dissipando, apesar de atingir outras camadas, apresentando valores inferiores à 1 kPa, conforme mostra a Figura 5.15c.

Figura 5.15 – Contornos de poropressão de ar para o caso 01 na região mais superficial do talude.

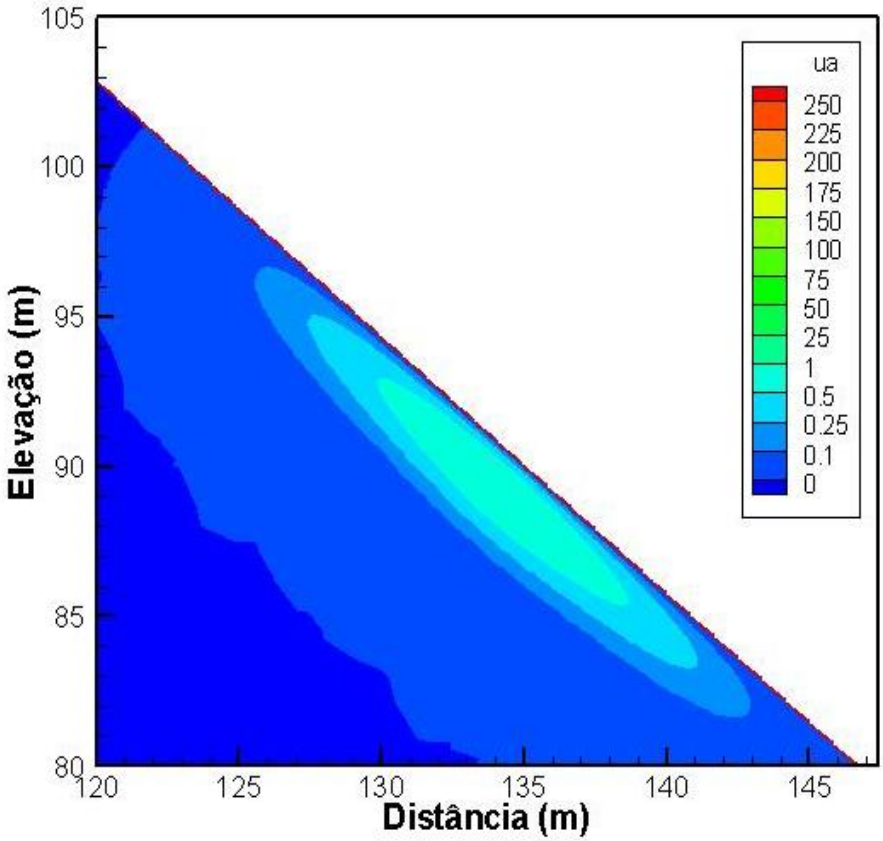
(a) t = 0,001 s (pico do pulso)



(b) t = 0,002 s (fim do pulso)



(c) t = 0,1 s



Embora seja um fenômeno essencialmente breve e superficial, o aumento das poropressões de ar é considerável, e consequentemente, as reduções nas tensões líquidas também são consideráveis. Tais reduções deixam as tensões líquidas negativas na parte mais próxima da face do talude.

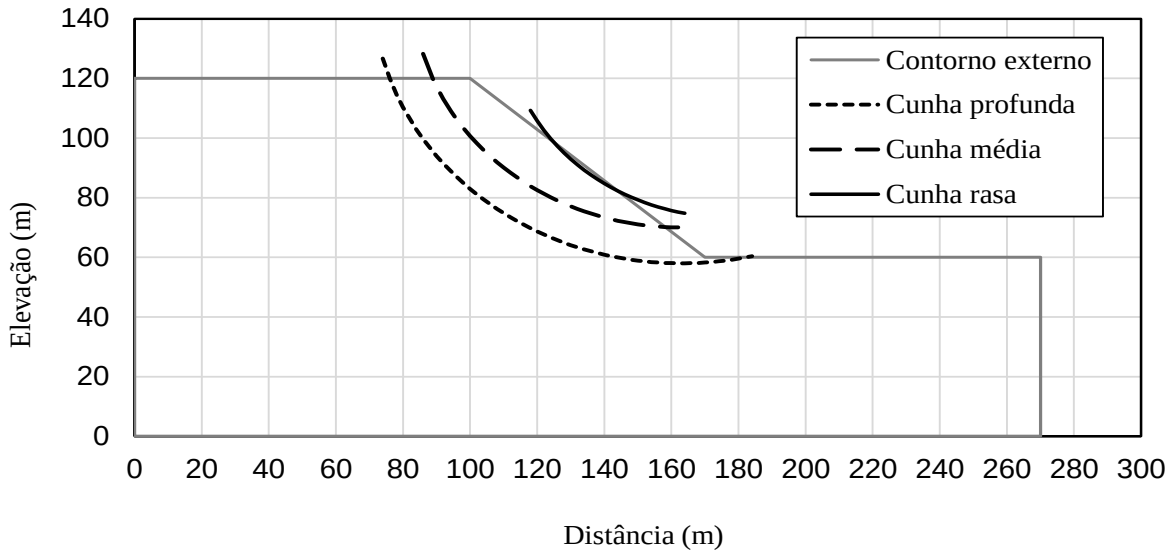
Tensões líquidas negativas podem sugerir algo similar a uma explosão ocorrendo na capa mais superficial do talude. Todavia, os efeitos dessas tensões negativas podem ser amenizados pela sucção matricial da parte mais superficial do solo. Por exemplo, um solo com uma sucção bastante elevada irá contribuir para a estabilidade de um talude por meio do aumento da coesão aparente, de forma que esse aumento possa contrabalançar uma eventual queda das tensões líquidas devido ao efeito de uma descarga atmosférica.

5.3.2. Variações do fator de segurança ao longo de diferentes superfícies de rupturas

Com o objetivo de estudar a influência das variações nas tensões líquidas no fator de segurança fez-se o acompanhamento da variação do FS para seis diferentes superfícies de rupturas, sendo: uma superfície circular profunda, e uma média, ambas situadas numa região do solo mais afastadas da superfície de impacto da descarga atmosférica, além de uma terceira superfície circular, porém mais superficial. Além destas, foram consideradas outras três superfícies de rupturas planas e paralelas à superfície do talude, situadas à profundidades de 20, 50 e 100 cm. A Figura 5.16 apresenta a posição das superfícies circulares no talude estudado

A Figura 5.17 apresenta os FS obtidos para cada superfície de ruptura em cada instante analisado para o caso 01, com sobrepressão de 250 kPa. A Figura 5.18 apresenta a mesma curva relativa ao caso 02, cuja sobrepressão é de 1000 kPa. Observa-se que todas as superfícies analisadas apresentam um aumento no fator de segurança até o instante do pico do pulso. Isto é consequência do carregamento externo na superfície do terreno, que comprime a superfície do talude. Após o pico do pulso o FS volta a diminuir para todos os casos.

Figura 5.16 – Cunhas de ruptura circulares adotadas para o monitoramento do fator de segurança.



A redução do fator de segurança após o pico do pulso ocorre devido ao descarregamento feito na superfície do terreno. Após o descarregamento total, que ocorre no instante igual a 2*tp*, o FS continua diminuindo, análogo ao que acontece numa análise de estabilidade do talude de montante de uma barragem numa simulação do esvaziamento do reservatório.

Nas superfícies circulares profunda e média, o FS retorna ao seu valor inicial após o término do pulso. Para as demais, o fator de segurança chega a atingir valores menores que o inicial. A superfície plana situada a 20 cm de profundidade obteve as maiores reduções de fator de segurança com relação ao inicial, de 90,96% para a análise cuja sobrepressão é igual a 250 kPa (FS = 1,215) e 99,93% para o caso com sobrepressão de 1000 kPa (FS = 0,001). Para o caso 02 em específico, o FS foi reduzido para zero durante três instantes da análise (0,0015, 0,00175 e 0,002 s).

Também é possível observar a evolução do avanço das poropressões de ar no perfil de solo, principalmente na Figura 5.18. Observa-se que a redução ocorre inicialmente na superfície plana a 20 cm de profundidade e com maior magnitude. Nos próximos instantes o FS na superfície plana a 50 cm de profundidade também começa a reduzir, porém com uma intensidade menor, o que indica um avanço reduzido das poropressões de ar nessa profundidade. O mesmo ocorre para a superfície plana a 100 cm de profundidade nos próximos instantes.

Figura 5.17 – Evolução do FS para as seis superfícies de rupturas ao longo do tempo para o caso 01.

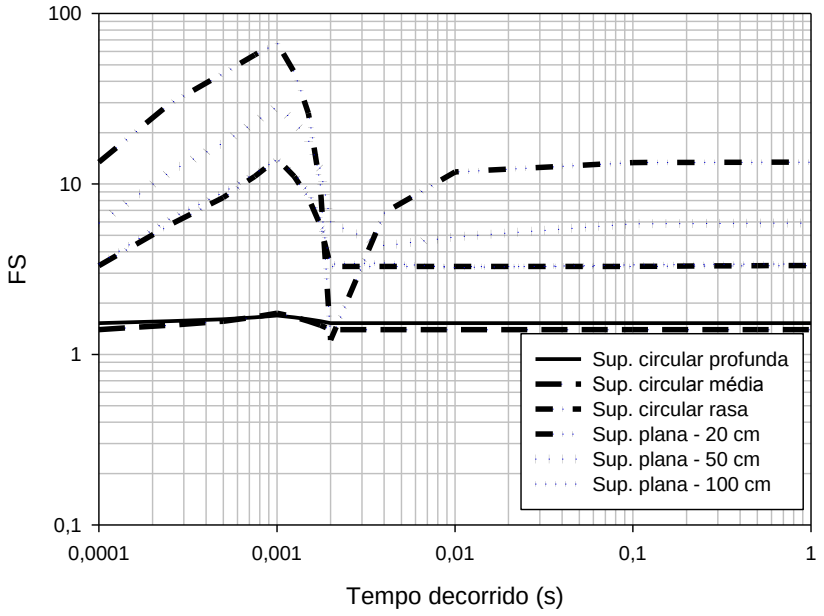
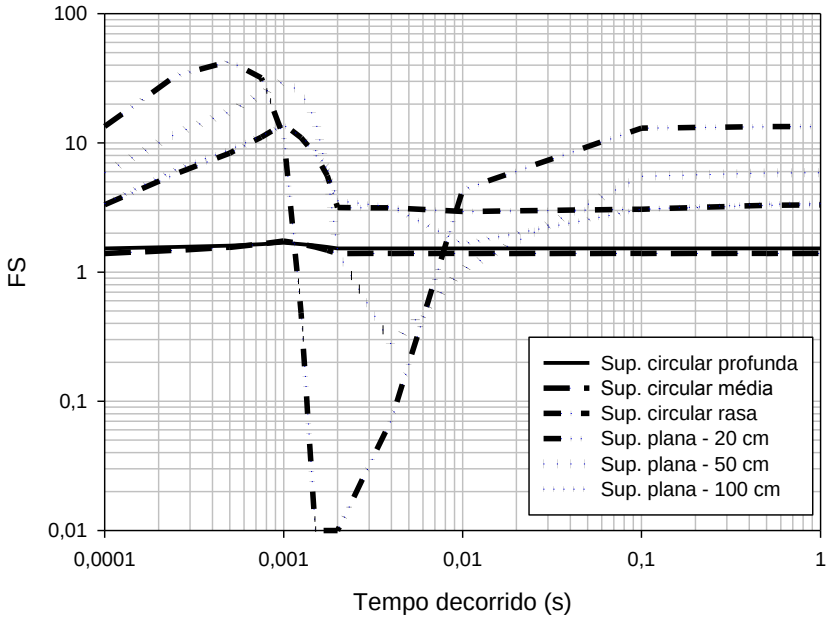


Figura 5.18 - Evolução do FS para as seis superfícies de rupturas ao longo do tempo para o caso 02.



Ocorre uma redução do FS de 51,12% para a superfície plana a 100 cm de profundidade para o caso 02. Tal fato mostra que o efeito do acréscimo de poropressões de ar em decorrência de uma descarga atmosférica pode vir a diminuir o FS bastante a 1 metro de profundidade. Para a análise em questão, o FS continuou superior à 1, apesar da redução, mas para outras encostas tal valor pode deflagrar possíveis corridas de solo e escorregamentos.

CAPÍTULO 6
A INFLUÊNCIA DO EFEITO LISSE NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Este capítulo tem como objetivo apresentar as análises numéricas unidimensionais, realizadas para avaliar a influência do efeito Lisse na estabilidade de taludes. As análises consistem na simulação de variadas condições, sempre envolvendo precipitações intensas, que favoreçam o aprisionamento do ar

6.1. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ANALISADOS

Assim como nas análises para avaliar a influência de descargas atmosféricas, apresentadas no capítulo anterior, são realizadas análises paramétricas com o objetivo avaliar o efeito de diversas variáveis associadas ao problema. De maneira geral, os seis casos que constituem as análises paramétricas 1D avaliam os efeitos: da posição do lençol freático; da umidade volumétrica residual; das condições de fronteira do problema; e da permeabilidade do solo, no fluxo acoplado ar-água e na evolução do fator de segurança, durante eventos de precipitação.

6.1.1. Geometria, condições iniciais e de contorno

Foi utilizada a mesma geometria adotada nas análises do Capítulo 05. Trata-se de um domínio unidimensional, vertical, com 10 metros de comprimento, representando um perfil superficial de solo.

