

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA APLICADA EM  
ANÁLISES DE FLUXO E ESTABILIDADE DE TALUDES**

**ARLAM CARNEIRO SILVA JÚNIOR**

**ORIENTADOR: PROF. MANOEL P. CORDÃO NETO, DSc.  
COORIENTADOR: PROF. GILSON DE F. N. GITIRANA JR., PhD.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA  
PUBLICAÇÃO: G.TD-111/15**

**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO/2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA APLICADA EM  
ANÁLISES DE FLUXO E ESTABILIDADE DE TALUDES**

**ARLAM CARNEIRO SILVA JÚNIOR**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

---

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc. (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**GILSON DE F. N. GITIRANA JR., PhD. (UFG)  
(COORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**FERNANDO ANTÔNIO MEDEIROS MARINHO, PhD. (USP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**FRANCISCO CHAGAS DA SILVA FILHO, DSc. (UFC)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 9 DE OUTUBRO DE 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA JÚNIOR, ARLAM CARNEIRO

Abordagem Rítmica Probabilística Aplicada em Análises de Fluxo e Estabilidade, Distrito Federal, 2015. xx, 137 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2015)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Solos não saturados

2. Solo-atmosfera

3. Análise de fluxo

4. Estabilidade de taludes

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA JÚNIOR, A. C. (2015). Abordagem Rítmica Probabilística Aplicada em Análises de Fluxo e Estabilidade. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-109/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arlam Carneiro Silva Júnior

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Abordagem Rítmica Probabilística Aplicada em Análises de Fluxo e Estabilidade

GRAU: Doutor / ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Arlam Carneiro Silva Júnior

Rua 404, Lote Área, Quadra 1F, Recanto Praças Residenciais, Condomínio 2, Casa 63, Setor Negrão de Lima

CEP: 74650-360

Goiânia/GO - Brasil

arlamjr@gmail.com

# DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado a todos os loucos por Geotecnia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Eu agradeço a todos que colaboraram para a composição desta tese.

Sou grato pela minha vida, pela Terra, pelo Sol, e pelo Universo. Sou grato a Deus.

Agradeço aos meus pais pela educação, e lições de vida. Pelo tempo dedicado a minha formação e pelo carinho. A todos os meus demais familiares, muito obrigado.

Agradeço aos professores que me ensinaram a escrever, a pensar e a somar. Obrigado pelo conhecimento transmitido, e a alguns, de forma especial, pela forma humana de transmissão. Aos orientadores deste trabalho, obrigado.

Agradeço aos meus amigos pela presença e incentivo.

Agradeço a minha esposa por compartilhar comigo a alegria de ser família.

Novamente, agradeço a Deus pela oportunidade de transmitir o que tenho de melhor para que o mundo seja melhor. Que eu seja verdadeiro, paciente e amigo, e que minhas lições sejam precisas, eficientes e aplicadas. E para que tudo tenha sentido, que sempre tenha amor.

## RESUMO

As condições atmosféricas e de fluxo subsuperficial, caracterizadas pelo ritmo e aleatoriedade, são responsáveis pelas mudanças na quantidade de água no solo, sendo sua consideração fundamental para a análise de estruturas geotécnicas. Infelizmente, a quantidade de fenômenos e parâmetros, sua aleatoriedade e o alcance temporal do problema, podem ser citados como fatores que tornam tal análise desafiadora. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um modelo de avaliação do fluxo de água no solo e de estabilidade de taludes que considere o comportamento rítmico do clima e incertezas associadas. O monitoramento e caracterização das condições atmosféricas, de umidade e sucção de um perfil de solo tropical entre 2010 a 2013 compreendem as bases para a metodologia da pesquisa. Foi proposto um arcabouço teórico que combina equações que descrevem o comportamento do solo, condições de contorno especiais, para modelagem da interação dos maciços com a atmosfera (i.e., precipitação, evapotranspiração, escoamento) e condições subsuperficiais. O modelo desenvolvido foi implementado utilizando o programa FlexPDE. Para a análise de estabilidade foi empregado o programa SAFE-DF. Foram empregados os métodos probabilísticos FOSM e APEM, considerando como incertezas parâmetros hidráulicos, de resistência e do clima. O monitoramento das condições do campo experimental permitiram a avaliação das técnicas de medição e a análise dos dados atmosféricos, nível do lençol freático e umidade e sucção do solo segundo o comportamento rítmico. A análise transiente de fluxo durante dois anos ofereceu boas previsões dos resultados obtidos durante o monitoramento em campo. Foram identificadas as influências das condições atmosféricas na camada superficiais do terreno e do fluxo subsuperficial nas camadas inferiores. Foram ainda obtidas as distribuições probabilísticas dos perfis de poropressão e discutidas várias metodologias de simplificação das condições de contorno. Pela aplicação da abordagem rítmica probabilística na avaliação dos taludes hipotéticos foi obtido um extenso conjunto de dados que fornecem a variação da probabilidade de ruptura e dos fatores de contribuição dos parâmetros considerados incertos ao longo de um ano chuvoso crítico e dois cenários de chuvas máximas, de diferentes durações. Os resultados obtidos favorecem a tomada de decisões e o gerenciamento de riscos na Geotecnia.

## **ABSTRACT**

The atmospheric condition, characterized by its rhythm and randomness, is the main cause for the change of water amount in the soil and its consideration in the flow analysis is essential for understanding and predicting the behavior of several types of geotechnical applications. The objective of this research is to develop an evaluation model of water flow in the soil and slope stability that considers the rhythmic behavior of the climate and the uncertainties related to the soil. The characterization and monitoring of water content and suction of a tropical soil profile are the basis for the methodology of this research which focuses on two practical applications: a probabilistic forecast of suction profiles considering the monitored tropical profile; and the analysis of the influence of the climatological rhythm in a system performance variable of two hypothetical slopes with different conditions of water level variation. The flow boundary conditions considered were: precipitation, evapotranspiration and groundwater flow. The analysis flow and tension were performed in FlexPDE software and the stability analysis at the program Safe-DF. Two probabilistic methods were used (FOSM and APEM) and the uncertainties considered were: properties associated with moisture flow, stability analyses and climate. The monitoring of experimental field was carried out from 2010 to 2013, allowing the evaluation of measurement techniques and the analysis of atmospheric data, water level, soil water content and soil suction according to the rhythmic behavior. A numerical model for moisture flow with duration of two years was implemented and water content and suction results were compared with the data monitored and considered satisfactory. The probability density function of pore pressure profiles was also obtained and various methods of simplifying boundary conditions were discussed. The rhythmic probabilistic approach was used to evaluate the hypothetical slope resulting in complex set of data that provides the variation of the probability of failure and sensitivity of uncertain parameters over a critical wet year, and two maximum precipitation events, considering different duration of the precipitation. The results favor the decision support system and the risk management in Geotechnical.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	3
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1	PESQUISAS FUNDAMENTADAS NA INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA ...	5
2.1.1	Agentes causadores de deslizamentos de terra .....	5
2.1.2	Relação entre os dados atmosféricos e o deslizamentos de terra.....	7
2.1.3	Sistemas de prevenção de deslizamentos.....	11
2.1.4	Interação solo-atmosfera em outras práticas geotécnicas.....	12
2.2	RELAÇÃO DA HIDROLOGIA COM A INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA..	14
2.3	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS APLICADOS À GEOTECNIA.....	19
2.3.1	Método da primeira ordem segundo momento (FOSM).....	22
2.3.2	Método alternativo de estimativas pontuais (APEM).....	23
2.3.3	Síntese sobre a aplicação dos métodos probabilísticos na Geotecnia e sua relação com a metodologia da pesquisa .....	25
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA .....	27
3	MODELO PROPOSTO E METODOLOGIA DA PESQUISA .....	28
3.1	ANÁLISE HIDROMECCÂNICA .....	29
3.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE .....	33
3.3	PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS .....	34
3.3.1	Curva característica solo água.....	34
3.3.2	Condutividade hidráulica.....	37
3.3.3	Deformabilidade e resistência ao cisalhamento.....	38
3.4	MODELAGEM SOLO-ATMOSFERA.....	39
3.4.1	Obtenção de dados meteorológicos .....	40
3.4.2	Caracterização do ano climático segundo o total de chuva.....	41

3.4.3	Modelagem da precipitação.....	43
3.4.4	Modelagem da evapotranspiração.....	44
3.4.5	Fluxo de água subsuperficial e função do nível d'água .....	46
3.4.6	Combinação das condições de contorno .....	48
3.5	ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA .....	50
3.5.1	Abordagem rítmica.....	50
3.5.2	Abordagem probabilística .....	52
3.5.3	Considerações finais sobre a abordagem rítmica probabilística.....	54
3.6	METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	55
3.6.1	Implementação das análises de fluxo e tensões no FlexPDE .....	57
3.6.2	Aplicação dos métodos probabilísticos .....	62
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
4	ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA APLICADA NA ANÁLISE DE FLUXO DE ÁGUA NO SOLO .....	66
4.1	DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO.....	66
4.1.1	Detalhamento do perfil de solo e suas propriedades .....	70
4.1.2	Avaliação comparativa do desempenho dos diversos métodos de medição de sucção .....	73
4.1.3	Variação temporal das condições de umidade e sucção do solo.....	79
4.2	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA .....	83
4.3	ANÁLISE NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUA .....	86
4.3.1	Geometria e características do perfil, e condição inicial .....	86
4.3.2	Condições de contorno .....	89
4.3.3	Dados considerados incertos.....	91
4.3.4	Avaliação do desempenho do modelo de fluxo proposto.....	92
4.3.5	Balanço de água.....	94
4.3.6	Distribuição probabilística de sucção.....	96
4.4	METODOLOGIAS DE SIMPLIFICAÇÃO DO PROBLEMA NUMÉRICO .....	99

4.5	DESAFIOS E DESEMPENHO DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	101
5	APLICAÇÃO DA ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES .....	102
5.1	GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS TALUDES HIPOTÉTICOS, E CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	102
5.2	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE .....	105
5.2.1	Cenário de ano habitual.....	106
5.2.2	Cenário de ano excepcional chuvoso .....	107
5.2.3	Cenários de chuvas máximas .....	108
5.3	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA .....	110
5.3.1	Cenário de ano habitual.....	111
5.3.2	Variação rítmica da sucção para pontos específicos nos taludes .....	112
5.3.3	Evolução dos parâmetros de desempenho e da superfície crítica.....	114
5.4	ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA NA PRÁTICA GEOTÉCNICA	124
6	CONCLUSÕES .....	127
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
	REFERÊNCIAS .....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Propagação das incertezas e do ritmo na obtenção de parâmetros de desempenho.....	2
Figura 2.1: Limiar de chuva - adaptada de Soares (2006). .....	9
Figura 2.2: Mecanismo de infiltração de água no solo. ....	15
Figura 2.3: Ciclo hidrológico-geotécnico.....	16
Figura 2.4: Distribuições de probabilidade de fator de segurança.....	26
Figura 2.5: Evolução da avaliação da segurança de taludes. ....	26
Figura 3.1: Visão geral da aplicação do modelo proposto. ....	28
Figura 3.2: Fluxograma da implementação da análise de fluxo.....	32
Figura 3.3: Fluxograma da implementação da análise de tensões.....	32
Figura 3.4: Metodologia para implementação da análise de estabilidade. ....	33
Figura 3.5: Esquema analítico do método da programação dinâmica.....	34
Figura 3.6: Curvas características solo-água típicas (adaptada de Gitirana Jr., 2005). .....	35
Figura 3.7: Construção da curva de ajuste bimodal. ....	36
Figura 3.8: Curvas de permeabilidade típicas (adaptada de Gitirana Jr., 2005). ....	37
Figura 3.9: Fluxograma da aplicação da modelagem solo-atmosfera proposta. ....	39
Figura 3.10: Caracterização climática em termos de totais anuais de chuva. ....	43
Figura 3.11: Chuva diária e chuva com distribuição parabólica.....	44
Figura 3.12: Função do nível d'água. ....	48
Figura 3.13: Condições de contorno para análise de fluxo.....	49
Figura 3.14: Metodologia de aplicação da abordagem rítmica probabilística em problemas de estabilidade de taludes. ....	54
Figura 3.15: Visão geral da metodologia. ....	55
Figura 3.16: Exemplos de telas do FlexPDE. ....	58
Figura 3.17: Aplicação da função SWAGE. ....	59
Figura 3.18: Transição de fluxo de água na fronteira solo-atmosfera com a variação da poropressão.....	61
Figura 3.19: Aplicação da abordagem probabilística. ....	63
Figura 3.20: Síntese da aplicação do modelo proposto.....	64
Figura 3.21: Avaliação de aplicações práticas pela consideração dos dados atmosféricos. ....	65

Figura 4.1: Campo experimental em Aparecida de Goiânia. ....	67
Figura 4.2: Disposição dos equipamentos no campo experimental.....	68
Figura 4.3: A) Tubo externo e tubo interno; B) Posição fechada; C) Posição aberta.	69
Figura 4.4: Limites de Atterberg, índice de vazios e condutividade hidráulica saturada do solo de Aparecida de Goiânia.....	71
Figura 4.5: Curvas granulométricas para o solo de Aparecida de Goiânia.....	71
Figura 4.6: A) Curvas característica solo-água para a profundidade de 1,00 a 1,50 m, B) Curvas características solo-água para a profundidade de 3,00 a 3,30. ....	73
Figura 4.7: Comparação entre teores de umidade dos papéis filtro. ....	75
Figura 4.8: Comparação de dados de sucção obtidos pelo tensiômetro e pelas CCSA matricial de secagem e molhagem. ....	75
Figura 4.9: Comparação de dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro e pelas CCSA total de secagem e molhagem. ....	76
Figura 4.10: Comparação de dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro e pelo tensiômetro. ....	77
Figura 4.11: A) Curvas características solo-água e dados de sucção obtidos em campo (1,00 a 1,50 m); B) Curvas características solo-água e dados de sucção obtidos em campo (3,00 a 3,30 m). ....	78
Figura 4.12: Comportamento rítmico no campo experimental.....	80
Figura 4.13: Sucção medida pelo papel filtro à 0,48 m de profundidade versus nível d'água.....	82
Figura 4.14: Síntese do ritmo do solo do campo experimental de Aparecida de Goiânia. ....	83
Figura 4.15: Possibilidades de acúmulo de dados de precipitação. ....	85
Figura 4.16: Características gerais do perfil do solo do campo experimental considerado na análise numérica. ....	87
Figura 4.17: A) Curvas características solo-água, B) Função de permeabilidade. ...	88
Figura 4.18: Dados atmosféricos monitorados no campo experimental.....	90
Figura 4.19: Nível d'água monitorado e função do nível d'água.....	91
Figura 4.20: Dados considerados incertos na análise de fluxo.....	92
Figura 4.21: Validação da análise de fluxo no tempo. ....	93
Figura 4.22: Validação da análise de fluxo na profundidade. ....	95
Figura 4.23: Balanço de água na análise de fluxo (valores acumulados).....	96