Com relação às condições iniciais da fase ar, considerou-se que a poropressão de ar é igual à pressão atmosférica. Em termos de poropressão de água, adotou-se um perfil hidrostático, com lençol freático situado à 2 e 4 metros de profundidade, dependendo do caso analisado

Com relação às condições de fronteira para a EDP que governa o fluxo e balanço de massa de ar, para o limite inferior adotou-se uma condição de fluxo de ar nulo. No limite superior do domínio considerou-se que a pressão de ar é igual à pressão atmosférica. É importante compreender que tal condição de fronteira significa que a condição de fronteira de ar não impõe restrição ao fluxo e saída de ar em nenhum momento. Se houver confinamento do ar,

este será um resultado do grau de saturação e queda da permeabilidade na superfície do terreno, como se pressupõe na existência do efeito Lisse. A imposição de restrição de fluxo de ar na superfície via condição de fronteira não poderia ser considerada uma representação matemática correta do fenômeno.

Para as condições de contorno relativas à fase água, considerou-se que não há fluxo na base do domínio, enquanto uma precipitação de intensidade de I = $1x10^{-5}$ m s^{-1} é aplicada no topo, exceto no caso 04, onde aplica-se uma diferente condição de fronteira no topo, onde a a poropressão é constante e igual a 1 kPa ao longo do tempo. Em todos os casos, a duração do evento de precipitação simulado é de 8 horas.

6.1.2. Propriedades dos materiais

As propriedades hidráulicas e os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados nas análises são as mesmas referentes ao colúvio do talude de *Fung Fai Terrace*, em Hong Kong. A condutividade hidráulica saturada é de 3 x 10^{-5} m s^{-1}, mas valores diferentes, representando variações possíveis do parâmetro, serão empregados aqui. As propriedades hidráulicas e os parâmetros de ajuste da CCSA são os mesmos apresentados no capítulo 5, sendo θ_{sat} = 0,410, θ_{res} = 0,00 α_{vg} = 0,185, n_{vg} = 1,233 e m_{vg} = 0,189. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento também são os mesmos apresentados no Capítulo 5, sendo a coesão efetiva de 10 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 35º. O ângulo de atrito com respeito à sucção matricial adotado foi 23,33º, correspondendo à 2/3 do valor do ângulo de atrito efetivo.

6.1.3. Sumário de casos propostos

A Tabela 6.1 apresenta uma síntese das combinações de propriedades do solo e condições de fronteira adotadas, que formam um conjunto de cenários estabelecidos para o estudo paramétrico

Tabela 6.1 - Caracterização dos casos na análise paramétrica 1D relativa ao estudo do efeito Lisse.

Caso	I (m s^{-1})	k_{sat} (m s^{-1})	k_d (m s^{-1})	θ_{res} (m^3 m^{-3})	NA
Caso 01	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	$1x10^{-4}$	0.174	- 2.0 m
Caso 02	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	$1x10^{-4}$	0.174	-4.0 m
Caso 03	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	$1x10^{-4}$	0	-2.0 m

Caso 04	u_w = 1 kPa no topo	$1x10^{-5}$	$1x10^{-4}$	0.174	-2.0 m
Caso 05	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	$1x10^{-5}$	0.174	-2.0 m
Caso 06	$1x10^{-5}$	$1x10^{-6}$	$1x10^{-5}$	0.174	-2.0 m

O Caso 01 apresenta os dados relativos ao solo formado por colúvio, estudado por Fredlund e Rahardjo (1993), sofrendo uma precipitação de intensidade $1x10^{-5}$ m s^{-1}. Esta intensidade é constante durante toda a análise, de modo que o período de retorno da chuva cresça à medida que o tempo de análise aumente. Considerando o tempo total de análise, de 8 horas, a precipitação estabelecida possui um período de retorno de 50 anos.

A precipitação aplicada na fronteira superior foi imposta por meio de uma condição de fronteira de fluxo, combinada com uma função de transição, proposta por Gitirana Jr. (2005), que reduz a precipitação efetivamente aplicada em função da poropressão de água na superfície do terreno. Quando a poropressão atinge o valor nulo, tem-se uma condição de fronteira equivalente à manutenção de tal poropressão. Desta forma, pode-se quantificar, além da infiltração imposta, a infiltração resultante e o escoamento superficial.

O caso 04 possui as mesmas propriedades do caso 01. A única mudança está na condição de fronteira considerada no topo do domínio: substitui-se a precipitação com uma intensidade $1x10^{-5}$ m s^{-1} por uma poropressão de água constante de 1 kPa. Esta condição equivale à uma precipitação muito intensa que gera uma lâmina d'água de 10 cm de espessura sobre o talude. Os casos 05 e 06 diferenciam-se do caso 01 pelas permeabilidades do solo: no Caso 05 adota-se $k_{sat} = k_d$. Enquanto que no Caso 06 adota-se um solo 10 vezes menos permeável.

6.2. RESULTADOS DA ANÁLISE PARAMÉTRICA UNIDIMENSIONAL

Esta seção apresenta os resultados obtidos na análise paramétrica unidimensional que simula o efeito Lisse e a discussão a respeito desses resultados.

6.2.1. Comportamento típico transiente

Apesar de o nível de aprisionamento de ar, velocidade de avanço da frente de molhagem, dentre outras características, variar de caso a caso, o padrão de comportamento transiente é semelhante para todos os cenários. Desta maneira, seria exaustivo e desnecessário examinar a

evolução ao longo do tempo das variáveis de estado do solo para cada um dos cenários analisados. Foi selecionado apenas o Caso 01, para uma apresentação cuidadosa do comportamento transiente típico ao longo do evento de precipitação de 8 horas.

A Figura 6.1a mostra o acréscimo gradativo das poropressões de ar no interior do solo, indicando que neste caso existe um efeito significativo de aprisionamento do ar. O aumento das poropressões de ar na zona não saturada é um fenômeno esperado, e que ocorre pelo confinamento da massa de ar existente dentro do solo entre a zona saturada delimitada pelo lençol freático e pela frente de saturação, que avança gradualmente a partir da superfície do terreno. Inicialmente as poropressões de ar na zona não saturada são iguais à pressão atmosférica. Durante a precipitação ocorre um aumento dessas poropressões de ar de modo que, ao término da análise (t = 8 horas) as poropressões de ar atingem um pico de quase 4 kPa, numa profundidade de 1,5 metros.

As Figuras 6.1b a 6.1d apresentam os resultados da simulação do Caso 01, tanto na forma desacoplada, quanto de maneira acoplada, sendo que a análise desacoplada considera apenas o balanço de massa de água, sendo as poropressões de ar constantes e correspondentes às condições atmosféricas. O efeito Lisse não pode ser observado em uma análise desacoplada de fluxo.

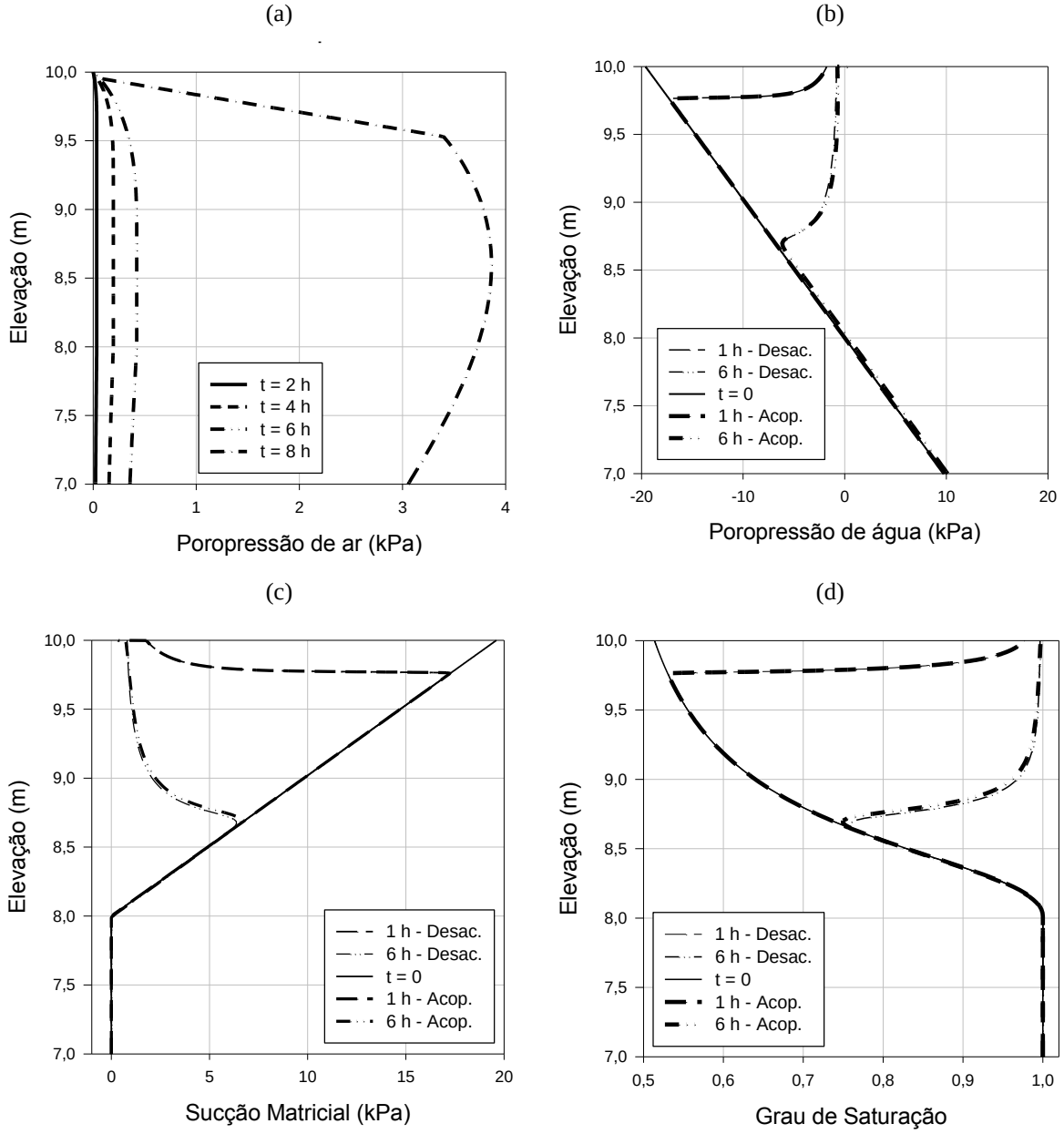
A Figura 6.1b apresenta os perfis de poropressão de água para diferentes instantes da análise, também para o caso 01. As curvas referentes à mesma análise, porém sem acoplamento entre os fluxos de água e ar também são apresentadas. Tanto análise desacoplada, o avanço da frente de saturação ocorre de forma mais rápida, de modo que para um tempo decorrido de seis horas após o início da análise quase todo o perfil de solo já se encontra saturado na análise desacoplada.

O aumento das poropressões de ar na zona não saturada é um fenômeno esperado, e que ocorre pelo confinamento da massa de ar dentro do solo entre a zona saturada delimitada pelo lençol freático e a frente de saturação que avança na superfície do terreno. Tal observação não pode ser observada em uma análise desacoplada de fluxo, onde as poropressões de ar são iguais à pressão atmosférica em todo o domínio.

Os perfis de sucção matricial (Figura 6.1c) e grau de saturação (Figura 6.1d) também confirmam a não necessidade do acoplamento para as análises. Ao mesmo tempo em que o efeito Lisse causa aumento de poropressão de ar, o efeito causa também o retardo no avanço

da frente de infiltração e diminuição nas poropressões de água. Ambos os efeitos contribuem para o aumento na sucção matricial.

Figura 6.1 – Perfis relativos ao caso 01 para diferententes instantes da análise: (a) Poropressão de ar; (b) Poropressão de água; (c) Sucção matricial e (d) Grau de saturação.



Comparando a magnitude dos impactos nas poropressões de ar e água, observa-se que enquanto as máximas poropressões de ar geradas são quase 4 kPa, as curvas de poropressões de água na análise acoplada e desacoplada se sobrepõem, assim como a maioria das curvas aqui apresentadas. Esses valores parecem indicar que, pelo menos para o cenário do Caso 01, o efeito Lisse não tem maiores impactos em termos de poropressões de água do que de ar. Essa constatação é relevante, pois a simples informação a respeito de poropressões de ar

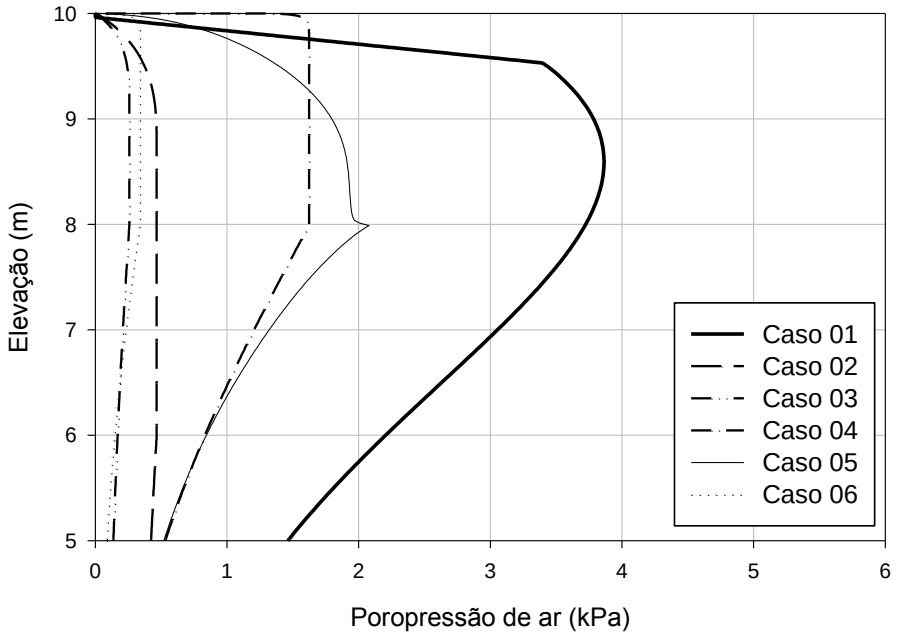
geradas, de magnitude relativamente baixas, pode indicar que o efeito Lisse é de pequena importância. Na verdade, o efeito Lisse apresenta outras repercussões, principalmente com respeito ao avanço da frente de molhagem.