Figura 4.24: A) Distribuição probabilística de sucção ao longo do tempo – 0,48 m, B) Distribuição probabilística de sucção ao longo do tempo – 0,48 m, C) Coeficiente de variação da análise probabilística.....	97
Figura 4.25: Perfis probabilísticos de sucção. ....	98
Figura 4.26: Distribuição de sucção ao longo do tempo segundo metodologias de simplificação. ....	100
Figura 5.2: Geometria e características dos taludes hipotéticos. ....	102
Figura 5.1: Amplitude anual do nível d'água para os taludes hipotéticos. ....	103
Figura 5.3: Condições de contorno de fluxo e tensões.....	104
Figura 5.4: A) Cenários da curva característica solo-água; B) Cenários da função de condutividade hidráulica. ....	104
Figura 5.5: A) Malha dos elementos finitos para a análise de tensões; B) Malha dos elementos finitos para a análise de fluxo.....	106
Figura 5.6: Chuva diária de um ano habitual (1994).....	107
Figura 5.7: Chuva diária de um ano excepcional chuvoso (2011). ....	107
Figura 5.8: Chuva máxima para eventos de chuva contínua (alta intensidade e curta duração). ....	108
Figura 5.9: Chuva máxima para eventos de chuva acumulada diária (baixa intensidade e longa duração).....	109
Figura 5.10: Volume de água da chuva máxima de longa duração.....	110
Figura 5.11: A) Condição de poropressão inicial segundo o eixo vertical central do talude hipotético; B) Condição de poropressão inicial segundo o eixo vertical central do talude hipotético. ....	111
Figura 5.12: Variação do volume de água no cenário de ano habitual. ....	112
Figura 5.13: Pontos no talude para avaliação de sucção. ....	112
Figura 5.14: A) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “topo” do talude hipotético “A”; B) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “centro” do talude hipotético “A”, C) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “pé” do talude hipotético “A”.....	113
Figura 5.15: Fatores de segurança para diversas configurações do solo - talude hipotético “A” .....	115
Figura 5.16: Fatores de segurança para diversas configurações do solo - talude hipotético “B” .....	116

Figura 5.17: Fatores de desempenho ao longo de um ano para o talude hipotético “A”.	118
Figura 5.18: Fatores de desempenho ao longo de um ano para o talude hipotético “B”.	119
Figura 5.19: Evolução da superfície crítica e da distribuição de poropressão para o talude hipotético “A”	121
Figura 5.20: Fatores de desempenho ao longo dos cenários de chuvas máximas (talude hipotético “A”).	123
Figura 5.21: Abordagem rítmica probabilística na prática de avaliação de taludes de terra.	125

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Métodos para relacionar dados atmosféricos com deslizamentos. ....	8
Tabela 2.2: Coeficientes de variação típicos.....	21
Tabela 4.1: Chuvas mensais e anuais em milímetro de Goiânia (1992 - 2012).....	84
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na construção das CCSA bimodal e unimodal....	89
Tabela 5.1: Parâmetros do solo considerados incertos. ....	105

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$a$	- Parâmetro de ajuste da curva característica solo-água
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
APEM	- Método alternativo de estimativas pontuais (alternative point estimate method)
$B_E$	- Escoamento subsuperficial
$c'$	- Coesão efetiva
CCSA	- Curva característica solo-água
CV	- Coeficiente de variação
$c_i$	- Constante do ponto $i$
$d_j$	- Fator de peso
$d_{mol}$	- Número de dias do ano de molhagem
$d_{sec}$	- Número de dias do ano de secagem
$e$	- Índice de vazios
$e_0$	- Índice de vazios inicial
$E$	- Módulo de Young
$E_T$	- Evapotranspiração
$E_{T,P}$	- Evapotranspiração potencial
$E_{T,R}$	- Evapotranspiração real
$E[x]$	- Média de $x$
EDP	- Equação diferencial parcial
$f_{NA}$	- Função do nível d'água
FOSM	- Primeira ordem segundo momento (first order second moment)
$F$	- Fotoperíodo de um dia
$F_S$	- Fator de segurança estatístico
$g$	- Aceleração da gravidade
GL	- Granulômetro a laser
$h$	- Carga total
$H$	- Módulo elástico para estrutura de solo em relação à mudança de sucção
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
$i$	- Intensidade máxima média da precipitação
IDF	- Intensidade, duração e frequência

INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
$k^w, k$	- Condutividade hidráulica
$k_{sat}^w,$	- Condutividade hidráulica saturada
$k_{sat}$	
$k_{b1}^w$	- Condutividade hidráulica para o trecho $b1$
$k_{b2}^w$	- Condutividade hidráulica para o trecho $b2$
$k_{res1}^w$	- Condutividade hidráulica para o trecho $res1$
$n$	- Porosidade
$n_f$	- Quantidade de anos
$N$	- Fluxo de água na fronteira solo-atmosfera
$NA_{ini}$	- Nível d'água inicial
$NA_{max}$	- Nível d'água máximo anual
$NA_{méd}$	- Nível d'água médio
$NA_{min}$	- Nível d'água mínimo anual
NBR	- Norma Brasileira Regulamentadora
$p_{v,sat}$	- Pressão de saturação de vapor no ar próximo à superfície de solo
$p_v^a$	- Pressão de vapor no ar próximo à superfície de solo
$P$	- Precipitação
$P_C$	- Probabilidade condicional de que a instabilidade possa ocorrer
$P_M$	- Probabilidade de movimento de massa
$P_E$	- Probabilidade de ocorrência do evento crítico
$P_{acum}$	- Precipitação acumulada
$P_{efe}$	- Precipitação efetiva
$P_r$	- Probabilidade de ruptura
$P_t$	- Taxa de precipitação instantânea
PVC	- Policloreto de vinila
$r_i$	- Abertura do ângulo tangente
$R$	- Constante universal dos gases
$R_E$	- Escoamento superficial
$RH$	- umidade relativa no solo da superfície
$RH_a$	- Umidade relativa do ar próximo à superfície de solo
$R_i$	- Força de resistência do solo

$S_b$	- Grau de saturação correspondente ao segundo valor de entrada de ar
$S_i$	- Força de cisalhamento agindo sobre o solo
$S_{res}$	- Grau de saturação residual
$S_{res1}$	- Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de sucção residual
$S_{res2}$	- Grau de saturação correspondente ao segundo valor de sucção residual
$t$	- Tempo
$t_{dur}$	- Tempo de duração da chuva
$t_i$	- Tempo correspondente ao início da precipitação
$t_n$	- Função de passo de tempo
$t_f$	- Tempo correspondente ao fim da precipitação
$T$	- Temperatura
$T_{med}$	- Temperatura média mensal
$TR$	- Tempo de retorno
$u$	- Deslocamento na direção $x$
$u_a$	- Poropressão de ar
$(u_a - u_w)$	- Sucção matricial do solo
$u_w$	- Poropressão de água
$v$	- Deslocamento na direção $y$
$V[x]$	- Variância de $x$
$V_{w1}$	- Volume de água correspondente à integral da umidade volumétrica
$V_{w2}$	- Volume de água correspondente ao balanço de água
$w_C$	- Limite de contração
$w_L$	- Limite de liquidez
$w_n$	- Umidade gravimétrica natural
$w_P$	- Limite de plasticidade
$W_v$	- Peso molecular da água
$\bar{x}_n$	- Média da variável independente
$y$	- Elevação em relação a um determinado referencial

$\alpha$	- Ângulo formado pelo cruzamento entre a superfície do talude e a uma superfície horizontal
$\gamma_n$	- Peso específico natural
$\gamma_w$	- Peso específico da água
$\epsilon$	- Erro de conservação de massa
$\theta$	- Umidade volumétrica
$\theta_0$	- Umidade volumétrica inicial
$\theta_i$	- Ângulo de rotação da hipérbole
$\lambda_d$	- Inclinação da curva característica solo-água
$\lambda_i$	- Declividade de dessaturação
$\mu$	- Coeficiente de Poisson
$\mu_m[FS(X)]$	- Momento estatístico de ordem $m$ do fator de segurança
$\rho[x_i, x_j]$	- Coeficiente de correlação entre $x_i$ e $x_j$
$\sigma_i$	- Tensão normal atuando no plano $i$
$\sigma_{i0}$	- Tensão normal inicial atuando no plano $i$
$(\sigma_n - u_a)$	- Tensão líquida
$\tau_{ij}$	- Tensão cisalhante atuando no plano $i$ , na direção $j$
$\tau_{ij0}$	- Tensão cisalhante inicial atuando no plano $i$ , na direção $j$
$\tau_f$	- Resistência ao cisalhamento
$\varphi_i$	- Constante de período
$\phi'$	- Ângulo de atrito efetivo
$\phi^b$	- Ângulo de atrito interno relacionado à sucção matricial
$\psi$	- Sucção
$\psi_b$	- Valor de entrada de ar
$\psi_{b1}$	- Primeiro valor de entrada de ar
$\psi_{b2}$	- Segundo valor de entrada de ar
$\psi_m$	- Sucção matricial
$\psi_{res1}$	- Primeiro valor de sucção residual
$\psi_{res2}$	- Segundo valor de sucção residual
$\psi_{sup}$	- Sucção no solo da superfície
$\psi_t$	- Sucção total
$\psi_\pi$	- Sucção osmótica

$\omega$

- Amplitude do nível d'água

$\Delta V_w$

- Variação da quantidade de água no interior do solo

# 1 INTRODUÇÃO

As condições climáticas atuam na fronteira solo-atmosfera como uma complexa e dinâmica condição de contorno de fluxo, alterando a quantidade de água na zona não saturada e, conseqüentemente, definindo a distribuição de poropressão de água no interior do solo. As variações de poropressões são determinantes para o comportamento e desempenho de maciços, principalmente na região próxima à atmosfera e vários tipos de estruturas civis. Infelizmente, o entendimento de como se dá a variação da distribuição de poropressão de água, em resposta à ação das condições climáticas, e suas conseqüências para o comportamento dos solos ainda possui importantes lacunas, apesar do esforço de vários pesquisadores (Wilson, 1990; Gitirana Jr., 2005; Fredlund *et al.*, 2012; Teixeira *et al.*, 2014, etc).

Taludes naturais ou artificiais, barragens, aterros, pavimentos, fundações, e obras de cobertura são exemplos clássicos de aplicações geotécnicas onde a compreensão da relação solo-atmosfera é relevante. Para estas aplicações, dois períodos de avaliação podem ser considerados: 1) pré-construção: projeto, cronograma, orçamento e viabilidade de estruturas geotécnicas e 2) pós-construção: monitoramento de desempenho. No caso de projetos, as informações climatológicas devem ser, a priori, aquelas que retratam as condições típicas e que permitem a determinação, de forma estatística, de situações críticas que atuarão durante a vida útil da estrutura. Nesse caso, as informações climatológicas históricas são obtidas por medições em um determinado local ou extrapoladas a partir de observações de locais próximos. No caso de problemas de monitoramento de desempenho, a previsão atmosférica passa a ser a informação necessária. Tratam-se, portanto, de dois tipos de informações climatológicas relevantes que possuem diferentes fontes e que envolvem incertezas de diversas naturezas.

A respeito da relação entre o solo e a atmosfera, surgem frequentemente alguns questionamentos: 1) qual a faixa esperada de flutuação da sucção e umidade do solo? 2) qual a profundidade da zona submetida a tais flutuações? 3) quais condições atmosféricas extremas produziram flutuações de umidade e sucção que comprometeriam o desempenho da estrutura em questão? Pode-se afirmar que a dificuldade de responder tais questões colaboram para que a aplicação dos

conhecimentos sobre solos não saturados na prática de engenharia geotécnica seja ainda restrita, o que se torna uma grande motivação para a presente pesquisa.

Buscando aplicar conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados e da Climatologia em problemas de fluxo de água no solo e estabilidade de taludes, o trabalho se apoia em duas abordagens: uma probabilística e outra rítmica. A abordagem probabilística é baseada na aplicação de métodos probabilísticos na avaliação de parâmetros que dependem de dados de entrada incertos. Enquanto a Climatologia possui tradicionalmente um enfoque probabilístico (Ahrens, 2009), no meio geotécnico a abordagem probabilística é utilizada de forma mais restrita (Baecher & Christian, 2003; Griffiths & Fenton, 2007; Phoon, 2008). A abordagem rítmica, por sua vez, é um conceito utilizado neste trabalho para representar as análises que consideram como condições de contorno do solo, dados que possuem um padrão rítmico (i.e. cíclico ou, ainda, periódico) bem definido. A proposta apresentada neste trabalho de emprego da abordagem rítmica está diretamente relacionada à observação do padrão rítmico de dados atmosféricos anuais e ao padrão rítmico de variação do lençol freático.

Como a variação da quantidade de água do solo depende de dados atmosféricos considerados incertos e periódicos, é esperado que tais considerações possam se propagar para as variáveis que descrevem o estado do solo, e para variáveis de desempenho, como o fator de segurança, por exemplo. A Figura 1.1 ilustra a interação que existe entre a atmosfera e o solo, e a propagação do ritmo atmosférico nos parâmetros de desempenho. De fato, na tentativa de analisar a interação solo-atmosfera, a consideração das propagações do ritmo e das incertezas, são fundamentais.

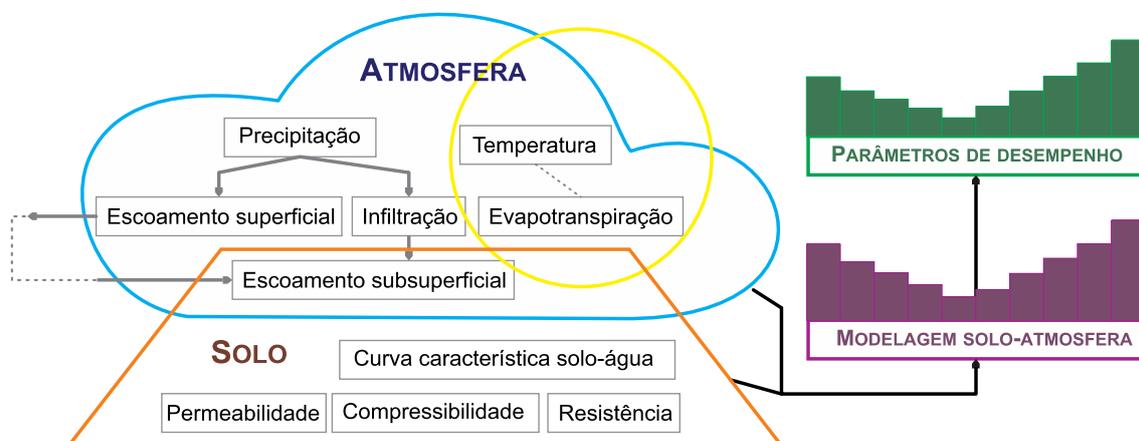


Figura 1.1: Propagação das incertezas e do ritmo na obtenção de parâmetros de desempenho.

O presente trabalho, ao propor metodologias para que os dados climatológicos sejam aplicados em problemas de análise de fluxo de água no solo e estabilidade de taludes, colabora para utilização de abordagens probabilísticas e conceitos de Mecânica dos Solos Não Saturados na prática geotécnica, e oferece resultados que repercutem a evolução de fatores de desempenho de obras geotécnicas ao longo do tempo. Destaca-se, como principal justificativa para o trabalho, a necessidade dos profissionais responsáveis pela tomada de decisões e gerenciamento de risco na engenharia por dados de qualidade que representem o desempenho de obras geotécnicas. Outros temas que estão relacionados com o presente trabalho são: seguro de obras, escorregamento de terras, processos de infiltração, vida útil da estrutura, entre outros.

## **1.1 OBJETIVOS**

O principal objetivo do presente trabalho é desenvolver um modelo de avaliação de fluxo de água no solo e estabilidade de taludes que considere o comportamento rítmico do clima e as incertezas associadas ao solo e à atmosfera, e forneça parâmetros para a análise de longa duração. São objetivos secundários do trabalho:

- Monitorar e interpretar as condições atmosféricas e de um perfil de solo tropical de um campo experimental específico.
- Indicar métodos para a aplicação de dados climatológicos na prática geotécnica, analisando as formas como esses podem ser tratados em casos específicos de obras geotécnicas.
- Realizar uma análise de fluxo considerando o perfil de solo tropical e as condições atmosféricas monitoradas.
- Apresentar a aplicação da abordagem rítmica probabilística proposta na análise da estabilidade de um talude hipotético.

## **1.2 ESTRUTURA DA TESE**

Neste capítulo foram apresentados uma visão geral do tema proposto, alguns dos principais conceitos relacionados à avaliação da interação solo-atmosfera, além dos objetivos do trabalho. A continuidade da tese tem como principais marcos a revisão de literatura, a proposta de um modelo solo-atmosfera e aplicações práticas.

A revisão de literatura apresenta trabalhos relacionados com a interação solo-atmosfera, conceitos probabilísticos aplicados na Geotecnia, e fundamentos de hidrologia. O foco prático na revisão de literatura é a apresentação de métodos que relacionam deslizamentos de terra e dados atmosféricos.

Em seguida, é proposto um modelo para análise de problemas geotécnicos específicos, submetidos aos efeitos do clima, focando na análise de fluxo de água no solo e na análise da estabilidade de taludes pela aplicação da abordagem rítmica probabilística. No modelo são consideradas equações diferenciais parciais que governam o fluxo de água no solo e o equilíbrio de forças estáticas, e uma complexa modelagem solo-atmosfera para aplicações transientes de longa duração.

Por fim, são apresentadas e discutidas duas aplicações práticas: 1) a análise probabilística de fluxo de água no solo considerando um perfil de solo tropical, e 2) a análise probabilística da estabilidade de taludes considerando o ritmo dos dados climatológicos.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Buscando fornecer discussões relevantes que contribuam para o desenvolvimento e análise do modelo que será proposto no Capítulo 3, é apresentado a seguir uma revisão de literatura focada em pesquisas que consideram os elementos atmosféricos na prática geotécnica, dando ênfase à estabilidade de taludes. Serão, ainda, abordados brevemente outros assuntos específicos que contribuirão para a compreensão do modelo proposto; entre os assuntos estão: Hidrologia e Métodos Probabilísticos.

### **2.1 PESQUISAS FUNDAMENTADAS NA INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA**

Grande parte dos trabalhos que relacionam solo e condições climáticas se preocupam com a estabilidade dos taludes pela sua relação direta com os desastres gerados pelos deslizamentos de terra. Carvalho *et al.* (2013) cita que no período de 1988 a 2013 foram registradas 3332 mortes associadas a deslizamento de terra em todo país. Foram atingidos 223 municípios e os Estados que mais enfrentam o problema são: Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Bahia e Pernambuco. Os deslizamentos são, portanto, um tema relevante e atual, e estudos que tratam da sua relação com os dados atmosféricos colaboram para que novos eventos sejam evitados.

#### **2.1.1 Agentes causadores de deslizamentos de terra**

A estabilidade de um talude de solo pode ser estudada em termos básicos pela relação entre a força resistente e a força atuante, conhecida como fator de segurança. Compõem a força atuante o peso próprio do solo e carregamentos externos. A força resistente do solo está diretamente relacionada à sua resistência ao cisalhamento que, por sua vez, está relacionada com o aumento das poropressões de água.

O principal agente causador de escorregamentos em geral, considerando o solo não saturado, é a água, pois ela, além de aumentar o peso específico natural do solo (e aumentar a força atuante), diminui a resistência ao cisalhamento do mesmo devido a diminuição de tensões efetivas ao longo do perfil pelo aumento das poropressões de água.

Na procura por um limite matemático que indique a instabilidade, a consideração do fluxo de água na fronteira solo-atmosfera é essencial. Se por um lado existe a importância das chuvas, que favorecem a instabilidade, por outro existe a necessidade da compreensão dos eventos de evapotranspiração que atuam em favor da estabilidade dos taludes. Para Rahardjo *et al.* (2007), a redução do fator de segurança é diretamente proporcional à intensidade e duração da precipitação, de forma que estas variáveis, juntamente com as propriedades do solo, configuram-se como os fatores principais que controlam a estabilidade de encostas.

A água, além de atuar como um agente deflagrador de deslizamentos, pode ser também um agente preparatório. Nas encostas não saturadas as chuvas antecedentes podem ser preparatórias, pois a infiltração promove o aumento do grau de saturação do solo – e a redução da sucção – que associado a uma chuva mais intensa pode causar o escorregamento. Wolle (1988) definiu dois tipos de mecanismos possíveis de instabilização associados a variação de água no interior do perfil do solo:

- Mecanismo Clássico (elevação do nível de água pré-existente, devido ao fluxo da água infiltrada): neste mecanismo a ruptura no talude é determinada por uma elevação quase que instantânea do nível freático, que pode ocorrer quando a frente de umedecimento atinge o lençol freático. Este fato gera um acréscimo brusco nos valores de poropressão de água no perfil de solo, o que acarreta a ruptura dos taludes devido à diminuição das tensões efetivas. A elevação gradual do nível de água também pode ser provocada pela formação de uma rede de fluxo paralela ao talude.
- Mecanismo Alternativo (infiltração, com formação de frente de umedecimento em encostas sem nível de água pré-existente): em solos não saturados, a eliminação ou mesmo a redução da sucção devido à infiltração da água das chuvas, provoca a diminuição – e até mesmo a anulação – do intercepto de coesão do solo. A ruptura ocorre quando a frente de umedecimento atinge uma profundidade crítica, na qual os parâmetros de resistência não mais garantem a estabilidade do talude.

Portanto, considerando a ação da chuva e da evapotranspiração, as condições atmosféricas podem afetar a magnitude e frequência dos deslizamentos através da

interação solo-água (Iverson, 2000; Bogaard & Asch, 2002). Porém, o perfil do solo, pertencendo à uma bacia hidrográfica específica, também sofre a influência de chuvas de outras localidades. Por isto, segundo Malet *et al.* (2007), combinar análises locais e regionais é necessário para minimizar os efeitos dos fatores predisponentes (tais como as condições geomorfológicas e o histórico do talude) e facilitar as relações entre o clima e os deslizamentos. O desenvolvimento de uma análise solo-atmosfera local que considera a influência da bacia hidrográfica no fluxo basal (i.e. que acontecem na base do perfil do solo), é uma alternativa e será melhor discutida na apresentação do modelo proposto.

Além da ação do clima, muitos outros fatores podem contribuir para o rompimento de taludes além da infiltração de água: a atividade sísmica, a atividade humana ou fatores combinados. A atividade humana pode ser considerada, atualmente, o fator mais difícil de ser controlado e mais impactante na análise de rompimentos de taludes. Kormann *et al.* (2013) ressalta ainda a complexidade dos eventos instabilizantes que podem não ocorrer devido a um fator específico, como a atuação direta e de curto prazo de precipitações intensas, mas que estão sujeitos a processos a longo prazo, tais como expansões e contrações dos solos e rochas. Camapum de Carvalho (2013) cita ainda efeitos peculiares que podem deflagrar o movimento de massa: trovões e degradação estrutural do solo em médio e longo prazo.

As análises que serão realizadas no desenvolvimento do presente trabalho consideram apenas a contribuição das condições atmosféricas como causas para as variações dos fatores de segurança dos taludes. Condições estas que são consideradas como o principal agente deflagrador do deslizamento e que possui um ciclo bem determinado pela definição de clima. No Brasil, por exemplo, o clima tropical contribui para a formação de solos espessos e possui um ritmo interanual bem definido pelos períodos chuvosos e secos, viabilizando, assim, a aplicação do clima como um agente cíclico em análises de fluxo de água no solo.

### **2.1.2 Relação entre os dados atmosféricos e o deslizamentos de terra**

A preocupação com os deslizamentos de terra não é exclusiva dos engenheiros geotécnicos. Os Geógrafos, geólogos e matemáticos, entre outros, também apresentam esforços para compreender o fenômeno do deslizamento. Na Tabela 2.1

são apresentados quatro métodos distintos para relacionar dados atmosféricos com deslizamentos.

Tabela 2.1: Métodos para relacionar dados atmosféricos com deslizamentos.

Método		Descrição	Área	Referência
1	Correlação empírica	Correlação empírica entre dados históricos de precipitação e deslizamentos.	Engenheiros e Geógrafos	Tatizana <i>et al.</i> (1987a, b)
2	Comparação de mapas	Comparação de mapas cartográficos de deslizamentos de terra com mapas de chuvas (isoietas).	Geógrafos	Azevedo (2011)
3	Modelagem solo-atmosfera	Modelos matemáticos para previsão das variações de quantidade de água no interior do solo a partir das variações climáticas.	Engenheiros e matemáticos	Gitirana Jr. (2005)
4	Monitoramento	Monitoramento de estações atmosféricas, piezômetros e deslocamentos.	Engenheiros e Geógrafos	Malet <i>et al.</i> (2005)

Segundo Pedrosa (1994), quase todos os trabalhos que tratam das correlações entre deslizamentos e chuvas visam encontrar um indicador da previsibilidade da chuva crítica. Em geral esta variável encontra-se atrelada à chuva horária, à chuva diária ou à chuva antecedente. A determinação da correlação permite, por exemplo, alertar previamente os moradores de áreas de risco sobre a possibilidade de escorregamentos pela implantação de um programa de monitoramento das condições pluviométricas locais.

Desta relação entre chuvas e escorregamentos podem ser obtidos os limiares de chuva que indicam um limite entre os eventos de chuva que provavelmente não causarão deslizamentos e os eventos de chuva que provavelmente causarão deslizamentos. Os limiares de chuva são traçados, geralmente, em termos da precipitação acumulada do dia do escorregamento e da precipitação acumulada de um período anterior ao evento, podendo esse período ser de um dia ou até meses. Chuva total acumulada, chuva antecedente ao evento, duração e intensidade de chuva, são os parâmetros mais frequentemente investigados como limiares para os movimentos de massa (Aristizábal *et al.*, 2010). A Figura 2.1 apresenta um exemplo de limiar de chuva obtido pela relação entre a precipitação acumulada de 24 horas do dia do escorregamento e a precipitação acumulada de três dias antecedentes ao evento relacionadas com eventos de deslizamento. Entre as propostas de correlação

entre a duração e a intensidade das chuvas com os escorregamentos, as propostas de Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana *et al.* (1987a, b) são as mais difundidas na literatura nacional (Futai *et al.*, 2011).

No município do Rio de Janeiro, por exemplo, foi desenvolvido, através da Fundação Geo-Rio, um estudo relacionando chuvas e deslizamentos com o objetivo de implantar um sistema de alerta para evitar acidentes devido aos deslizamentos de terra ativados pela precipitação. Nesse estudo, baseado em pesquisas de Tatizana *et al.* (1987a, b) e Geo (1996), foram correlacionadas as precipitações acumuladas de períodos antecedentes ao dia do deslizamento, e a precipitação horária imediatamente anterior ao evento. O grande número de correlações possibilitou a construção de limiares de chuva favorecendo para o desenvolvimento de sistemas de alerta e difusão da utilização da correlação empírica no Brasil.

Soares (2006) relacionou os eventos de precipitação e os deslizamentos para a região de Angra dos Reis, a partir da aplicação do método de Tatizana *et al.* (1987 a, b), utilizando os dados diários de precipitação (acumulados de 24 horas). Para a análise dos resultados, foram gerados os limiares de chuva para as séries temporais de acumulados de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 e 30 dias de chuva e o melhor limiar de chuva foi obtido pela relação entre a chuva acumulada de dois dias antecedentes ao evento e a chuva acumulada do dia do evento.

Outros trabalhos também apresentam seus melhores limiares de chuva considerando chuvas acumuladas entre 2 e 5 dias (Tatizana *et al.*, 1987a; Castro, 2006; Elbacha *et al.*, 1992; Almeida *et al.*, 1993; Salaroli, 2003; e Vieira, 2004).

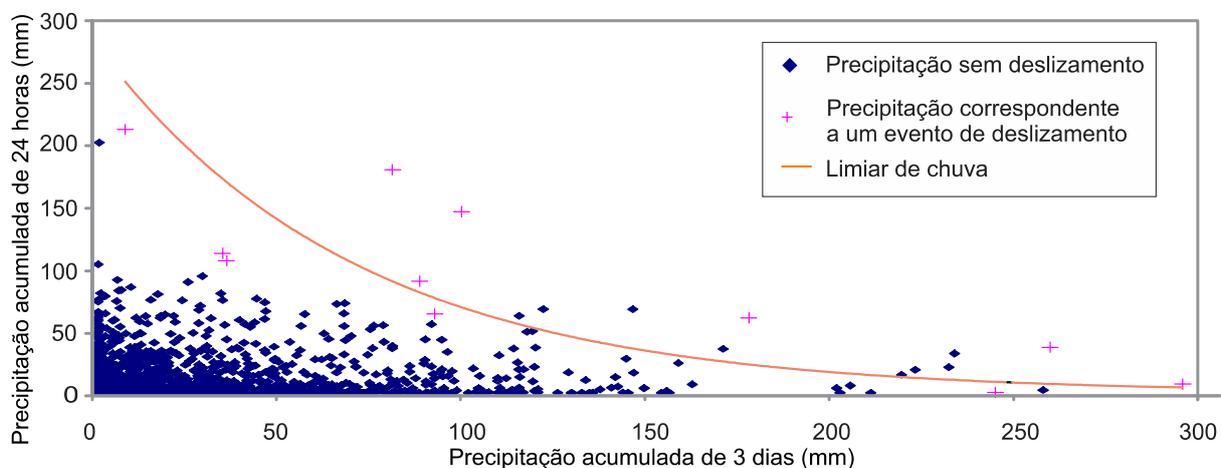


Figura 2.1: Limiar de chuva - adaptada de Soares (2006).

Toll *et al.* (2001) verificaram, ainda, que a chuva antecedente tem um papel importante na distribuição da poropressão de água durante um evento chuvoso atual, de forma que, quando seus valores iniciais já se encontram elevados, uma forte precipitação consegue imprimir apenas uma pequena mudança na distribuição de da mesma. Por outro lado, quando as medidas iniciais de poropressão encontram-se baixas, um pequeno evento chuvoso pode ser o suficiente para proporcionar uma grande mudança sua distribuição, dependendo das características do solo.

A chuva antecedente pode, no entanto, apresentar diferentes importâncias dependendo da natureza do talude de terra e do tipo de movimento de massa. Delmonaco *et al.* (1995) afirmam que, de forma geral, os movimentos de massa profundos estão relacionados às chuvas antecedentes acumuladas de vários dias, enquanto que movimentos de massa superficiais são mais dependentes das chuvas de curtas durações. Para os solos com baixa permeabilidade, a chuva antecedente acumulada também apresenta grande importância. Para os taludes escavados os limiares podem ser menores quando comparados às encostas naturais considerando zonas semelhantes (Montoya, 2013).