Para os perfis de grau de saturação, apresentados na Figura 6.1d, também não é possível avaliar discrepâncias entre os casos acoplado e desacoplado e a magnitude do efeito Lisse para o Caso 01.

6.2.2. Comparações entre os diversos cenários

Os diversos cenários propostos permitem a avaliação da importância das condições iniciais do perfil, das condições de fronteira e de certas propriedades do solo, na evolução e magnitude do efeito Lisse. Os seis casos analisados podem ser vistos na Tabela 6.1. A Figura 6.2 apresenta os perfis de poropressão de ar para todos os casos estudados, considerando o instante de oito horas após o início da precipitação. Os maiores acréscimos de poropressão de ar ocorrem no Caso 01, quando as poropressões atingem quase 4 kPa.

Figura 6.2 – Perfis de poropressão de ar relativos aos seis casos estudados decorridas oito horas após o início da chuva.



Para a comparação dos diversos cenários, será realizado o agrupamento dos mesmos, em função do tipo de variável estudada. Para todos os grupos, o Caso 01 é considerado o "caso base". No primeiro grupo serão comparadas variáveis que controlam o estado inicial do perfil, estudadas nos Casos 01, 02 e 03. No segundo grupo, serão avaliadas duas maneiras de impor

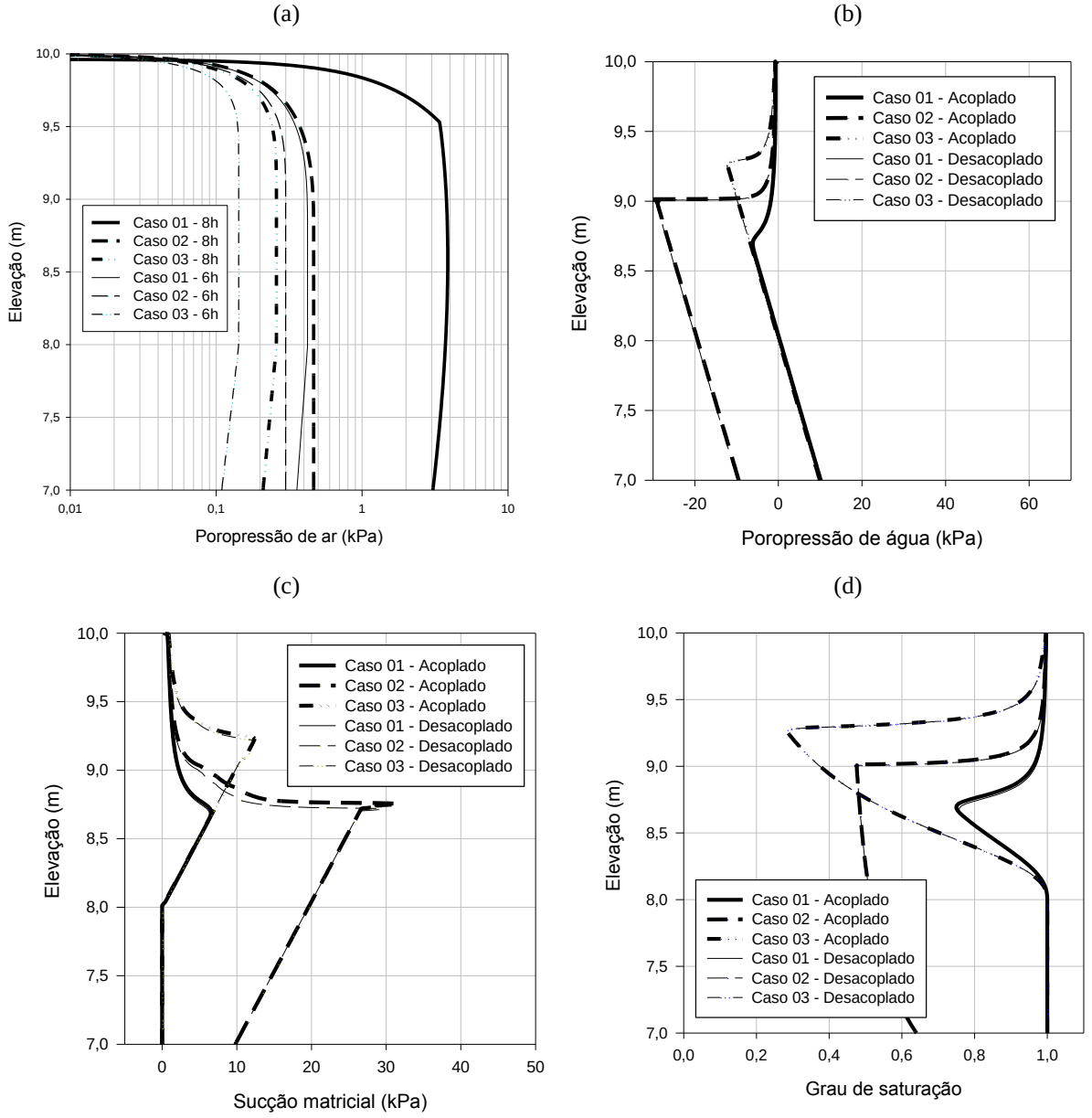
o processo de infiltração e de simular a condição de drenagem da superfície do terreno, representadas pelos Casos 01 e 04. No terceiro e último grupo serão abordados os efeitos da condutividade do solo ao fluxo de ar e água, estudadas pela comparação dos Casos 01, 05 e 06.

A Fig. 6.3 apresenta a comparação dos casos 01, 02 e 03. Avaliando-se a influência da posição inicial do lençol freático (Casos 01 versus 02) nas soluções acopladas, observa-se que os acréscimos de poropressão de ar são significantemente maiores no Caso 01, que apresenta um lençol freático mais raso. Por outro lado, o avanço da frente de molhagem nas análises acopladas é maior para o caso com lençol mais profundo e para o caso com umidade residual menor. Esses dois últimos casos possuem graus de saturação iniciais inferiores, o que impõe, indiretamente, maiores gradientes hidráulicos. Os maiores gradientes hidráulicos explicam, em parte, o maior avanço da frente de molhagem.

Em termos de diferença entre as análises acoplada e desacoplada, para os Casos 02 e 03 o efeito Lisse tem pequeno impacto no processo de infiltração. Nos Casos 02 e 03, o solo não se aproxima da saturação, havendo ainda significativo volume disponível para armazenamento de água. No Caso 01, como já havia sido comentado, o efeito Lisse teve grande influência no avanço da frente e molhagem, ocasionando o acréscimo de poropressões de ar em até 4 kPa (Figura 6.3a). Parece ser correto afirmar que o efeito Lisse só é significativo quando a análise indica tendência à saturação completa do perfil. Obviamente, o grau de importância do efeito Lisse deve crescer de forma gradual, exigindo uma avaliação cuidadosa de cada situação.

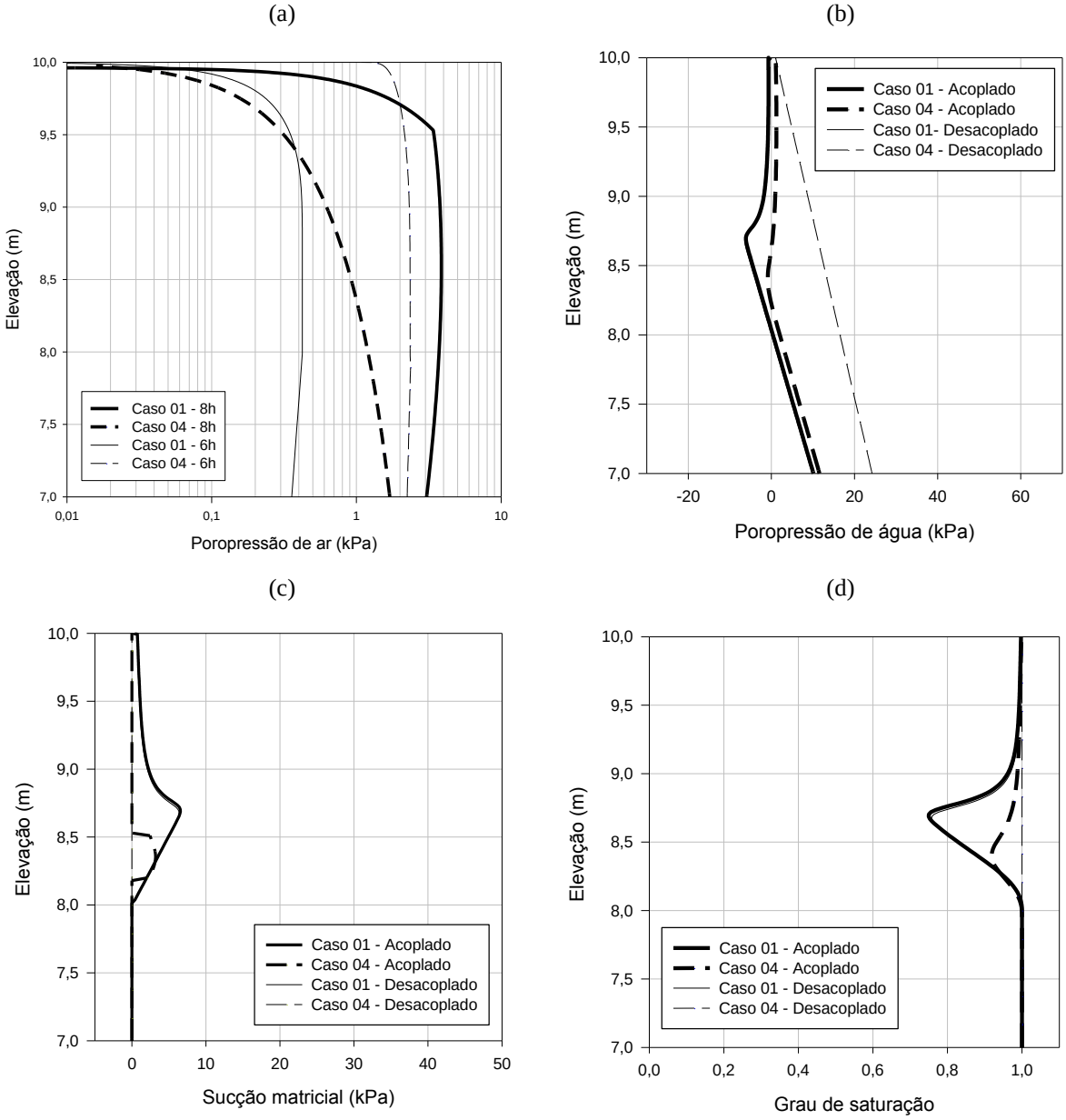
A Figura 6.4 apresenta a comparação dos cenários 01 e 04. O Caso 04 representa uma condição de pobre drenagem na superfície do terreno aliada com uma precipitação intensa, com produção de uma lâmina de aproximadamente 10 cm de água na superfície do talude. Desta maneira, tem-se no Caso 04 uma situação de perfeito confinamento do ar do solo, já que ele não pode escapar por ambas as fronteiras do domínio. Pode-se observar, no Caso 04, que os acréscimos de poropressão de ar relativos ao instante de oito horas atingem um valor de, aproximadamente, 0,6 kPa no primeiro metro de profundidade. No entanto, para o instante de seis horas os acréscimos de poropressão de ar chegam a valores maiores que 2,0 kPa. Como nesse caso a análise já começa com vedação da atmosfera, os acréscimos de poropressão de ar ocorrem de forma mais rápida e dissipam, também, de forma mais rápida.

Figura 6.3 – Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1, 2 e 3.