Araki (2007), relacionando padrões de precipitação e escorregamentos desenvolvidos na cidade de Guarujá, concluiu que as ocorrências mais atuais, além de se apresentarem em maior quantidade, foram deflagradas por totais pluviométricos diários menores. Foi atribuído a esse quadro alterações de atributos naturais, que no passado conferiam maior estabilidade ao local, tais como vegetação e modificação na morfologia pela intensificação da ação antrópica. Como os limiares de chuva não consideram dados mais específicos na sua conceituação como, o mecanismo de ruptura, a geometria do talude e a variabilidade espacial do solo, sua aplicação deve ser realizada com muito critério. Recomenda-se que os limiares de chuva sejam desenvolvidos paralelamente a programas de monitoramento e modelos matemáticos específicos para a fronteira solo-atmosfera analisada, para que sua aplicação seja mais eficiente.

Outro método para relacionar dados atmosféricos com deslizamentos é a modelagem solo-atmosfera (quarto método apresentado na Tabela 2.1). Este método de análise de estabilidade de taludes, baseado em modelos físicos, é um instrumento importante

para avaliar o impacto dos eventos atmosféricos sobre os deslizamentos de terra (Anderson & Kemp, 1998).

Gitirana Jr. (2005) desenvolveu um modelo teórico para avaliação de problemas de estabilidade de aterros, relacionados ao clima, utilizando equações diferenciais parciais (EDPs) para modelar o fluxo de água no estado líquido e de vapor, e o fluxo de calor no solo. Considerando várias configurações de taludes submetidas a eventos de precipitação e evapotranspiração constantes, o autor focou na avaliação do desenvolvimento dos parâmetros de desempenho de estabilidade ao longo de 14 dias. A metodologia desenvolvida se mostrou uma excelente ferramenta para o gerenciamento de riscos e os resultados foram considerados satisfatórios.

A capacidade da modelagem solo-atmosfera em traduzir as mudanças das condições de contorno de forma lógica e coerente para o solo é uma vantagem potencial sobre as abordagens mais empíricas (como o método de correlação empírica, por exemplo). Uma desvantagem da modelagem solo-atmosfera é a necessidade de uma grande quantidade de dados para sua validação. Isso faz com que esses modelos não sejam tão facilmente aplicáveis nas avaliações práticas e, por estas razões, os modelos empíricos ainda são bastante usados.

O modelo proposto na presente pesquisa fundamenta-se no método de modelagem solo-atmosfera. Porém, busca-se aproximar as condições de contorno das observações atmosféricas experimentais, focando na avaliação transiente do estado do solo e dos parâmetros de desempenho.

### **2.1.3 Sistemas de prevenção de deslizamentos**

Não é possível, no entanto, evitar os desastres relacionados aos deslizamentos de taludes somente com o desenvolvimento do conhecimento teórico e aplicações estruturais de estabilização. É de suma importância um comprometimento político-social que objetive a transmissão do conhecimento sobre os perigos da ocupação desordenada. Mendonça & Lucena (2013) citam ações preventivas não estruturais que devem ser valorizadas no sentido de evitar maiores catástrofes: 1) sistema de alarme, 2) atividades socioeducativas, 3) elaboração de plano municipal de redução de desastres, e 4) ações previstas em planos de contingência.

Uma das maneiras de reduzir os danos causados por desastres relacionados aos deslizamentos é aumentar a prevenção pela implantação de sistemas de alerta à população (Wilson, 2005). Programas de prevenção de deslizamento de terra têm sido baseados em investigações específicas *in loco*, programas de monitoramento de movimento-deslocamento (Matet *et al.*, 2005), e modelos estatísticos (Guzetti *et al.*, 2007; Wilson, 2005). Os programas de prevenção se relacionam diretamente com o monitoramento de obras geotécnicas, que será trabalhado nos próximos capítulos.

O sistema de alerta da cidade do Rio de Janeiro (Alerta-Rio), inaugurado em 1996, considera a chuva como o agente deflagrador do escorregamento (Nunes *et al.*, 2013). Seu funcionamento é baseado nos dados de uma rede de pluviômetros que permite o acompanhamento das chuvas a cada 15 minutos, e uma equipe técnica que pode acionar o alarme caso seja detectada uma grande chuva com potencial para gerar o escorregamento. Orsi (2013) destaca também Califórnia (EUA), Japão e Hong Kong como outros detentores de sistemas de alerta.

O sistema de instrumentação é uma ferramenta eficaz no monitoramento de encostas, potencialmente instáveis, por fornecer informações que favorecem entendimento do comportamento da massa do solo, por permitir a determinação de possíveis superfícies de ruptura e identificar os movimentos de massa. Dentre os parâmetros que podem ser monitorados, os principais são poropressões e deslocamentos. Azevedo (2011) observa a necessidade da adoção de critérios de alertas capazes de contemplar as suas particularidades de cada região. Esta medida permite uma maior eficácia quanto à previsão da ocorrência de acidentes por parte do sistema de alerta.

#### **2.1.4 Interação solo-atmosfera em outras práticas geotécnicas**

Considerar a interação solo-atmosfera em outras práticas geotécnicas, como contenções, fundações e sistemas de cobertura, além de naturalmente necessário, podem colaborar para sistemas mais seguros e econômicos. Nas contenções e fundações, por exemplo, considerar a zona não saturada do solo contribui para projetos mais específicos e eficientes visto que os valores de sucção correspondentes à zona não saturada alteram a resistência do solo. Outras práticas serão apresentadas a seguir.

Rocha (2013) estudou a influência da sucção no dimensionamento de uma estrutura de contenção pela aplicação da teoria de Rankine expandida para solos não saturados. Foram utilizadas condições reais de precipitação aplicadas a três solos distintos, e avaliadas as influências do nível d'água inicial e da profundidade de escavação no resultado final. Simulando o fluxo de água com diferentes coeficientes de permeabilidade, a autora cita que o parâmetro em questão controla significativamente o processo de infiltração no solo e que menores valores de coeficientes de permeabilidade implicam em frentes de molhagem mais rasas. Ainda segundo Rocha (2013), a duração e intensidade da precipitação tem grande influência na profundidade da frente de molhagem e afeta a sucção mantida na superfície.

Cardenas *et al.* (2013) utilizando uma modelagem numérica que considera a sucção do solo, mostrou a influência da chuva no comportamento de estruturas de contenção tipo estacas justapostas em Brasília pela consideração de uma chuva diária uniforme. Os autores concluem que a inclusão dos dados de precipitação na modelagem numérica garantem resultados confiáveis para um trabalho de validação.

Vianna (2005), analisando os recalques de fundações rasas assentadas em um solo arenoso não saturado, identificou que o aumento da sucção provoca um aumento substancial na capacidade de carga do sistema placa-solo e uma diminuição considerável nos recalques. Costa (1999) também comprovou a grande influência da sucção na capacidade de carga de fundações diretas.

Cardoso (2014) estudou a influência do clima na funcionalidade de estruturas geotécnicas com foco nos deslocamentos sazonais. Foram consideradas uma barragem, um talude e um aterro experimental. Segundo a autora, a consideração da variação do grau de saturação e da sucção na modelagem do comportamento do solo é fundamental para efetuar o cálculo dos deslocamentos de estruturas geotécnicas sensíveis ao clima, adquirindo grande valor prático em casos, por exemplo, de estimativas de custos de manutenção de aterros ferroviários.

Na aplicação de coberturas seca de solo é também fundamental a análise da interação entre o solo não saturado e as condições atmosféricas (Nelson e McWhorter, 1985; Newman *et al.*, 1997). Silva Júnior (2008) analisou a aplicação de coberturas de solo seco para a Região de Catalão (GO) estudando o comportamento hidráulico de um solo não saturado tropical e o clima local, e mostrou que o solo tropical pode ser

eficiente na proteção de rejeitos de mineração. A cobertura de solo seco, adequadamente dimensionada, evita que o processo de percolação de água no solo transporte metais pesados e ácidos atinja o lençol freático.

Outras práticas geotécnicas que também podem se beneficiar com a avaliação da interação solo-atmosfera são: análise de deformações de solos expansivos ou colapsíveis, e o desenvolvimento de técnicas para alteamento de aterros em condições atmosféricas desfavoráveis, entre outras.

## **2.2 RELAÇÃO DA HIDROLOGIA COM A INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA**

A relevância do estudo da Hidrologia para o presente trabalho está na necessidade de analisar a forma como a água desenvolve os seus processos na fronteira solo-atmosfera, para que, nos capítulos seguintes, a relação entre o solo e as condições climáticas se estreite.

A Hidrologia é uma ciência que estuda, essencialmente, a água e sua relação com a engenharia civil, se preocupando com os movimentos vertical e horizontal da mesma e relacionando-os ao ciclo da água no planeta. A percolação da água no interior do solo é também estudada, mas a forma como a esta modifica o estado do solo é foco dos engenheiros geotécnicos.

A Hidrologia centra-se na definição do ciclo hidrológico e o clima funciona como motor para o mesmo. O sol é responsável por fornecer energia para evaporação de água e seu movimento vertical ascendente possibilita que, agora em forma de vapor d'água, condense e forme as nuvens. A água volta à superfície terrestre na forma de chuva – ou neve e granizo, dependendo da região. Antes disto, ela pode ser ainda interceptada por estruturas impermeáveis e/ou vegetação. A água que alcança a superfície terrestre pode infiltrar ou escoar, dependendo da capacidade de armazenamento do solo. A infiltração é o fenômeno que mais sofre alterações devido às ações antrópicas, seja pelo desmatamento (desnudamento do terreno e incrustação do solo), ou pelo processo impermeabilização da superfície do terreno pela utilização de materiais como o cimento e asfalto (Formiga *et al.*, 2012). O local de entrada de água, que se dá geralmente pela superfície do terreno, é conseqüentemente a fronteira entre o solo e a atmosfera. A direção do fluxo no interior do solo se dará de um ponto com maior potencial energético para um ponto de menor potencial.

Houser (2003) apresenta como alguns princípios que governam o movimento da água no solo podem ser usados para prever a infiltração. A Figura 2.2 mostra os mecanismos de infiltração de água no solo. O autor afirma que a capacidade de infiltração é a taxa máxima que o solo pode absorver de água e geralmente decresce com o incremento de umidade desse solo. Todavia, se a taxa de chuva ultrapassa a capacidade de infiltração do solo, o excesso torna-se escoamento superficial; e na medida que o tempo aumenta (em relação ao início da precipitação) a taxa de infiltração decresce, devido ao aumento de umidade do solo e o impacto das gotas de chuva na superfície, até que uma velocidade de infiltração constante seja atingida (equivalente à permeabilidade saturada). A água do escoamento superficial também pode colaborar com o processo de infiltração gerando, por consequência, a alimentação do lençol freático pelo escoamento subsuperficial; ou pode se acumular, abastecendo os rios, por exemplo, formando um potencial para novos processos de escoamento subsuperficial. A água sofrendo novamente o fenômeno da evaporação completa seu ciclo que é apresentado na Figura 2.3.

Diante da complexidade do ciclo da água, a Hidrologia foca nos processos de precipitação, evapotranspiração e armazenamento na definição de balanço hidrológico em termos de bacia hidrográfica, que, segundo Tucci (1997), pode ser definida com a área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, e na qual o balanço entre os fluxos de água pode ser bem definido.

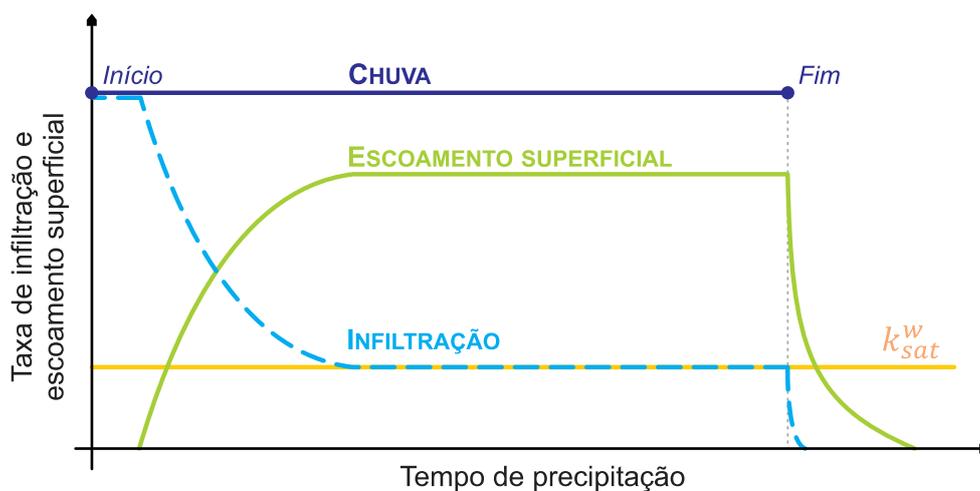


Figura 2.2: Mecanismo de infiltração de água no solo.

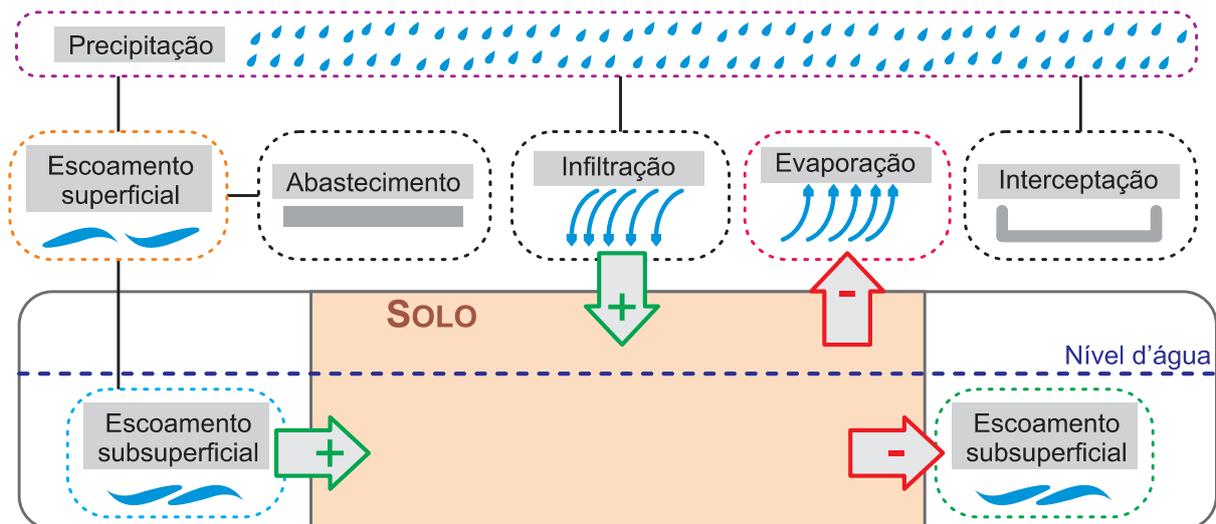


Figura 2.3: Ciclo hidrológico-geotécnico.