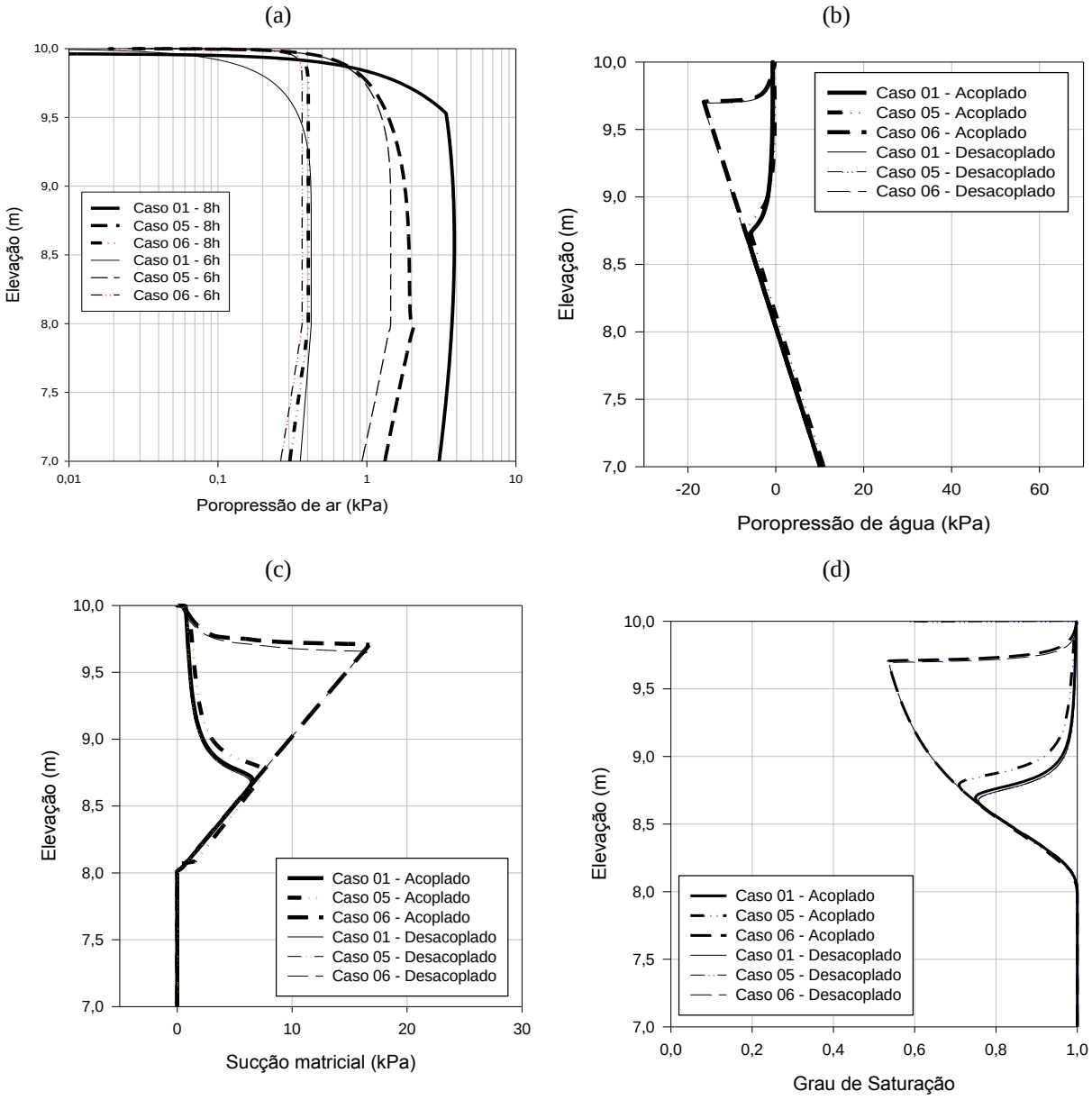
As Figuras 6.4b, c e d avaliam a influência das condições de fronteira impostas, em termos de poropressão de água, sucção matricial e grau de saturação. Pode-se observar, no Caso 04, que o acoplamento exerce influência nas análises, mesmo que pouca. A análise desacoplada resultou na saturação mais rápida do solo. Isso ocorre, pois o ar que já está aprisionado desde o início da análise oferece mais resistência à infiltração, o que não acontece quando o ar nos poros está em livre contato com a atmosfera.

Figura 6.4 - Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1 e 4.



Em síntese, a principal observação proporcionada pelo Caso 04 é que condições de má drenagem na superfície do terreno podem resultar em menor avanço das frentes de infiltração e menores graus de saturação no perfil. Obviamente, tal constatação só é válida em condições de campo com grandes extensões sob a condição de má drenagem. A má drenagem localizada permanece um agente provocador de maior molhagem do solo, já que superfícies vizinhas sem lâmina de água serviriam de área de escape para o ar do solo.

Figura 6.5 - Comparação dos perfis de (a) poropressão de ar água, (b) poropressão de ar água, (c) sucção matricial, e (d) grau de saturação para os Casos 1, 5 e 6.



Nos casos em que se avaliou a influência da permeabilidade (Figura 6.5), observou-se que a relação entre a permeabilidade do ar no solo seco e a condutividade hidráulica saturada também irá influenciar na geração de poropressão de ar. Quando a condutividade do ar no solo seco é igual à condutividade hidráulica saturada as poropressões atingem quase 2 kPa, no entanto as poropressões de ar continuam superiores no caso 01, que possui uma condutividade do ar no solo seco 10 vezes maior do que a condutividade hidráulica saturada. Mantendo esta relação, mas dividindo ambas as permeabilidades por 10 (caso 06), ou seja, em solos menos permeáveis, ocorre o aprisionamento de poropressão de ar, mas com intensidade mais baixa que nos demais casos.

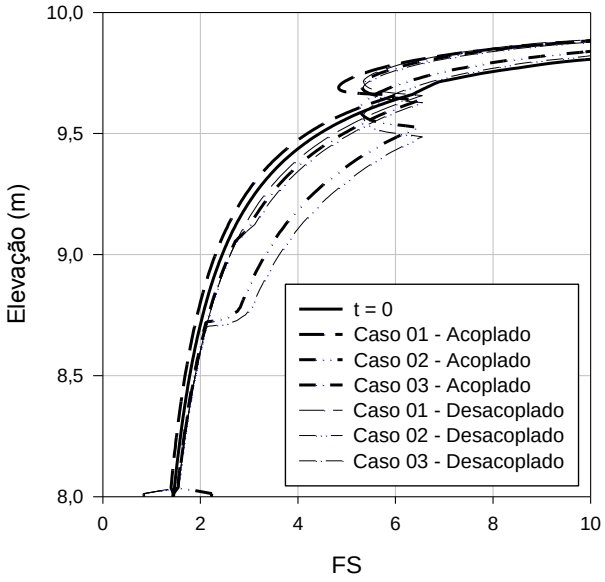
A análise da Figura 6.6 mostra que os acréscimos de poropressão de ar são diretamente proporcionais à reduções no fator de segurança. Isso ocorre pela diminuição das tensões líquidas provenientes do aumento das poropressões de ar.

Portanto a diminuição do FS com o aumento das tensões líquidas mostram que a parcela de resistência ao cisalhamento referente às tensões líquidas possui maior influência do que a parcela referente à sucção matricial. Essas diminuições no FS ocorrem normalmente nos 50 cm mais superficiais do domínio.

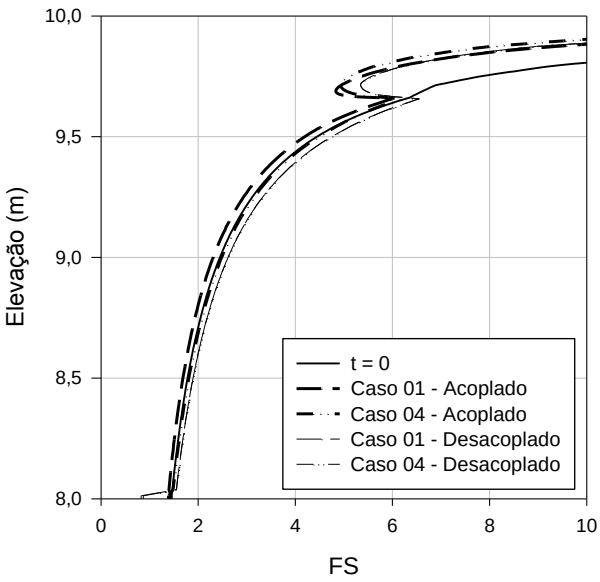
Para os casos 05 e 06 (Figura 6.6c) o acoplamento não influencia na determinação do FS, apesar de nas outras figuras os perfis de grau de saturação encontram-se saturados na análise de grau de saturação (Figura 6.b). Com relação à variações na permeabilidade, observa-se que as mesmas contribuíram para a diminuição do FS tanto nas análises acopladas como nas desacopladas.

Figura 6.6 - Comparação dos perfis de FS para o instante t = 8 horas: (a) Casos 01, 02, 03; (b) Casos 01 e 04; (c) Casos 01, 05, e 06.

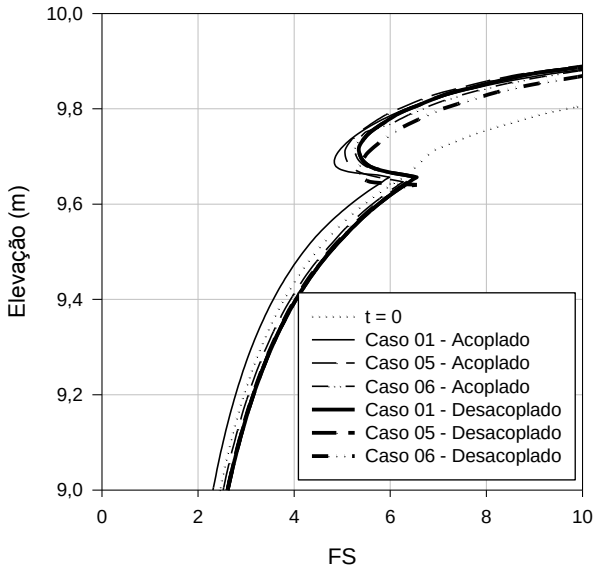
(a)



(b)



(c)



De modo geral, no trecho mais superficial onde ocorrem as variações do FS, o mesmo se encontrava inicialmente com valores elevados (muito maiores que 2), ou seja, longe da ruptura. Nessa região (entre 9 e 10 m) que ocorre as maiores reduções no fator de segurança durante as análises. Nas cotas onde o FS se encontra inicialmente entre 1,0 e 1,5 quase não houve variação no mesmo. Portanto, nos casos analisados, conclui-se que o efeito Lisse não colocaria o talude em risco.

CAPÍTULO 7
CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir das análises realizadas na dissertação.

7.1. ESTUDO DO AR DESLOCADO PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Com relação às propriedades relacionadas à descarga atmosférica, conclui-se que a duração do pulso de tempo possui papel bastante importante em uma provável ruptura. Quanto maior o pulso de tempo, maior a profundidade de avanço da sobrepressão. Conclui-se também que a magnitude da sobrepressão também influência não só no acréscimo de poropressão dentro da massa de solo.

Com relação ao estudo da influência das condutividades hidráulica saturada e do ar no solo seco, conclui-se que estas possuem um papel fundamental no avanço das sobrepressões no perfil de solo. Como observado no Capítulo 05, no caso mais extremo (E8), a permeabilidade ao fluxo de ar no solo seco é 100 vezes superior à condutividade hidráulica saturada. Neste caso, além do avanço da sobrepressão ser maior, os acréscimos da poropressão de ar também são maiores, o que implica em maiores reduções da tensão líquida, e consequentemente, do fator de segurança.

Com relação à análise do fator de segurança, conclui-se que a redução do mesmo, e consequente instabilização da encosta, é possível de ocorrer em consequência de uma descarga atmosférica. Contudo, a partir dos resultados obtidos nas análises paramétricas, observa-se que a redução do fator de segurança ocorre na zona mais superficial do talude, mais precisamente dentro dos primeiros 30 centímetros nos casos mais extremos. Portanto, conclui-se que possíveis deslizamentos de terra decorrentes do fenômeno devem ser rasos.

Com relação às análises bidimensionais para verificação do efeito dos acréscimos de sobrepressão de ar oriundos de descargas atmosféricas, conclui-se que o FS de superfícies de rupturas mais profundas não serão alterados, ou sofrerão pouca influência por conta das sobrepressões de uma descarga atmosférica. Porém, para superfícies planas e rasas a

diminuição do FS é bem provável, e consequência da diminuição das tensões líquidas que ocorrem sem o aumento da coesão aparente, uma vez que os breves intervalos de tempos para as sobrepressões não permitem a drenagem da água nos poros. Tais reduções no FS podem não causar escorregamentos por si só, mas aliadas a outros fatores podem atuar como agentes deflagradores de escorregamentos.

7.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EFEITO LISSE

Deste modo, conclui-se que ocorre a diminuição das tensões líquidas na parte mais próxima à superfície do terreno, o que contribui para a diminuição do fator de segurança. Por outro lado, o aumento das poropressões de ar também indicam um aumento na sucção matricial, e consequentemente, um aumento da coesão aparente.

Com relação à influência que a posição do lençol freático e a umidade volumétrica residual, observa-se que os acréscimos de poropressão de ar são maiores quando o lençol freático se encontra mais superficial e a umidade volumétrica residual for maior, e consequentemente, as reduções no FS são menores. Portanto, conclui-se que as reduções no fator de segurança em consequência do acréscimo de poropressão de ar são mais significantes quando o solo se encontra inicialmente mais próximo da saturação. Deste modo, conclui-se também que quando maior a quantidade de ar no solo menor é a influência do acoplamento nas análises, uma vez que nestes casos as curvas acopladas e desacopladas passam a se aproximar.

Pode-se concluir também que a quantidade de ar armazenado no solo influenciará inversalmente no aumento da poropressão de ar dentro do solo quando a massa de ar é confinada. Nos casos em que a posição do lençol freático e a umidade volumétrica residual indicavam, uma maior quantidade de ar na massa de solo os acréscimos de poropressão de ar foram menores devido ao grande volume disponível para o armazenamento de ar.

Com relação ao acoplamento observa-se certa influência do mesmo nas análises que verificam a influência da permeabilidade. Uma vez que a permeabilidade ao fluxo de ar diminui, o mesmo encontra mais dificuldade em escapar para a atmosfera.

7.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do conhecimento obtido durante a pesquisa, e dos resultados obtidos no trabalho, sugere-se os seguintes temas para pesquisas futuras:

- Análise numérica para estudo do efeito das descargas atmosféricas na estabilidade de taludes: na nova pesquisa sugere-se aprimorar o modelo de fluxo acoplado entre a água e o ar e fazer as análises acrescentando o acoplamento com o fluxo de calor. Nessa pesquisa, o efeito do aumento de poropressão do ar em decorrência do aumento da temperatura que ocorre durante uma descarga atmosférica seria levado em consideração;
- Avaliação numérica da estabilidade de um talude submetido a uma submersão abrupta: Essa pesquisa permitiria um estudo mais detalhado da influência do efeito Lisse na estabilidade de um talude.

REFERÊNCIAS

APPEL, P.W.U.; ABRAHAMSEN, N.; RASMUSSEN, T.D.M. Unusual features caused by lightning impact in West Greenland. **Geological Magazine**, United Kingdom, v 143, p.737-741, 2006.

BAKER, R. Determination of the critical slip surface in slope stability computations. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 4, n. 4, p. 333-359, 1980.

BA-TE. **Flow of air-phase in soils and its application in emergent stabilization of slopes**. 2004. 228 folhas. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. The Hong Kong University of Science and Technology, 2004.

BENITEZ, S., 1989, Landslides: Extent and economic significance. In: 28th INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, **Proceedings…** Washington, D.C., Rotterdam, A.A. Balkema, p. 123-126.

BRITO, C.C. **Programação Dinâmica Aplicada à Análise de Estabilidade de Taludes Não Saturados**. 2003. 165 folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2003.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper no. 3, Civil Engineering Dep., Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 37p, 1964.

BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Petroleum Transactions**, AIME. USA, v198, 71-77p, 1953.

CARDOSO, R. Influência das ações atmosféricas na funcionalidade de estruturas geotécnicas. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, São Paulo, v130, p.3-32, 2014.

CARNAVALE, T.S. Desenvolvimento de um modelo físico para a análise de efeitos de trovões em solos. 2013. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro.

CORREIA, S. A. L., AMARAL, C., DA SILVA, M.C.L., CAMPOS,T.M., PORTOCARRERO, H. O Deslizamento da Prainha, Nova Friburgo (RJ): Particularidades Dentro do Contexto do Megadesastre ’11 da Serra Fluminense. In: 12° Simpósio de Geologia do Sudeste. Anais: **12° Simpósio de Geologia do Sudeste**. [s.n] Nova Friburgo, RJ, 2011.

DRM-RJ, Departamento de Recursos Minerais – **Megadesastre da Serra**. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.18-89, 2011.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. 1. ed. Saskatchewan. Editora John Wiley & Sons, Inc, 507p, 1993.

FREDLUND, D.G.; GITIRANA Jr, G.F.N. Unsaturated soil mechanics as a series of partial differential equations. In: International Conference on Problematic Soils, 2005, Famagusta, Cyprus. **Proceedings...** Cyprus, 28p, 2005.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO H.; FREDLUND, M.D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. 1. ed. Hoboken, New Jersey. Editora John wiley & Sons, Inc, 939p, 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A.. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 103, n. ASCE 12919, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, p. 313-321, 1978.

GARCÍA, M.M.; MARTÍN, J.R.; SORIANO, L.R.; DÁVILA, F.P. Observed impact of land uses and soil types on cloud-to-ground lightning in Castilla-Leon (Spain). **Atmospheric Research**, v. 166, p. 233-238, 2015.

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). **Air flow modeling with AIR/W**. Copyright 2007-2012. Geo-Slope Ltd.. Edição de Fevereiro de 2012. Calgary, Alberta, Canadá, 2012. 96 p.

GEO-SLOPE International Ltd. (2013). **Seepage modeling with SEEP/W**. Copyright 2004-2013. Geo-Slope Ltd.. Edição de Fevereiro de 2013. Calgary, Alberta, Canadá, 2013. 205 p.

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). **Stability modeling with SLOPE/W**. Copyright 2007-2012. Geo-Slope Ltd.. Edição de Julho de 2012. Calgary, Alberta, Canadá, 2012. 246 p.

GITIRANA JR, G. F. N. **Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability**. 2005. 411 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). University of Saskatchewan, Saskatoon, 2005.

GRAPES, R. H.; MÜLLER-SIGMUND, H. Lightning-strike fusion of gabbro and formation of magnetite-bearing fulgurite, Cornone di Blumone, Adamello, Western Alps, Italy. **Mineralogy and Petrology**, v. 99, n. 1-2, p. 67-74, 2010.

GUO, H.; JIAO, J. J.; WEEKS, E. P. Rain-induced subsurface airflow and Lisse effect. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, 2008.

HELIOTIS, F. D., & DEWITT, C. B.. Rapid water Table responses to rainfall in a northern peatland ecosystem. **Water Resources Bulletin**, vol. 23, no. 6,p. 1011-1016. 1987.

JONES, D. L. Shock wave from a lightning discharge. **Journal of Geophysical Research**, vol. 73, no. 10, p. 3121-3127. 1968.

KNIGHT, J.; GRAB, S. W. Lightning as a geomorphic agent on mountain summits: evidence from southern Africa. **Geomorphology**, v. 204, p. 61-70, 2014.

LUMB, P. Slope failures in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 8, n. 1, p. 31-65, 1975.

MAHANEY, W.C.; KRINSLEY, D. Extreme heating events and effects in the natural environment: Implications for environmental geomorphology. **Geomorphology**. Boston, v 139-140 p. 348-359, 2012.

MAHANEY, W.C.; MILNER, M.W. Lightning induced mineral/chemical changes in red pine (Pinus resinosa). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v 309, p. 367-373, 2011.

MEDEIROS, V.; BARROS, M. Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais ...**, 2011.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. Climatologia: **Noções básicas e climas do Brasil**. v. 1, ed. 1, São Paulo: Oficina de Textos, São Paulo, 2007. 110 p.

MIYAZAKI, T.; IBRAHIMI, M.K.; NISHIMURA, T. Shallow Groundwater Dynamics Controlled by Lisse and Reverse Wieringermeer Effects. **Journal of Sustainable Watershed Science & Management**, v65, p. 36-45, 2012. DOI: 10.5147/jswsm.2012.0065.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v12, n 3, 10p, 1976.

NASA (2002). Where Lightning strikes. National Space Science and Technology Center's (NSSTC) Lightning Team. Disponível em: < http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast05dec_1/ > acessado em 01/10/2014.

PDE Solutions Inc., 2007. **Flex PDE 5.0 – Reference Manual**, Antioch, CA, USA. 2007.

PHAM, H.T.V.; FREDLUND, D.G.; GITIRANA JR, G. F. N. Slope stability analysis using dynamic programming combined with finite element stress analysis. In: **International Conference on Management of the Land and Water Resources–MLWR**. Hanoi, Vietnan. 2001. p. 107-114.

RAKOV, V.A.; UMAN, M.A. Lightning: Physics and Effects. 2003. 3.ed. New York: Cambridge, v. II, 2005.

RAUTELA, P.; PAUL, S.K. August, 1998 landslides tragedies of Central Himalayas (India): learning from experience. **International Journal of Environmental Studies**, v58, n. 3, p. 343-355, 2007. DOI: 10.1080/00207230108711336.

SAMINGAN, A. S.; LEONG, Eng-C.; RAHARDJO, H. A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 3, p. 559-574, 2003.

SILVA, E. S. **A física dos relâmpagos e dos raios**. 2007. 29 folhas. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2007.

TERRA, V.S.; GITIRANA JR, G. F. N.; MASCARENHA, M.M.A.; DOMINGOS, V.H.; ALMEIDA, J.G.R. Influência da Poropressão de Ar no Ensaio de Desagregação por Imersão

Total em Água. In: VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Fortaleza, CE, 2015. **Anais...** Editora Gráfica Fotolaser, 2015, p 280-287.

TROUTMAN, W. W. Numerical calculation of the pressure pulse from a lightning stroke. **Journal of Geophysical Research**, vol. 74, no. 18, p. 4595-4596, 1969.

UMAN, M.A. **Lightning**. [s.l.], 2012.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America**, USA, v44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VIEMEISTER, P.E. Petrified lightning. **The Lightning Book**, USA, The MIT Press, 6 p., 1983.

WAKASA, S.A.; NISHIMURA, S.; SHIMIZU, H.; MATSUKURA, Y. Does lightning destroy rocks? Results from laboratory lightning experimente using an impulse highcurrent generator. **Geomorphology**. Boston, v. 161-162, p. 110-114, 2012.

WANG, Z.; FEYEN, J.; NIELSEN, D.R.; VAN GENUCHTEN, M.T. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects. **Water Resources Research**. v. 33, n 12, p. 2759-2767, 1997.

WEEKS, E.P. The Lisse Effect Revisited. **Ground Water**. Vol. 46, n 6, 652-656 p, 2002.

XIONG, Y.; BAO, X.; YE, B.; & ZHANG, F. Soil–water–air fully coupling finite element analysis of slope failure in unsaturated ground. **Soils and Foundations**, v. 54, n. 3, p. 377-395, 2014.

ZHANG, Z.Y.; CHEN, S.M.; TAO, L.J. 1983 Sale Mountain landslide, Gansu Province, China. **Engineering Geology**. v. 15, p. 149-163, 2002.

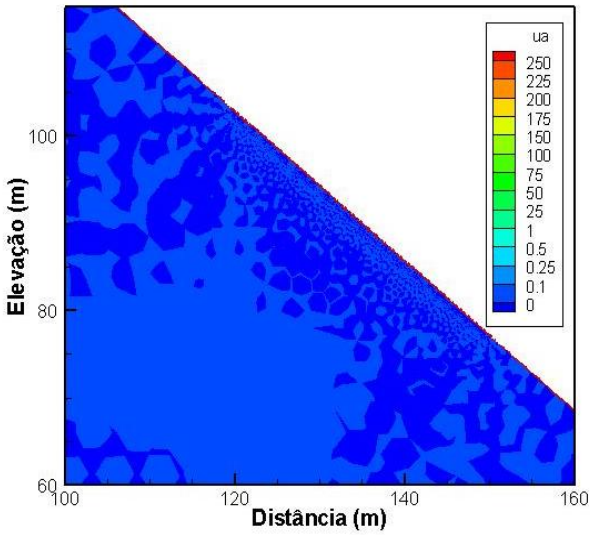
ZHANG, X. Y.; ZHU, Y. M.; FANG, C. H. The role fore air flow in soil slope stability analysis. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, v. 21, n. 5, p. 640-646, 2009.

APÊNDICE A – CONTORNOS DE POROPRESSÃO DE AR NA ANÁLISE 2D

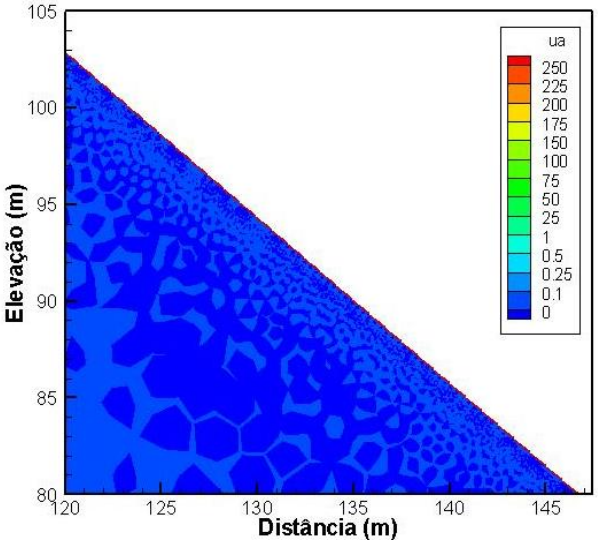
Neste apêndice apresentam-se as curvas com os contornos de poropressão de ar para diferentes instantes da análise 2D de fluxo transiente relativas ao estudo do efeito da descarga atmosférica no talude.

Figura D.1 – Contornos de porpressão de ar para vários instantes da análise bidimensional do efeito da sobrepressão de ar gerada pelo relâmpago: Caso 01.