A entrada de água é dada pela precipitação ( $P$ ), e a saída de água pela evapotranspiração ( $E_T$ ), escoamento superficial ( $R_E$ ) como descrito na Equação 2.1. Para ciclos climatológicos, como um ano habitual de chuvas (i.e. que apresenta um total de chuva próximo da média histórica anual), a variação de água no interior do solo ( $\Delta V_W$ ) pode ser desconsiderada e a Equação 2.2 é obtida.

$$P = \Delta V_W + E_T + R_E \quad ( 2.1 )$$

$$P = E_T + R_E \quad ( 2.2 )$$

Diferente de uma análise em termos de bacia hidrográfica, na análise local de um perfil de solo a consideração do escoamento superficial e subsuperficial é importante para a análise de fluxo de água, e essencial para o fechamento do balanço hidrológico. A precipitação, responsável pela entrada de água no balanço hidrológico, possui papel fundamental tanto hidrológicamente, no dimensionamento de obras hidráulicas, quanto geotécnicamente, na variação do estado do solo. Os dados de precipitação podem ser obtidos por medição direta, previsão meteorológica ou gerados aleatoriamente segundo referências estatísticas (Srikanthan & McMahon, 2001). Os dados podem ser tratados, basicamente, por duas manipulações estatísticas: cálculo da chuva máxima e cálculo da chuva média.

O cálculo da chuva máxima, na Hidrologia, é importante na prevenção de enchentes e das cheias de rios. Sua aplicação é facilitada pela curva IDF (intensidade, duração e frequência), que são construídas pela seleção das maiores chuvas de uma duração escolhida em uma série de dados. A variável utilizada para definir a frequência de eventos extremos é o tempo de retorno ( $TR$ ), dado em anos. O tempo de retorno representa uma estimativa do tempo médio em que um evento de precipitação é igualado ou superado, e é matematicamente definido como o inverso da probabilidade de ocorrência do evento crítico ( $P_E$ ) em um ano qualquer, como apresenta a equação:

$$TR = \frac{1}{P_E} \quad ( 2.3 )$$

A consideração da curva IDF, e por consequência do tempo de retorno, em problemas geotécnicos deve ser feita com muita cautela pois, nem sempre, a chuva máxima é a única chuva relacionada com as máximas alterações no conteúdo de água no solo pela possibilidade de ocorrência do escoamento superficial. Dependendo da condutividade hidráulica do solo podem existir chuvas com menores intensidades que causem alterações idênticas. Portanto, na consideração da curva IDF em problemas geotécnicos, as chuvas máximas que causam o mínimo de escoamento superficial são as chuvas que, potencialmente, mais podem alterar distribuição de poropressão no solo. Nestes termos as chuvas máximas de longa duração (e baixa intensidade) e a chuva média ganham importância nas aplicações geotécnicas. Considerando que os dados de chuva são obtidos para pontos específicos, representados pela posição geográfica dos pluviômetros, sua interpolação para outros pontos ou superfícies é caracterizada pelo cálculo da chuva média. Baralho *et al.* (2011) apresenta uma comparação entre três técnicas de interpolação no cálculo da chuva média: método do inverso do quadrado das distâncias, método multi-quadrático, e uma variante para essa última para eliminação de erros de tendência.

#### 2.2.1.1 Pesquisas aplicadas

Algumas pesquisas serão apresentadas a seguir para exemplificar a ponte entre a Geotecnia e a Hidrologia.

Azevedo *et al.* (2013), utilizando o Métodos Probabilísticos para quantificar o perigo associado aos deslizamentos deflagrados por chuvas no Distrito Federal, identifica com clareza a diferença entre a probabilidade de ruptura e a probabilidade de ocorrência do evento que causa a instabilidade. Para determinação da probabilidade relacionado à ocorrência do evento é necessário o conhecimento da distribuição probabilística dos deflagradores do evento, como, por exemplo, a chuva máxima. Portanto, a probabilidade de um evento ocorrer pode ser analisada como um produto das probabilidades de eventos em série que precisam acontecer para que o evento de referência aconteça. Neste contexto, a frequência da precipitação pode ser desenvolvida em problemas geotécnicos considerando Ko *et al.* (2004), que afirma que a probabilidade de movimento de massa pode ser calculada como o produto da probabilidade condicional de que a instabilidade possa ocorrer e a probabilidade do evento crítico:

$$P_M = P_C P_E \quad ( 2.4 )$$

onde:  $P_M$  é a probabilidade de movimento de massa,  $P_C$  é a probabilidade condicional de que a instabilidade possa ocorrer, e  $P_E$  é a probabilidade do evento crítico.

Hoyo (2014) considerou conceitos geotécnicos e hidrológicos para desenvolver uma metodologia de avaliação de escorregamentos de terra utilizando ferramentas probabilísticas e análises transientes de curto e longo prazo. A autora avaliou a influência da variabilidade espacial e dos parâmetros mecânicos e hidráulicos sobre o processo de infiltração e o desenvolvimento de escorregamentos e cita o efeito da interceptação das folhas das plantas (considerando um cultivo de café) como pouco importante na avaliação temporal da estabilidade de taludes, enquanto a evapotranspiração é citado como efeito de grande importância. De fato, a interceptação, não será considerada no modelo proposto.

Novas discussões sobre Hidrologia serão realizadas nos próximos capítulos.

## 2.3 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS APLICADOS À GEOTECNIA

Serão introduzidos aqui aspectos gerais da probabilidade e estatística aplicados à Geotecnia, seguindo para uma breve revisão das abordagens determinística e probabilística. Por fim, serão apresentadas as bases de dois métodos probabilísticos.

Segundo Griffiths & Fenton (2007) os solos e as rochas estão entre os materiais com maior variabilidade de toda engenharia, existindo, portanto, a necessidade de tratar tais matérias de maneira probabilística. Segundo Phoon (2008) as incertezas na engenharia geotécnica são inevitáveis e a possibilidade de quantificá-las, utilizando ferramentas convencionais de estatística, gera inúmeras vantagens na prática geotécnica. Cita-se como uma grande vantagem a possibilidade de obter, pela aplicação de métodos probabilísticos, um valor de referência para a probabilidade de falha da obra. Entender e quantificar as incertezas são essenciais para aplicar a confiabilidade no gerenciamento de risco e em projetos geotécnicos. Para relações práticas, Morgenstern (1995) dividiu as incertezas geotécnicas em três categorias: 1) incerteza do parâmetro, 2) incerteza do modelo, e 3) incerteza humana.

A incerteza do parâmetro é a incerteza dos valores de entrada das análises. A incerteza do modelo está relacionada com a lacuna entre a teoria adotada na previsão dos modelos e a realidade. Modelos de análise, como são os da engenharia, são usualmente caracterizados pelas suposições simplificadoras e aproximações, e podem ser considerados imperfeitas representações da condição real. Já a incerteza humana está relacionada com equívocos e os erros humanos, que podem ser aleatórios e imprevisíveis. Exemplos de erros humanos incluem o descuido e a ignorância, informação enganosa, construção ruim, relações contratuais inapropriadas, e falta de comunicação entre as partes envolvidas no projeto. Samdal *et al.* (1992) apontou a importância do crescimento do fator humano em grandes sistemas que quantificam as probabilidades de falha, não devendo ser ignorada. Isto levou ao desenvolvimento da chamada abordagem da avaliação da confiabilidade humana. Devido as inevitáveis presenças de incerteza nas aplicações geotécnicas, os resultados de qualquer análise (fator de segurança, recalque, e capacidade de carga de uma estaca, por exemplo) também são incertos.

Segundo Gitirana Jr. (2005) as incertezas, relativamente altas na definição do solo, providenciam também uma adicional motivação para a adoção de abordagens probabilísticas na consideração da Mecânica dos Solos Não Saturados. Ainda segundo o autor a utilização de abordagens probabilísticas na engenharia geotécnica pode ser compreendida em três etapas:

- 1) O estabelecimento de métodos de caracterização da variabilidade das propriedades dos solos;
- 2) O desenvolvimento de um método de análise de confiabilidade;
- 3) O estabelecimento de riscos aceitáveis.

O modelo proposto na presente pesquisa foca na segunda etapa apresentada acima e tem como principal finalidade oferecer um conjunto de resultados consistentes, que represente a ação sazonal do clima sobre as condições geotécnicas, para o estabelecimento de riscos aceitáveis na prática geotécnica. Como a primeira etapa também é necessária para aplicação da abordagem probabilística, serão utilizados valores típicos de variabilidade das propriedades do solo, apresentados na Tabela 2.2 em termos de coeficiente de variação.

A seguir serão utilizados alguns fundamentos da análise de estabilidade de taludes para nortear a discussão dos métodos probabilísticos. A análise de estabilidade de taludes é usualmente feita utilizando os Métodos de Equilíbrio Limite. Ao longo das últimas quatro décadas estes modelos (por exemplo: Bishop, 1955; Morgenstern-Price, 1965; Spencer, 1967; Janbu, 1973) têm adquirido ampla aceitação e se tornado parte da prática da engenharia. Porém a metodologia adotada na prática convencional é de natureza determinística. A grande desvantagem da abordagem determinística é a desconsideração das várias fontes de incertezas inerentes aos parâmetros de entrada, consideradas na abordagem probabilística.

Tipicamente, o programa de ensaios para definição de um projeto geotécnico constitui na coleta de dados sobre as condições geológicas e hidrológicas, estratigráfica, propriedades do material e poropressão de água. Os dados são então avaliados para se obter as melhores estimativas dos parâmetros de interesse, como por exemplo os relacionados com a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade. As tradicionais análises de estabilidade de taludes utiliza como dados de entrada os valores médios dos parâmetros obtidos (e, em alguns casos, até o valor mínimo), resultando num

único fator de segurança que, não oferecendo parâmetros como a probabilidade de ruptura, revela pouco sobre a segurança da obra analisada.

Tabela 2.2: Coeficientes de variação típicos.

Propriedade	Coeficiente de variação (CV)	Fonte
<b>Solo saturado</b>		
• <i>Caracterização</i>		
Porosidade, $n$	10%	Schulze (1971)
Índice de vazios, $e$	10 – 20%	Krahn & Fredlund (1983)
Peso específico natural, $\gamma_n$	3 – 7%	Hammit (1966), Kulhawy (1992), Tan <i>et al.</i> (1993)
• <i>Resistência</i>		
Ângulo de atrito, $\phi'$	7 – 12%	Schulze (1971), Lacasse & Nadim (1997), Duncan (2000), Phoon & Kulhawy (1999a)
Ângulo de atrito, $\tan(\phi')$	5 – 25%	Lumb (1966), Tan <i>et al.</i> (1993)
Coesão, $c'$	10 – 50%	Fredlund & Dahlman (1971), Harr (1987), Kulwahy (1992), Tan <i>et al.</i> (1993), Lacasse & Nadim (1997), Phoon & Kulhawy (1999a), Duncan (2000)
• <i>Condutividade hidráulica</i>		
Condutividade hidráulica saturado, $k_{sat}^w$	68 – 90%	Nielsen <i>et al.</i> (1973), Duncan (2000)
<b>Solo não saturado</b>		
• <i>Caracterização</i>		
Condutividade hidráulica, $k^w$	130 – 240%	Nielsen <i>et al.</i> (1973), Benson <i>et al.</i> (1999)
Porosidade, $n$	<i>Areia</i>	13%
	<i>Silte</i>	17%
	<i>Argila</i>	19%
• <i>CCSA</i>		
Valor de entrada de ar, $\ln(\psi_b)$	<i>Areia</i>	85%
	<i>Silte</i>	115%
	<i>Argila</i>	205%
Inclinação da CCSA, $\ln(\lambda_d)$	<i>Areia</i>	100%
	<i>Silte</i>	90%
Grau de saturação residual, $\ln(S_{res})$	<i>Areia</i>	14%
	<i>Silte</i>	12%
• <i>Condutividade hidráulica</i>		
Condutividade hidráulica saturado, $\ln(k_{sat}^w)$	<i>Areia</i>	16%
	<i>Silte</i>	15%
	<i>Argila</i>	13%
Inclinação da função de condutividade hidráulica, $\ln(\eta)$	<i>Areia</i>	40%
	<i>Silte</i>	55%
	<i>Argila</i>	50%

Os métodos probabilísticos permitem a avaliação da distribuição da probabilidade de uma variável dependente em função do conhecimento das distribuições estatísticas das variáveis independentes que geram a variável dependente (Assis *et al.*, 2012).

Segundo Montoya (2013) as avaliações de confiabilidade e a determinação da probabilidade de ruptura não garantem que as estruturas projetadas serão imunes às possíveis falhas, principalmente considerando os altos níveis de incerteza envolvidos nos modelos. A avaliação dos diferentes cenários do projeto pode, porém, fornecer melhores ferramentas para tomada de decisões.

Na Geotecnia a utilização dos métodos probabilísticos é mais focada na análise de estabilidade de taludes e os principais métodos utilizados são: Monte Carlo, Estimativas Pontuais e Primeira Ordem Segundo Momento. Este último é detalhado a seguir, por estar inserido na metodologia da pesquisa, assim como o Método APEM, desenvolvido utilizando conceitos do Método de Estimativa Pontuais e o Método da Primeira Ordem Segundo Momento.

### **2.3.1 Método da primeira ordem segundo momento (FOSM)**

O método da primeira ordem segundo momento é baseado no truncamento da função de expansão da série de Taylor a partir dos termos de segunda ordem, desconsiderando os efeitos dos terceiros e quartos momentos probabilísticos. Esta aproximação gerada, no entanto, é plenamente aceitável para fins práticos (Assis *et al.*, 2012). Como somente a primeira derivada da série de Taylor é utilizada, o método recebe a descrição “primeira ordem”. A descrição “segunda ordem” é devido à utilização da variância, que na estatística é definida como sendo o segundo momento da variável. O método expressa a função de uma variável dependente como consequência dos resultados de diferentes cenários estatísticos. As variáveis dependentes que serão foco das aplicações probabilísticas desta pesquisa serão a distribuição de sucção e o fator de segurança.

Para a completa realização do método de FOSM são necessários que, considerando  $n$  o número de variáveis independentes,  $n + 1$  cenários sejam simulados. Geralmente são consideradas como variáveis para a função do fator de segurança os parâmetros geométricos e geotécnicos (peso específico, coesão e ângulo de atrito). O primeiro cenário é analisado considerando os valores médios de todas as variáveis; e para

cada cenário subsequente uma variável é, de forma individual, incrementada em relação à média. Vários autores sugerem, para melhores resultados, que o valor do incremento seja próximo de 10% (Sandroni e Sayão 1993; e Assis *et al.*, 2012).

A média da função do fator de segurança ( $E[FS]$ ) é calculada a partir dos valores médios das variáveis independentes ( $\bar{x}_n$ ):

$$E[FS] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad ( 2.5 )$$

A variância da função ( $V[FS]$ ) é calculada pelo somatório do produto das derivadas da função em relação a cada variável independente pela sua variância,  $V(x_i)$ , calculada utilizando a compreensão das incertezas de cada variável:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F(F_S)}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad ( 2.6 )$$

Para avaliação estatística do fator de segurança pode ser calculada a probabilidade ruptura, definida como sendo área sob a curva unitária de distribuição de probabilidade à direita do eixo vertical determinado pelo fator de segurança igual a um.

O método FOSM, além de oferecer resultados consistentes, utilizando poucos cenários de simulação, permite a avaliação da relevância das variáveis envolvidas no estudo, servindo como filtro de variáveis para outros métodos. A correlação pode ser avaliada considerando os termos de segunda ordem da série de Taylor. Os resultados apresentados por Farias e Assis (1998), considerando taludes com características diferentes, indicam que o Método de FOSM também fornece resultados semelhantes aos obtidos pelo Método dos Pontos de Estimativa (Rosenblueth, 1975).