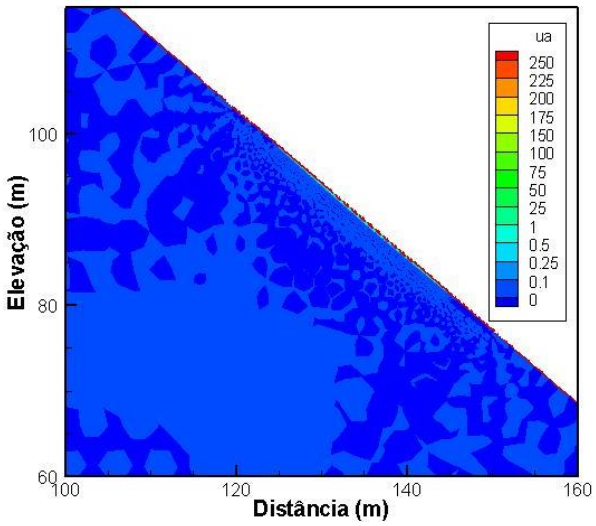
(a) t = 0 s



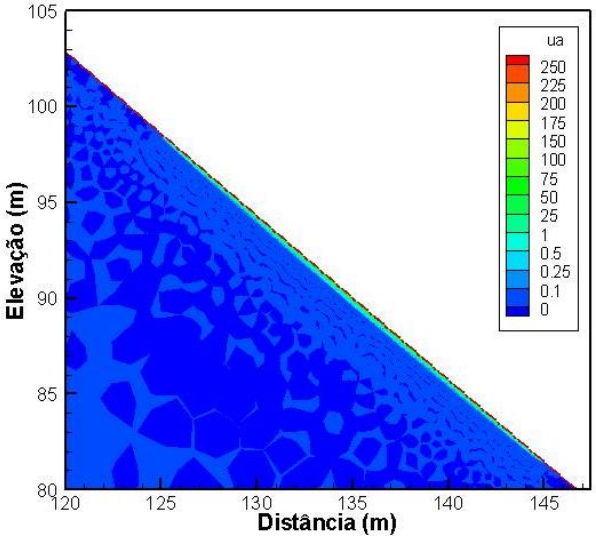
(b) t =0 s (zoom)



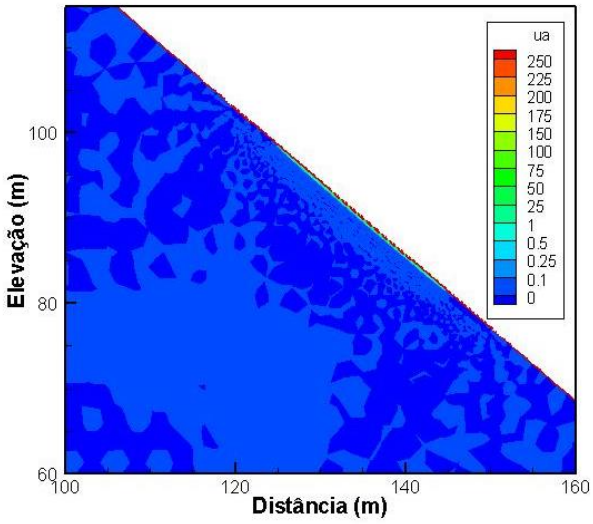
(c) t =0.0005 s



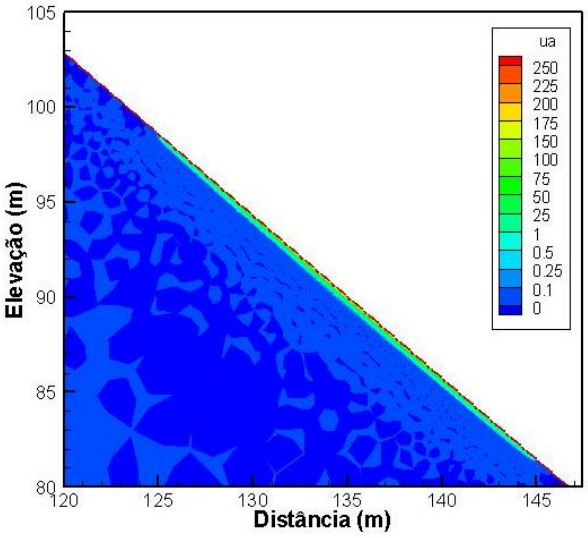
(d) t =0.0005 s (zoom)



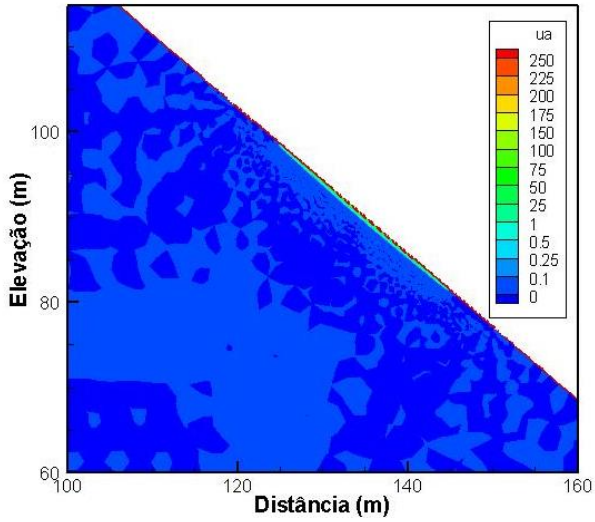
(e) t = 0.001 s (pico do pulso)



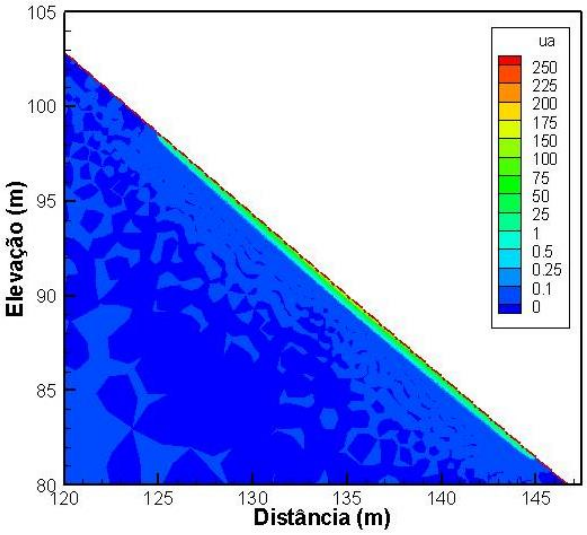
(f) t = 0.001 s (zoom)



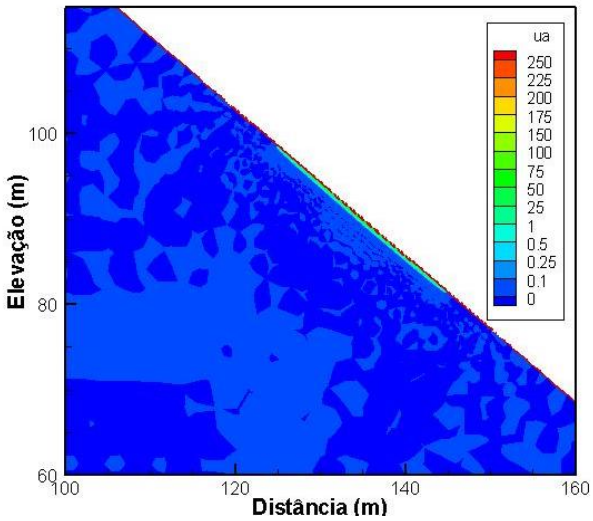
(g) t = 0.0015 s



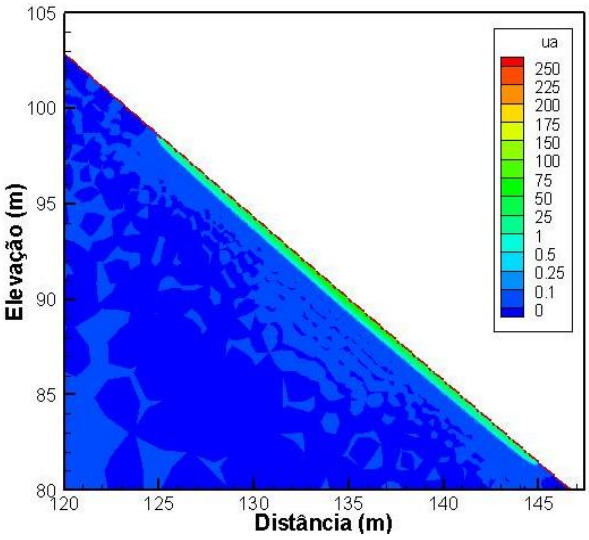
(h) t = 0.0015 s (zoom)



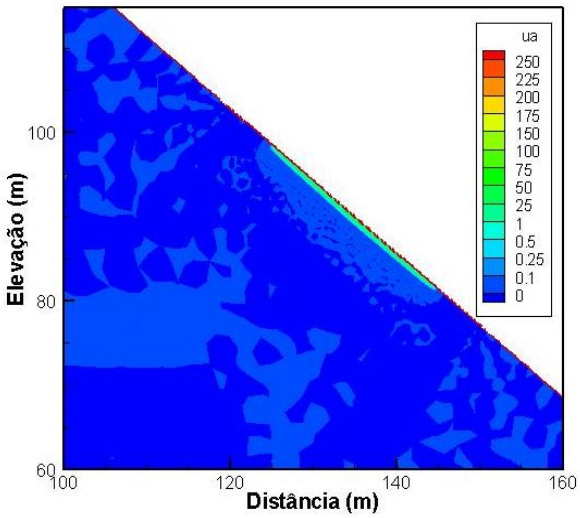
(i) t = 0.002 s (fim do pulso)



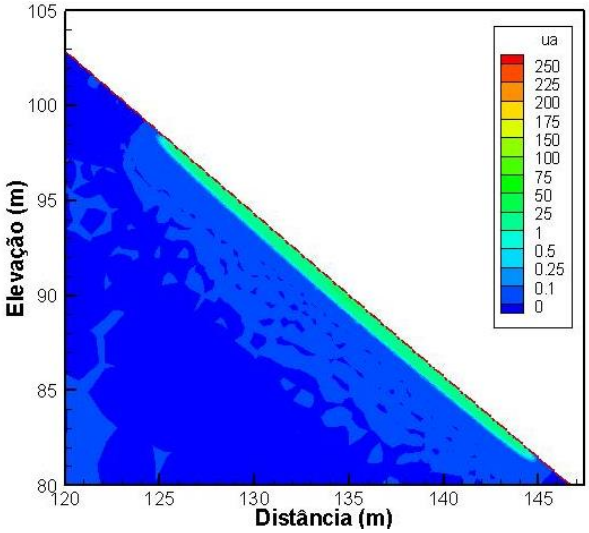
(j) t = 0.002 s (zoom)



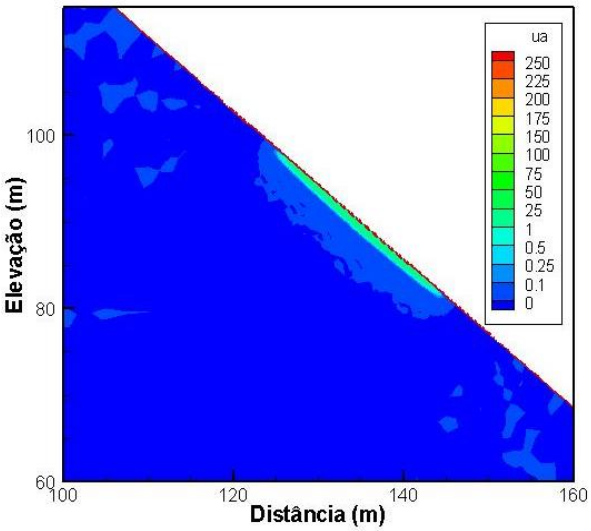
(k) t = 0.004 s



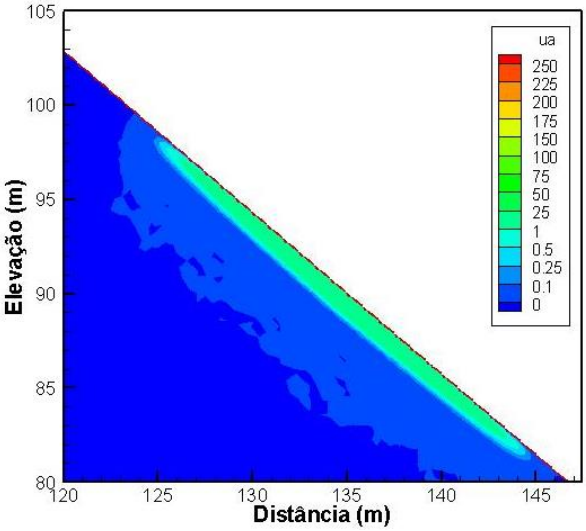
(l) t = 0.004 s



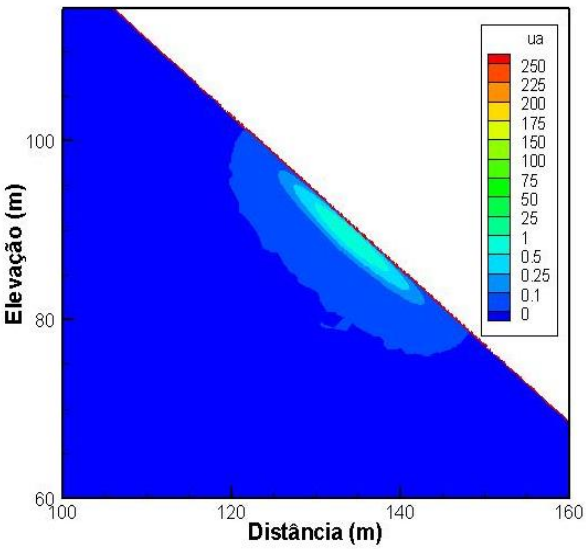
(m) t = 0.01 s



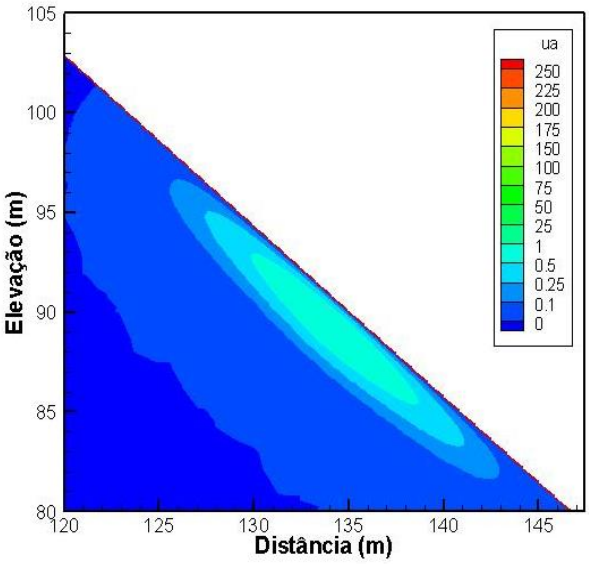
(n) t = 0.01 s (zoom)



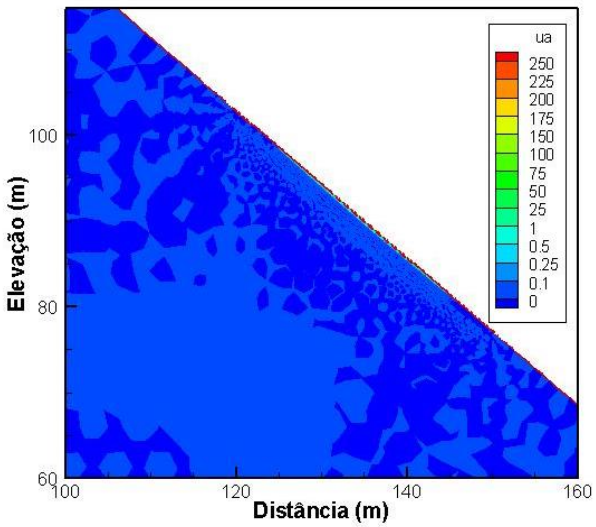
(o) t = 0.1 s



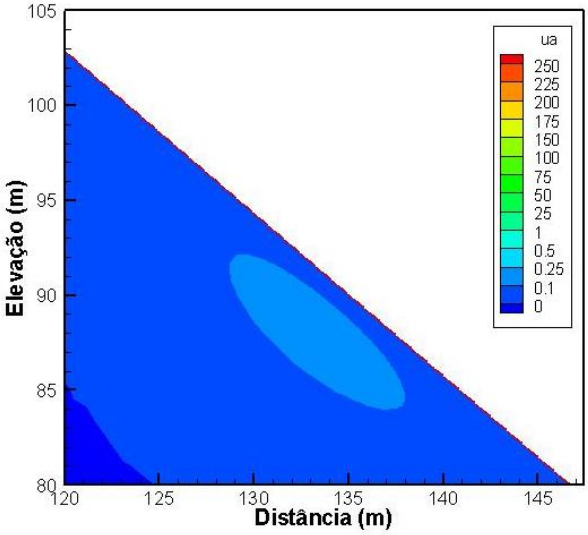
(p) t = 0.1 s (zoom)



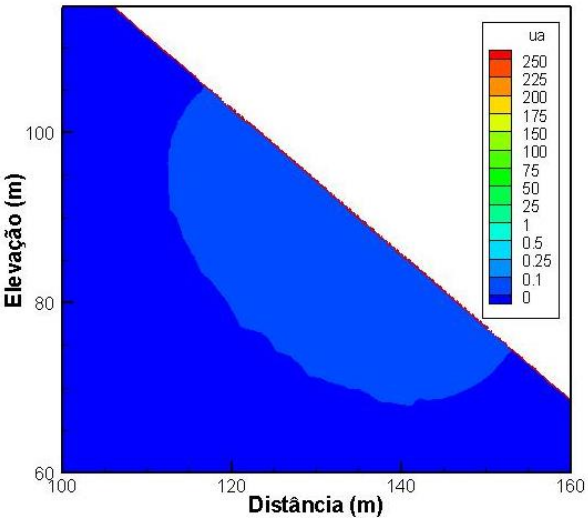
(q) t = 0.5 s



(j) t = 0.5 s (zoom)



(s) t = 1 s



(t) t = 1 s (zoom)

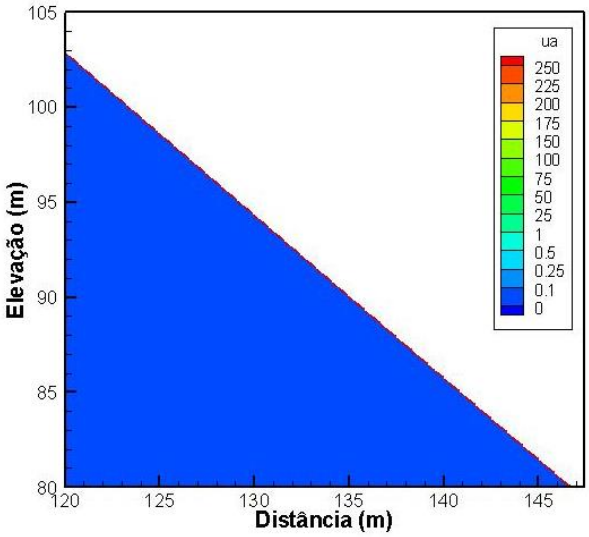
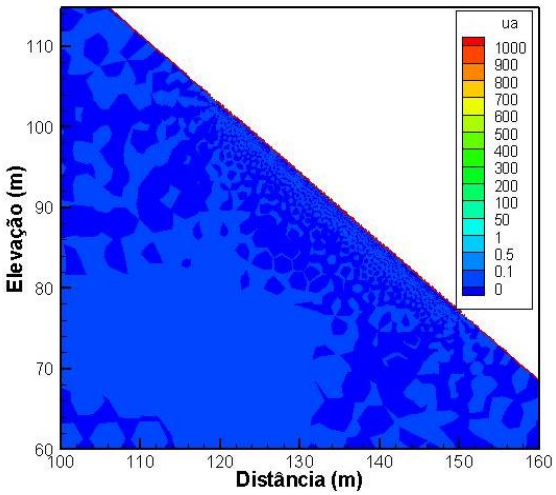
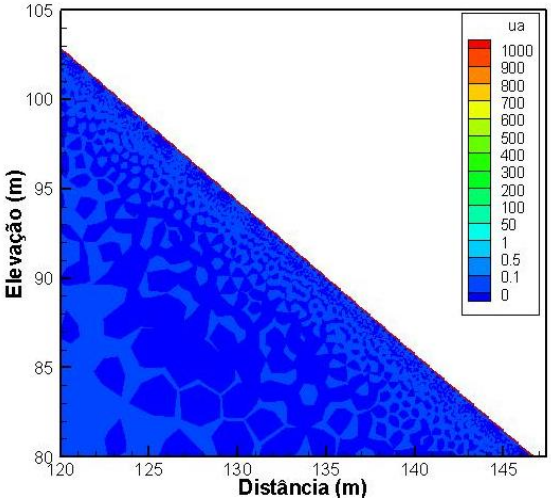


Figura D.2 - Contornos de porpressão de ar para vários instantes da análise bidimensional do efeito da sobrepressão de ar gerada pelo relâmpago: Caso 02.

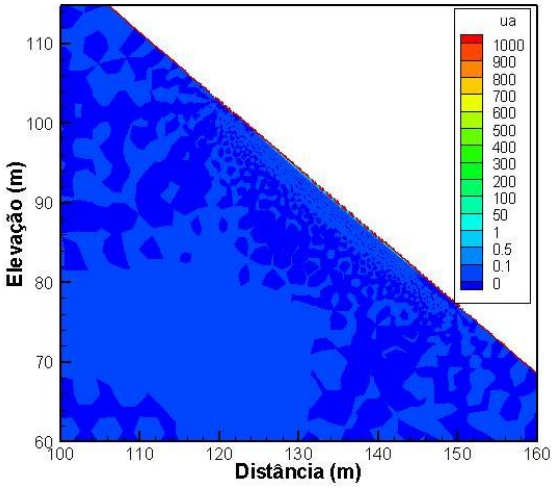
(a) t = 0 s



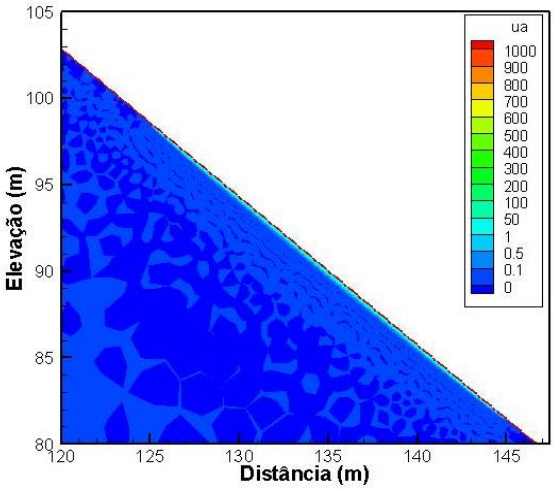
(b) t =0 s (zoom)



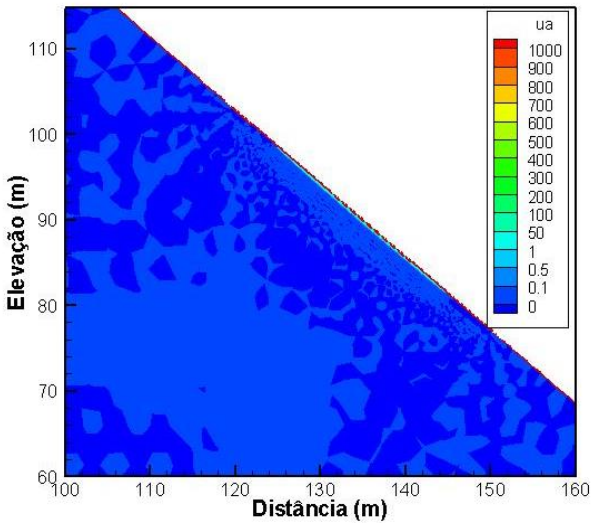
(c) t =0.0005 s



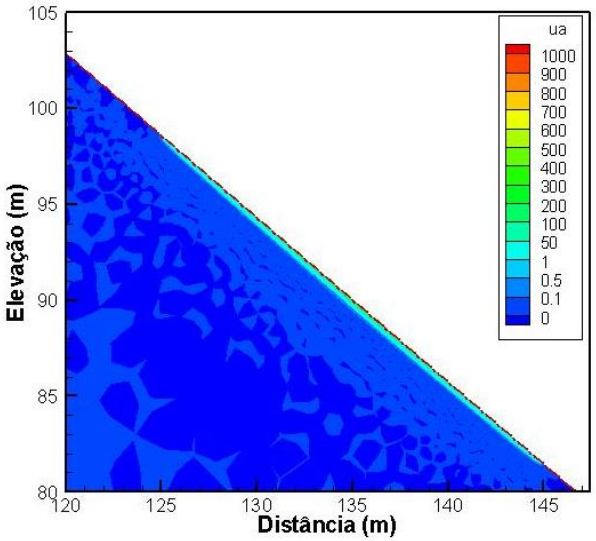
(d) t =0.0005 s (zoom)



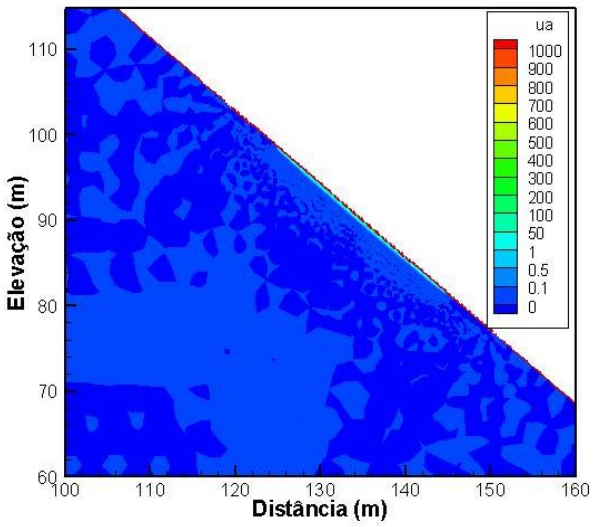
(e) t = 0.001 s (pico do pulso)



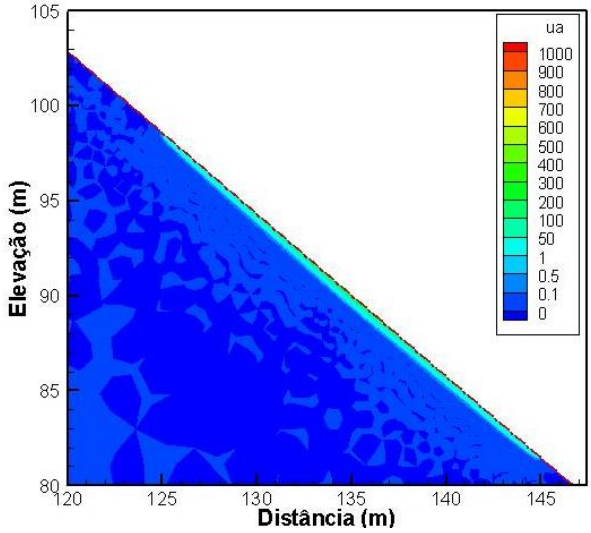
(f) t = 0.001 s (zoom)