### 2.3.2 Método alternativo de estimativas pontuais (APEM)

O método probabilístico apresentado por Gitirana Jr. (2005), identificado como APEM (alternative point estimate method), é baseado na combinação da aproximação da série de Taylor e o método de estimativas pontuais proposto por Rosenblueth (1975, 1981). De modo a realizar esta combinação, a variável dependente deve ser

expandido utilizando a série de Taylor sobre os valores médios das variáveis aleatórias de entrada.

As Equações 2.7 e 2.8 são utilizadas no cálculo dos primeiros momentos estatísticos do fator de segurança, e conseqüentemente a probabilidade de ruptura, pelo método APEM. Segundo os parâmetros considerados como incertezas, são dados de entrada para as equações: a média, o desvio padrão, a assimetria, e a matriz de correlação entre as variáveis de entrada aleatórias. Considerando  $n$  o número de variáveis de entrada, são necessários, para a obtenção da distribuição do fator de segurança,  $(n^2 + 3n + 2)/2$  simulações.

$$E[F_S(X)] = F_S(E[X]) + \sum_{i=1}^n [p_i^+ F_S(x_i^+) + p_i^- F_S(x_i^-) - F_S(E[X])] + \sum_{i < j} \sum_j [F_S(x_i^+, x_j^+) - F_S(x_i^+) - F_S(x_j^+) + F_S(E[X])] \frac{\rho[x_i, x_j]}{\xi^+[x_i] \xi^+[x_j]} \quad ( 2.7 )$$

onde:

$$\begin{aligned} F_S(E[X]) &= F_S(E[x_1], E[x_2], \dots, E[x_n]); \\ F_S(x_i^\pm) &= F_S(E[x_1], E[x_2], \dots, E[x_{i-1}], x_i^\pm, E[x_{i+1}], \dots, E[x_n]); \\ x_i^\pm &= E[x_i] + \xi^\pm[x_i] \sigma[x_i]; \\ \xi^\pm[x_i] &= \gamma_1[x_i]/2 \pm \sqrt{1 + (\gamma_1[x_i]/2)^2}; \\ p_i^\pm &= \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{1 + (\gamma_1[x_i]/2)^2}} \right] \\ F_S(x_i^+, x_j^-) &= F_S(E[x_1], \dots, E[x_{i-1}], x_i^+, E[x_{i+1}], \dots, E[x_{j-1}], x_j^-, E[x_{j+1}], \dots, E[x_n]); \\ \rho[x_i, x_j] &= \text{coeficiente de correlação entre } x_i \text{ e } x_j: \frac{Cov[x_i, x_j]}{\sigma[x_i] \sigma[x_j]}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu_m[F_S(X)] &= E[\{F_S(X) - E[F_S(X)]\}^m] \\
&= \{F_S(E[X]) - E[F_S(X)]\}^m \\
&+ \sum_{i=1}^n [p_i^+ \{F_S(x_i^+) - E[F_S(X)]\}^m + p_i^- \{F_S(x_i^-) - E[F_S(X)]\}^m \\
&- \{F_S(E[X]) - E[F_S(X)]\}^m] \\
&+ \sum_i \sum_{j \substack{> \\ i < j}} [\{F_S(x_i^+, x_j^-) - E[F_S(X)]\}^m - \{F_S(x_i^+) - E[F_S(X)]\}^m \\
&- \{F_S(x_j^-) - E[F_S(X)]\}^m + \{F_S(E[X]) - E[F_S(X)]\}^m] \frac{\rho[x_i, x_j]}{\xi^+[x_i] \xi^+[x_j]}
\end{aligned} \tag{ 2.8 }$$

onde:

$$\mu_m[F_S(X)] = \text{momento estatístico de } F_S \text{ de ordem } m;$$

Nos próximos capítulos os métodos probabilísticos serão utilizados em análises de estabilidade e de fluxo de água no solo.

### 2.3.3 Síntese sobre a aplicação dos métodos probabilísticos na Geotecnia e sua relação com a metodologia da pesquisa

A avaliação da segurança de obras na Geotecnia, inicialmente realizada de forma empírica e qualitativa, agregou modelos matemáticos e probabilísticos permitindo a obtenção de valores de referência e o gerenciamento de riscos. A análise quantitativa da segurança de obras na Geotecnia se apoia na relação entre a resistência e as cargas atuantes, dada pelo fator de segurança.

Porém, o fator de segurança calculado a partir dos parâmetros médios, desconsidera as incertezas dos parâmetros geotécnicos, fornecendo informações limitadas a respeito da segurança da obra. Considerando a Figura 2.4 como exemplo, um fator de segurança médio de 1,6 pode fornecer uma distribuição probabilística de base mais alargada do que um fator de segurança médio de 1,5, resultando em uma maior probabilidade do fator de segurança ser menor do que 1,0.

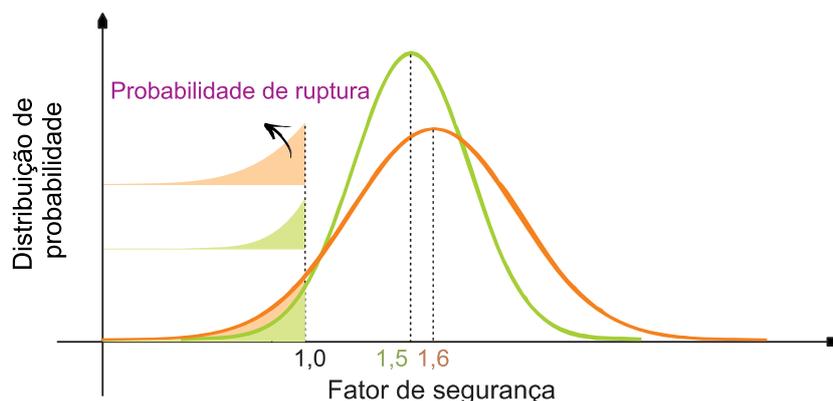


Figura 2.4: Distribuições de probabilidade de fator de segurança.

A consideração das incertezas do solo no cálculo do fator de segurança gera uma distribuição probabilística para esta variável, e permite o cálculo da probabilidade do fator de segurança ser menor do que 1,0 (probabilidade de ruptura). Porém, geralmente, a probabilidade de ruptura é somente avaliada para a condição mais desfavorável do estado do solo correspondente, quase sempre, ao evento mais chuvoso e ao nível d'água mais próximo da superfície. Tal avaliação desconsidera a flutuação (ou evolução) da probabilidade ruptura ao longo do tempo.

A Figura 2.5 sintetiza a evolução da avaliação da segurança de taludes desde a avaliação quantitativa (seguro ou inseguro) até ao cálculo da probabilidade de ruptura. Diante desta síntese, alguns questionamentos podem ser levantados: 1) como fornecer dados em maior quantidade e qualidade para os tomadores de decisão? 2) quais são os fatores que podem causar flutuações na probabilidade de ruptura ao longo do tempo? 3) quais impactos a consideração da variação da probabilidade de ruptura podem ter em uma tomada de decisões?

Todos estes questionamentos levantados serão considerados no desenvolvimento do modelo proposto no próximo capítulo e na discussão dos resultados do Capítulo 5.

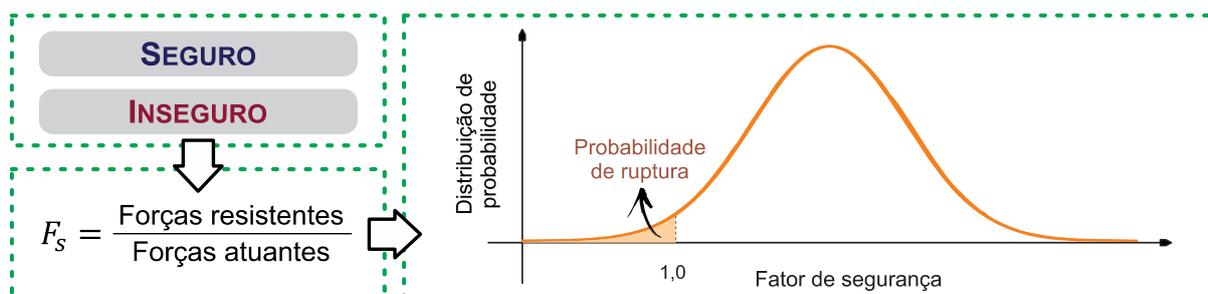


Figura 2.5: Evolução da avaliação da segurança de taludes.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA

Diante do grande número de trabalhos encontrados na literatura que relacionam os dados atmosféricos com a prática geotécnica, é importante ressaltar que ainda são poucos os trabalhos que exploram, em um mesmo conjunto de análises, temas ligados à Climatologia, à Mecânica dos Solos Não Saturados e à abordagem probabilística. Como exemplo, podem ser citados dois recentes trabalhos. Futai *et al.* (2011) apresenta uma vasta revisão sobre trabalhos que aplicam a teoria dos solos não saturados na análise de estabilidade de encostas, porém, não avança para a análise e aplicação dos métodos probabilísticos e dos dados atmosféricos. Enquanto Vivacqua (2012) discute a extensão da zona ativa, utilizando a aplicação climática sobre uma análise numérica de fluxo, no entanto, os temas de estabilidade de taludes e probabilidade não são explorados pelo autor.

Considerando esta realidade, o presente trabalho busca aproximar a Mecânica dos Solos Não Saturados da abordagem probabilística propondo um modelo de análise solo-atmosfera que considera as incertezas dos materiais e o comportamento rítmico do clima. O modelo será proposto no próximo capítulo.

### 3 MODELO PROPOSTO E METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente capítulo expõe o desenvolvimento de um modelo para avaliação da estabilidade de maciços de terra focando no desempenho dos mesmos ao longo do tempo pela consideração da sazonalidade das condições atmosféricas. O modelo combina uma análise transiente de fluxo, considerando alterações de poropressão de água no solo pela ação atmosférica. Buscando evidenciar a propagação do ritmo atmosférico – também denominado de sazonalidade do clima – no estado do solo e, conseqüentemente, nos parâmetros de desempenho (fator de desempenho, por exemplo), a aplicação do modelo proposto foca em análises transientes anuais permitindo que o ciclo climatológico se complete. Compõe também o modelo uma proposta de avaliação da propagação de incertezas associadas às propriedades do solo e das condições atmosféricas, tendo-se, assim, a consideração da abordagem probabilística na análise de fluxo de água no solo e na estabilidade de taludes. Desta forma, a abordagem de avaliação desenvolvida no presente trabalho pode ser definida como abordagem rítmica probabilística e se relaciona diretamente com os processos de tomadas de decisões em projetos e monitoramento de estruturas geotécnicas.

A Figura 3.1 apresenta a visão geral da aplicação do modelo proposto considerando cinco etapas principais. Os dados atmosféricos, considerados condições relativamente complexas de contorno de fluxo, são tratados e avaliados na Etapa A. Na análise de fluxo, Etapa B, são avaliadas as alterações no estado do maciço impostas pelas condições atmosféricas.

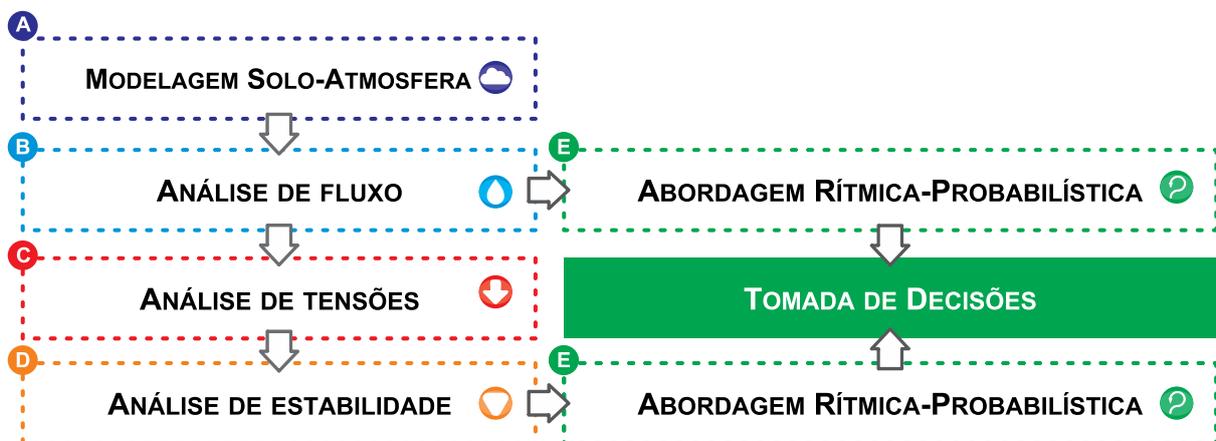


Figura 3.1: Visão geral da aplicação do modelo proposto.

Para determinar o fluxo de água e as mudanças na distribuição de poropressão de água no interior do solo, as equações diferenciais parciais (EDPs) que governam o fluxo de umidade são combinadas com adequadas condições de contorno, e resolvidas para o período de tempo considerado na análise. As mudanças na distribuição do estado de tensões (Etapa C), na resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, no fator de segurança do talude (Etapa D), são dependentes da análise de fluxo. A distribuição de tensões normais e tensões cisalhantes atuando ao longo das superfícies críticas analisadas são também obtidas pela solução de EDPs que governam o equilíbrio estático de forças. No caso do modelo aqui implementado, foi realizada uma análise desacoplada do balanço de massa de água e de equilíbrio. A avaliação acoplada seria um refinamento da abordagem proposta, mas envolveria custos computacionais relativamente elevados.

Por fim, a abordagem rítmica probabilística (Etapa E) representa a etapa de avaliação dos resultados da análise de fluxo e estabilidade. Detalhes e discussões sobre cada etapa serão fornecidas a seguir.

### 3.1 ANÁLISE HIDROMECÂNICA

No modelo proposto no presente trabalho são adotadas equações diferenciais parciais (EDPs) que governam o comportamento hidromecânico de solos não saturados, descritas com detalhes em Pereira (1996) e Gitirana Jr. (1999). As equações serão aqui apresentadas considerando condições bidimensionais e de estado plano de tensões e fluxo. As EDPs para análises de tensão-deformação podem ser escritas pela combinação de equações diferenciais que governam o equilíbrio de forças, da relação constitutiva de tensão-deformação, da relação entre deformações e pequenos deslocamentos, e da relação constitutiva tensão-deformação. Considerando a lei de Hooke generalizada, as EDPs obtidas são as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} - H d(u_a - u_w) + du_a \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{44} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad ( 3.1 )$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{44} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{11} \frac{\partial v}{\partial y} - H d(u_a - u_w) + du_a \right] + \gamma_n = 0 \quad ( 3.2 )$$

onde:  $D_{11} = E(1 - \mu)/[(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$ ,  $D_{12} = E\mu/[(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$ ,  $D_{44} = E/[2(1 + \mu)]$ ,  $h = E/[H(1 - 2\mu)]$ ,  $\gamma_n$  é o peso específico natural,  $E$  é o módulo de Young,  $\mu$  é o coeficiente de Poisson,  $H$  é o módulo elástico para estrutura de solo em relação à mudança de sucção,  $u$  e  $v$  são deslocamentos nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente.