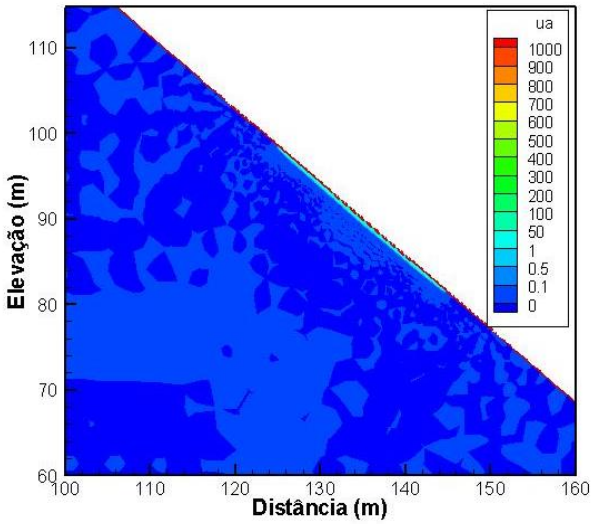
(g) t = 0.0015 s



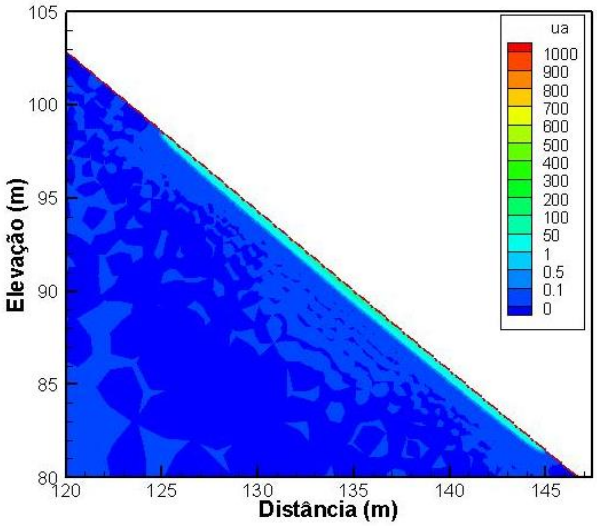
(h) t = 0.0015 s (zoom)



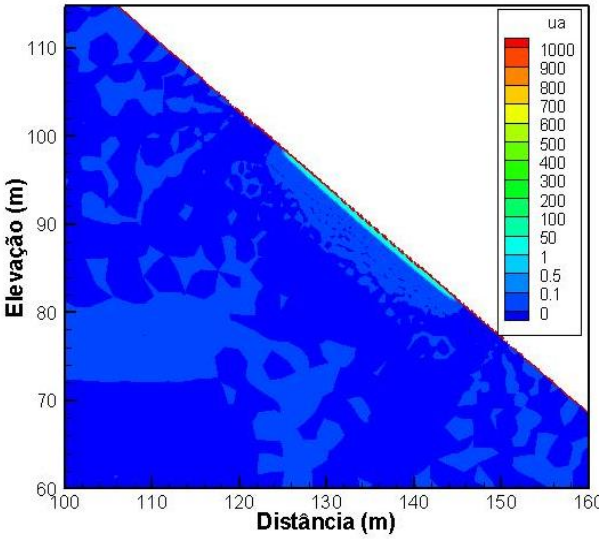
(i) t = 0.002 s (fim do pulso)



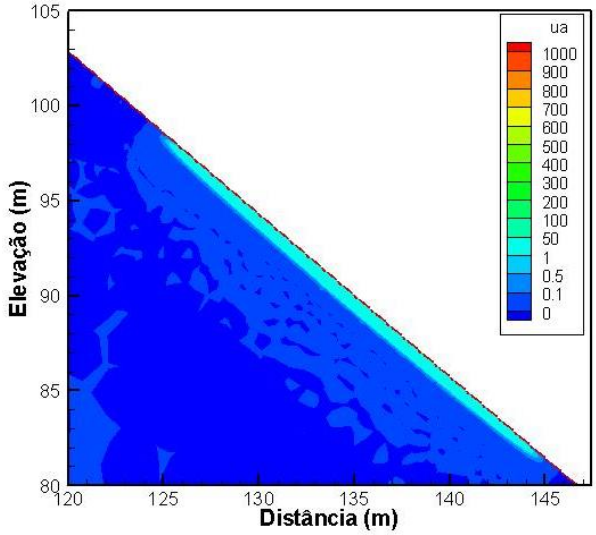
(j) t = 0.002 s (zoom)



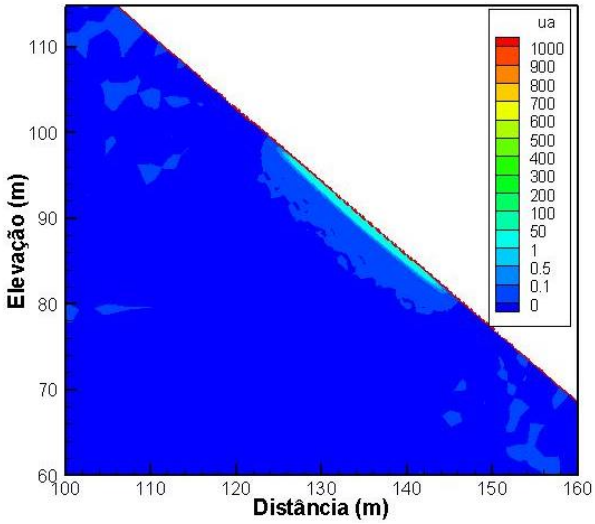
(k) t = 0.004 s



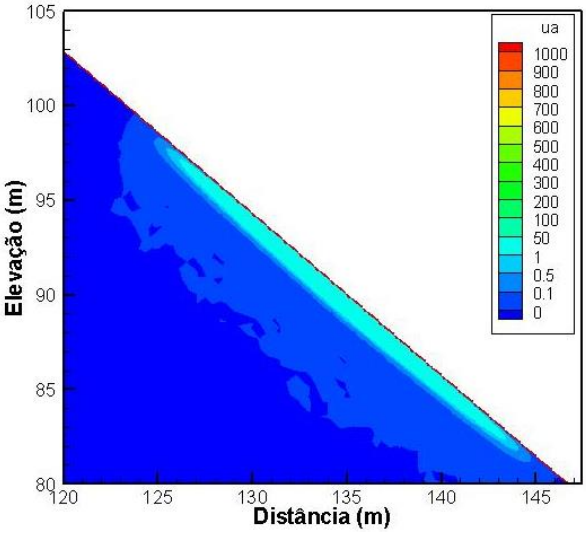
(l) t = 0.004 s



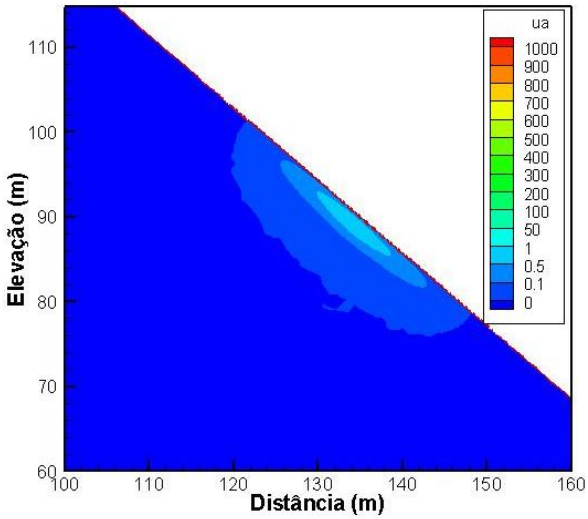
(m) t = 0.01 s



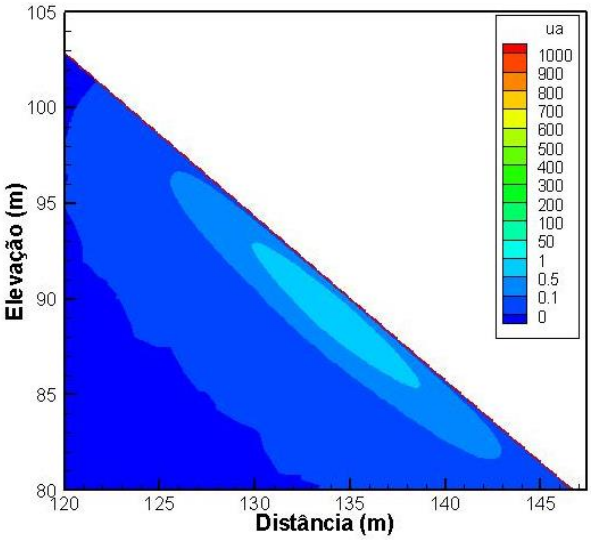
(n) t = 0.01 s (zoom)



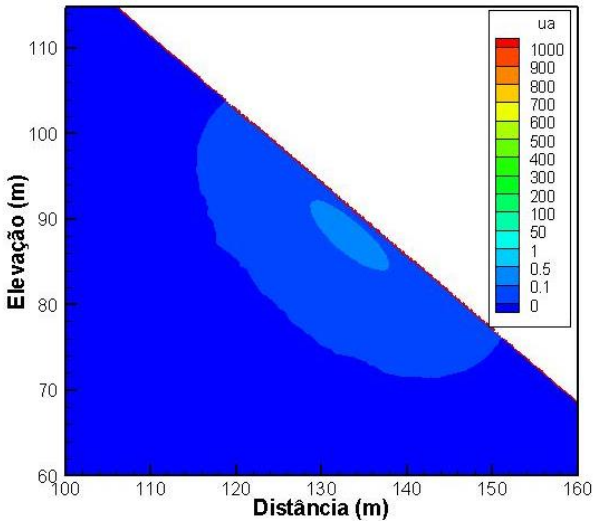
(o) t = 0.1 s



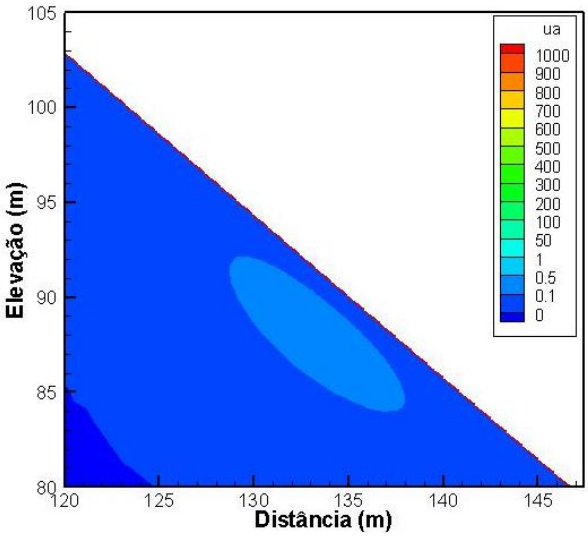
(p) t = 0.1 s (zoom)



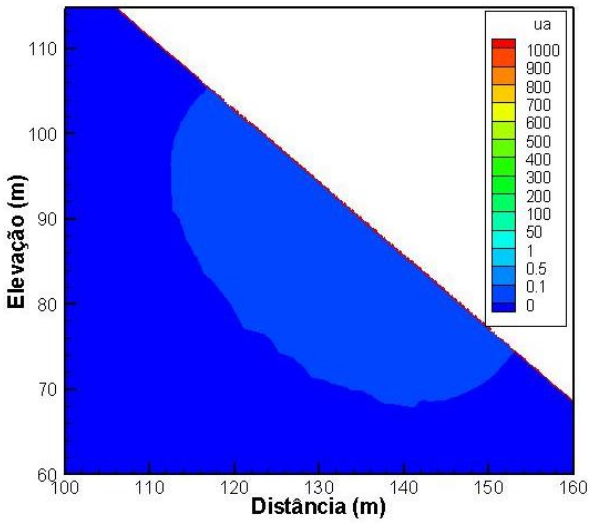
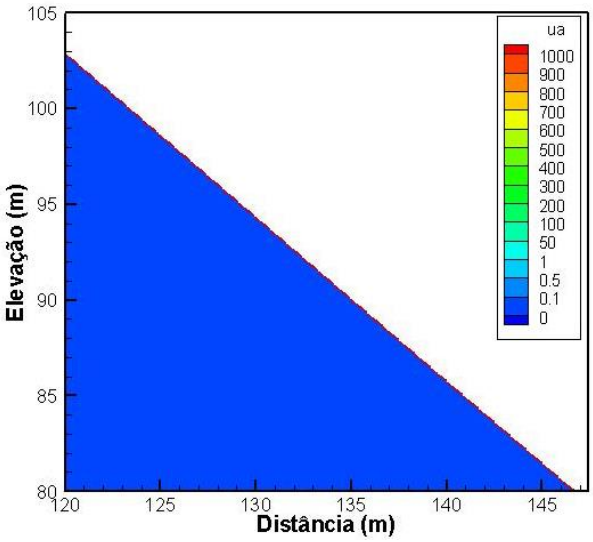
(q) t = 0.5 s



(j) t = 0.5 s (zoom)



(s) t = 1 s



(t) t = 1 s (zoom)