A EDP que governa a conservação de massa da água líquida é obtida pela combinação das leis de fluxo, das equações constitutivas de mudança de volume de água e da equação de massa de água.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k^w \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u_w}{\gamma_w} + y \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k^w \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u_w}{\gamma_w} + y \right) \right] = \beta_1^w \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \beta_2^w \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \quad ( 3.3 )$$

onde:  $k^w$  é a condutividade hidráulica,  $u_w$  é a poropressão de água,  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $y$  é a elevação em relação a um determinado referencial,  $\beta_1^w = m_1^w/m_1^s$ ,  $\beta_2^w = m_2^w - m_1^w m_2^s/m_1^s$ ,  $m_1^s = d\varepsilon_v/d(\sigma_m - u_a)$ ,  $m_2^s = d\varepsilon_v/d(u_a - u_w)$ ,  $m_1^w = d\theta/d(\sigma_m - u_a)$ ,  $m_2^w = d\theta/d(u_a - u_w)$ ,  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água,  $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ,  $u_a$  é a poropressão de ar.

Visto que o modelo proposto será aplicado em análises transientes de longa duração focando na avaliação probabilística da distribuição de poropressão de água no solo e dos parâmetros de desempenho de taludes, as soluções das EDPs acopladas exigiriam longos períodos de processamento computacional. Por isso, propõe-se aqui simplificar e desacoplar o conjunto de equações, desconsiderando processos que são secundários para o objetivo da análise.

Desconsiderando a influência das variações de tensão total líquida na capacidade de armazenamento de água do solo, considerando a poropressão de ar constante e a aplicação das equações de equilíbrio apenas para a geração dos estados de tensões inicial – onde variações de poropressão de água não são relevantes – tem-se o seguinte conjunto de EDPs simplificadas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{44} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad ( 3.4 )$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{44} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{11} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \gamma_n = 0 \quad ( 3.5 )$$

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

Deve-se ressaltar que impactos da variação de volume total na capacidade de armazenamento de água do solo tem maior importância nos casos de análises de solos colapsíveis ou expansivos, para os quais a análise acoplada pode ser mais relevante.

A metodologia da análise de fluxo, utilizando a EDP simplificada, pode ser desenvolvida considerando o fluxograma apresentado na Figura 3.2. Como configurações gerais é necessário, primeiramente, estabelecer as condições de contorno, a geometria do perfil de solo e a condição inicial. A curva característica solo-água permite estabelecer o perfil de umidade pela consideração da poropressão de água que pode ser alterada pelas condições de contorno segundo a função de condutividade hidráulica do solo presente na equação diferencial de fluxo.

Os principais resultados obtidos da análise de fluxo são: balanço de água no interior do solo, distribuições de poropressão e umidade ao longo do tempo. O balanço de água no interior do solo está também relacionado com modelagem atmosférica que será discutida em detalhes na Seção 3.4.

A análise de tensões será desenvolvida segundo o fluxograma apresentado na Figura 3.3. A condição inicial será definida pelo peso específico natural (função da distribuição da quantidade de água obtida na análise de fluxo e do índice de vazios inicial) e pelas tensões externas, e irá compor a equação de equilíbrio. Combinando a lei de Hooke generalizada com a equação de equilíbrio são obtidas as equações diferenciais parciais de análise de tensões. Os principais resultados obtidos na análise de tensões são: tensões normais, tensões principais e trajetória de tensões.

Os resultados das análises de fluxo e estabilidade viabilizam a análise de estabilidade, especificamente pela definição das distribuições de poropressão de água e tensões normais.

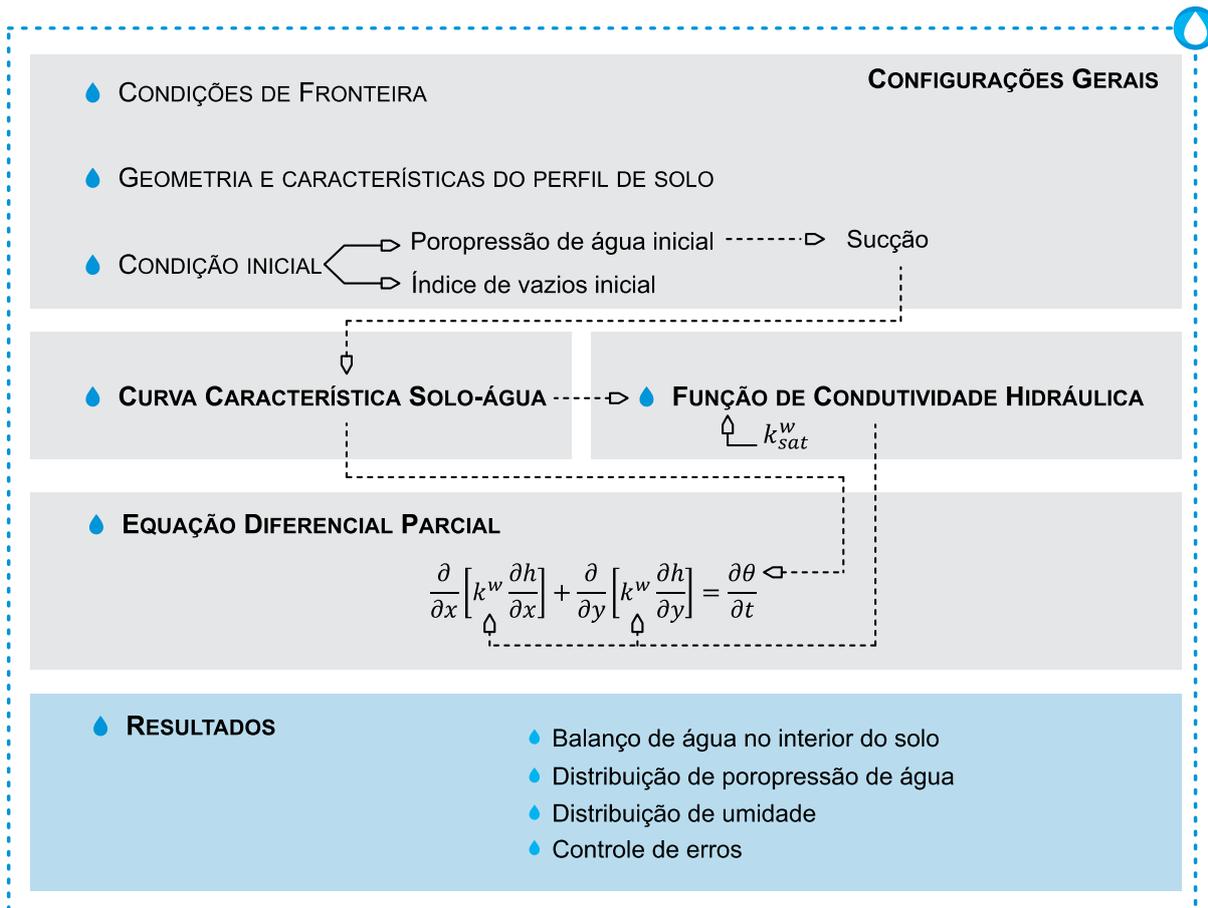


Figura 3.2: Fluxograma da implementação da análise de fluxo.

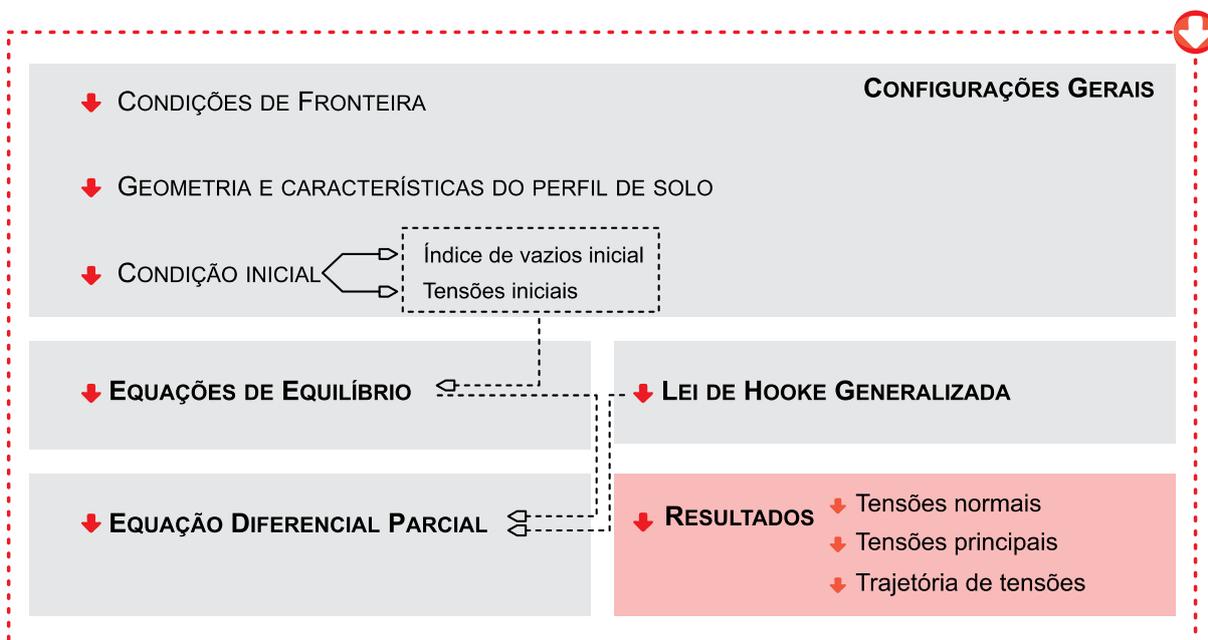


Figura 3.3: Fluxograma da implementação da análise de tensões.

### 3.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

As alterações na distribuição de poropressão e tensões no solo produzem mudanças nos resultados da análise de estabilidade de taludes e podem, potencialmente, indicar falhas. A Figura 3.4 apresenta a visão geral da quantificação da estabilidade de taludes pela aplicação do método do equilíbrio limite aperfeiçoado. O método calcula o fator de segurança como função da resistência ao cisalhamento do solo e o estado de tensões calculado utilizando equações diferenciais parciais e a modelagem solo-atmosfera proposta. O fator de segurança ( $F_s$ ) é calculado no método do equilíbrio limite aperfeiçoado pela seguinte equação:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad ( 3.7 )$$

onde:  $R_i$  é a força de resistência do solo ao longo dos  $n$  segmentos lineares;  $S_i$  é a força de cisalhamento agindo sobre o solo ao longo dos  $n$  segmentos lineares.

Um componente essencial para a definição do fator de segurança crítico é o método de busca da superfície que representa o menor valor para o fator de segurança, chamada de superfície crítica. Será utilizado no presente trabalho o método de programação dinâmica no qual a superfície crítica é prevista num processo iterativo. A Figura 3.5 apresenta um esquema analítico da aplicação da análise de estabilidade utilizando o método da programação dinâmica adaptado por Yamagami e Ueta (1988).

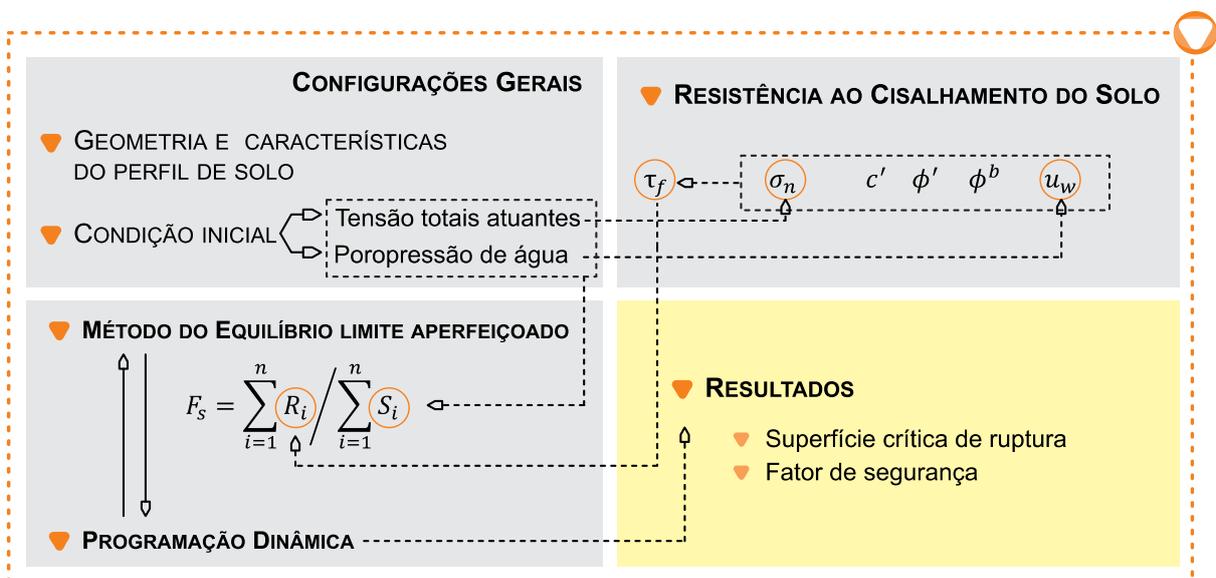


Figura 3.4: Metodologia para implementação da análise de estabilidade.

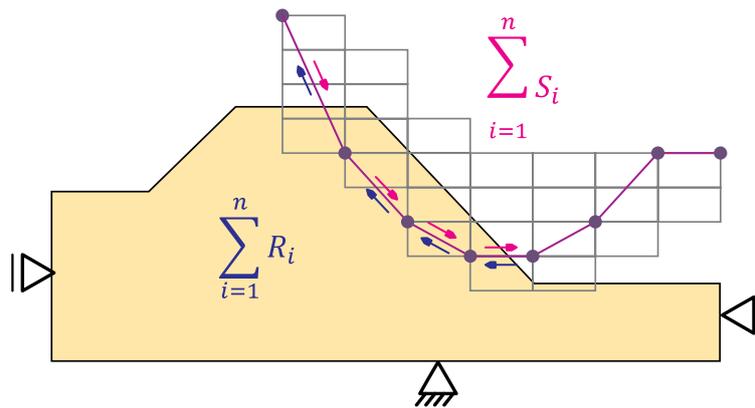


Figura 3.5: Esquema analítico do método da programação dinâmica.

O algoritmo da programação dinâmica é utilizado para determinar condições críticas, fornecendo um fator de segurança correspondente, para qualquer tempo pretendido. Com o objetivo de determinar as condições críticas, são necessárias a distribuição de tensões e a correspondente distribuição de poropressão de água. Considerando que a superfície de deslizamento crítica pode ser aproximada por  $n$  segmentos lineares, constituídos sobre uma grade de referência, e a Equação 3.7, busca-se, na aplicação do método, o conjunto de segmentos lineares que fornece o menor fator de segurança.

Para aplicação do método do equilíbrio limite aperfeiçoado será utilizado o programa “Safe DP” desenvolvido por Gitirana Jr. (2005).

### 3.3 PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS

A seguir são descritas as principais propriedades dos solos não saturados que serão consideradas nas análises de fluxo, tensões e estabilidade.

#### 3.3.1 Curva característica solo água

A consideração de um problema de fluxo em termos da Mecânica dos Solos Não Saturados passa, inevitavelmente, pela aplicação da curva-característica solo-água (CCSA). A curva citada controla a variação de sucção pela variação do conteúdo de água no solo. A Figura 3.6 apresenta exemplos de curvas características para a argila, silte e areia.

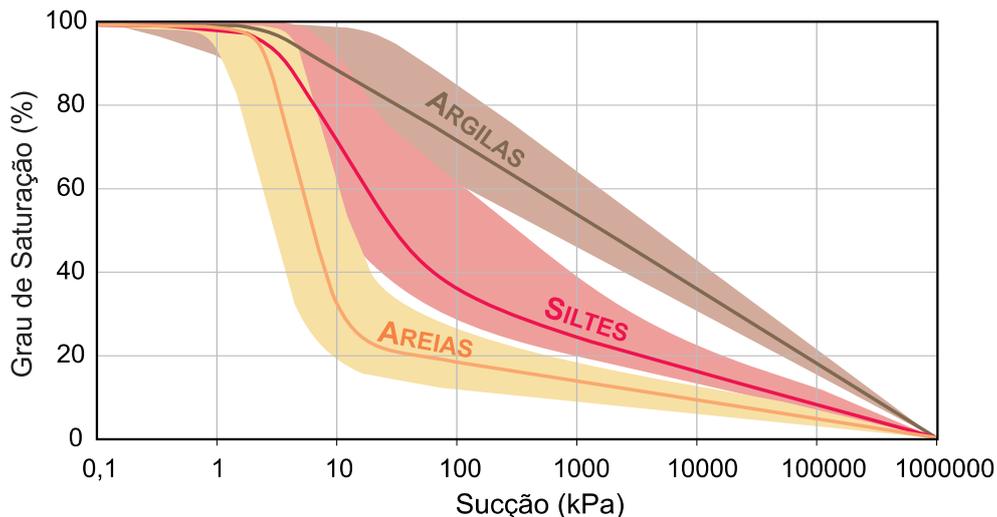


Figura 3.6: Curvas características solo-água típicas (adaptada de Gitirana Jr., 2005).

Diferentes aspectos do comportamento do solo não saturado – tais como: resistência ao cisalhamento, variação de volume, difusividade, e absorção além de muitas propriedades dos solos tais como calor específico, permeabilidade e condutividade térmica – podem ser relacionados com a CCSA (Fredlund & Rahardjo, 2012).

### 3.3.1.1 Equação de ajuste para a CCSA

A curva característica solo água será considerada no desenvolvimento do modelo pelas interpolações de dados experimentais utilizando a equação de ajuste bimodal para a CCSA proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004). Uma CCSA é chamada de bimodal quando possui dois valores de entrada de ar bem definidos. Esta característica da CCSA é comum em solos tropicais, assim denominados por estarem sujeitos ao clima tropical onde as estações chuvosas e secas favorecem o desenvolvimento de espessas camadas de solo e a distribuição de macro e micro poros na estrutura do mesmo. A CCSA também pode ser unimodal quando apresenta somente um valor de entrada de ar.

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram três equações de ajuste denominadas: equação unimodal com um ponto de curvatura, equação unimodal com dois pontos de curvatura e equação bimodal. As três equações são baseadas na equação geral da hipérbole, rotacionada e inserida no sistema de coordenadas  $\log(\psi) \times S$ . Quatro hipérboles são necessárias para a construção da curva de ajuste bimodal, delineadas por cinco assíntotas definidas pelos pares de pontos  $(0,1)$ ,  $(\psi_{b1}, 1)$ ,  $(\psi_{res1}, S_{res1})$ ,  $(\psi_{b2}, S_b)$ ,  $(\psi_{res2}, S_{res2})$  e  $(10^6, 0)$ , como mostra a Figura 3.7.

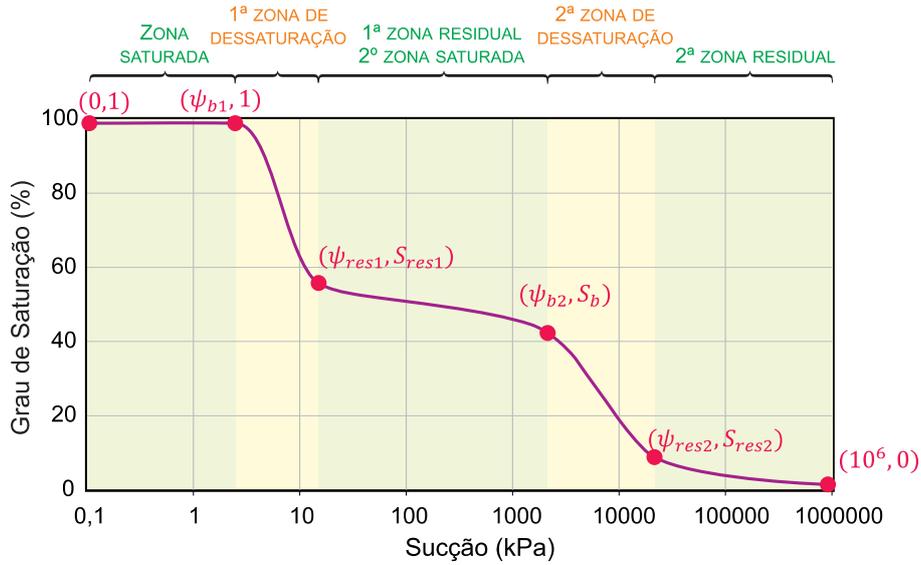


Figura 3.7: Construção da curva de ajuste bimodal.

A Equação 3.8 apresenta a curva de ajuste bimodal, utilizada no presente trabalho.

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b1}\psi_{res1}})^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b2}\psi_{res1}})^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b2}\psi_{res2}})^{d_3}} + S_4 \quad ( 3.8 )$$

onde:

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \ln(\psi/\psi_i^a)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i$$

$$\times \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left( \frac{\psi}{\psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)} + S_i^a}$$

$$\theta_i = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2; \text{ ângulo de rotação da hipérbole}$$

$$r_i = \tan(\lambda_{i-1} - \lambda_i)/2; \text{ abertura do ângulo tangente}$$

$$\lambda_i = \arctan\{(S_i^a - S_{i+1}^a)/[\ln(\psi_{i+1}^a/\psi_i^a)]\} \quad \text{declividade de dessaturação}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$S_1^a, S_2^a, S_3^a, S_4^a, S_5^a = 1, S_{res1}, S_b, S_{res2} \text{ e } 0, \text{ respectivamente}$$

$$S_{res1} = \text{Grau de saturação correspondente ao primeiro valor de sucção residual}$$

$$S_b = \text{Grau de saturação correspondente ao segundo valor de entrada de ar}$$

$$S_{res2} = \text{Grau de saturação correspondente ao segundo valor de sucção residual}$$

$$\psi_1^a, \psi_2^a, \psi_3^a, \psi_4^a, \psi_5^a = \psi_{b1}, \psi_{res1}, \psi_{b2}, \psi_{res2} \text{ e } 10^6, \text{ respectivamente}$$

$$\begin{aligned} \psi_{b1} &= \text{Primeiro valor de entrada de ar} \\ \psi_{res1} &= \text{Primeiro valor de sucção residual} \\ \psi_{b2} &= \text{Segundo valor de entrada de ar} \\ \psi_{res2} &= \text{Segundo valor de sucção residual} \\ d_j &= \frac{1}{2 \left( \ln(\psi_{j+1}^a / \psi_j^a) \right)}, \text{ fator de peso} \\ j &= 1, 2, 3 \end{aligned}$$

### 3.3.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica ( $k^w$ ) pode ser determinada diretamente em laboratório e em campo, e, de forma indireta, por equações de previsão da função de condutividade hidráulica. A Figura 3.8 apresenta curvas de condutividade hidráulica típicas para a areia, silte e argila.

No presente trabalho será adotada a previsão da função de condutividade hidráulica pela curva característica solo-água, utilizando a Equação 3.9 proposta por Brooks & Corey (1964).

$$k^w = k_{sat}^w \text{ para } \psi < \psi_b$$

$$k^w = k_{sat}^w \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta \text{ para } \psi \geq \psi_b \quad ( 3.9 )$$

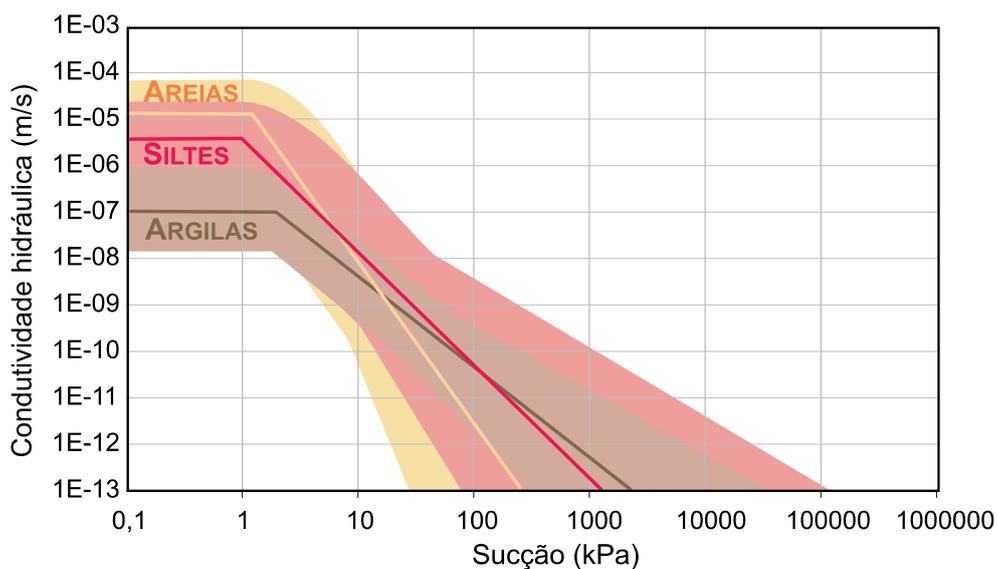


Figura 3.8: Curvas de permeabilidade típicas (adaptada de Gitirana Jr., 2005).

onde:

$$\begin{aligned}k_{sat}^w &= \text{condutividade hidráulica saturada} \\ \eta &= 2 + 3\lambda \\ \lambda &= \left[ -\log\left(\frac{1 + S_{res}}{2}\right) (2 - \log(\psi_b)) \right] / (\log(\psi_{res}\psi_b))\end{aligned}$$

### 3.3.3 Deformabilidade e resistência ao cisalhamento

As propriedades associadas com as análises de tensões e estabilidade de taludes são os parâmetros da relação deformação ( $E$  e  $\mu$ ), o peso específico natural do solo ( $\gamma_{nat}$ ), e a resistência ao cisalhamento ( $\tau_f$ ). O módulo de Young ( $E$ ) pode ser obtido pelos ensaios de compressão (triaxial ou edométrico) ou estimado por outras características do solo. Scoular (1997) mostrou que para problemas com solos homogêneos, o estado de tensões resultante é pouco influenciado pelo valor de  $E$ . O coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) pode ser obtido de forma direta pelo ensaio de compressão com medição das tensões ou deslocamentos horizontais, ou de forma indireta por relações aproximadas. Nas análises de tensões e estabilidade que serão realizadas no presente trabalho serão considerados taludes hipotéticos com solo homogêneo e  $E$  e  $\mu$  constantes.

O peso específico natural do solo pode ser obtido pela Equação 3.10 a partir das definições do peso específico dos grãos sólidos ( $\gamma_s$ ), do grau de saturação ( $S$ ), do índice de vazios ( $e$ ) e do peso específico da água ( $\gamma_w$ ).

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s + (S e \gamma_w)}{1 + e} \quad ( 3.10 )$$

A resistência ao cisalhamento é geralmente definida em função da curva característica solo-água e dos parâmetros de resistência do solo – coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ). Na aplicação do modelo proposto será utilizado a equação proposta por Fredlund *et al.* (1978):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad ( 3.11 )$$

onde:  $\tau_f$  é a resistência ao cisalhamento;  $(u_a - u_w)$  é a sucção matricial do solo;  $(\sigma_n - u_a)$  é a tensão líquida; e  $\phi^b$  ângulo de atrito interno relacionado à sucção matricial.

### 3.4 MODELAGEM SOLO-ATMOSFERA

O fluxograma apresentado na Figura 3.9 mostra as etapas da modelagem solo-atmosfera proposta. A utilização de domínios espaciais com extensão limitada exige o estabelecimento de condições de contorno que representem de forma adequada os processos externos ao domínio estabelecido. Desta forma, as condições atmosféricas definem as condições de contorno na interface solo-atmosfera. De forma semelhante, as condições de fluxo basal podem ser indispensáveis para a obtenção de balanços de massa de água em perfis de solo, particularmente quando períodos relativamente longos são considerados.

A obtenção dos dados atmosféricos que serão considerados na análise de fluxo é a primeira etapa para modelagem das condições de contorno de fluxo. Em análises anuais também é importante conhecer o perfil climático definido pela caracterização dos dados atmosféricos. São perfis climáticos típicos do clima tropical: ano habitual, ano excepcional chuvoso e ano excepcional seco. A forma como estes serão determinados e aplicados em análises de fluxo será discutida mais adiante.

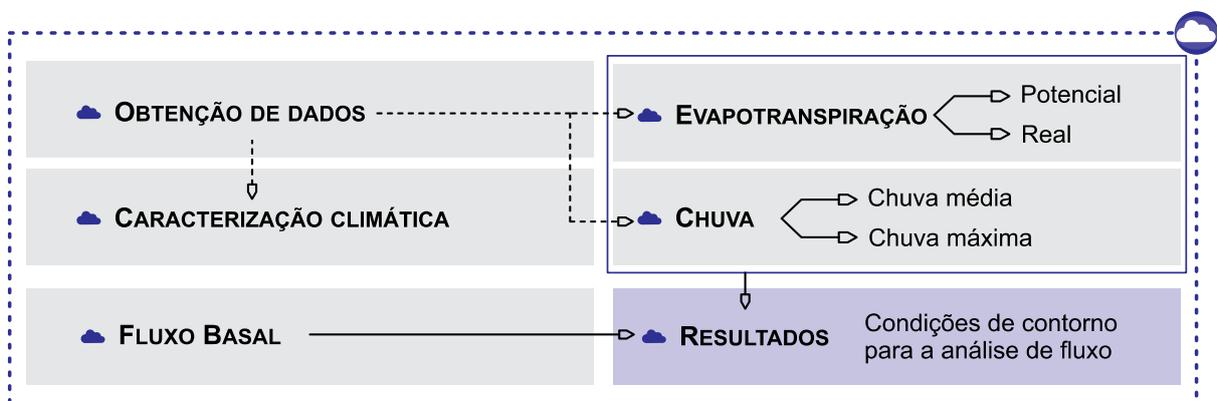


Figura 3.9: Fluxograma da aplicação da modelagem solo-atmosfera proposta.

A capacidade com que as condições de contorno de fluxo consideram o ciclo hidrológico-geotécnico, apresentado na Figura 2.3, e, conseqüentemente o balanço hidrológico anual, se relaciona diretamente com a eficiência da análise de fluxo transiente. Nos perfis de solo sujeitos a climas habituais que representa um comportamento atmosférico, em termos de dados de chuva, próximo da média histórica é comum que valores de entrada e saída de água sejam próximos e a variação da quantidade de água armazenada no solo seja mínima considerando o início e o fim de análises anuais. Adotar somente a precipitação como condição de contorno na análise de fluxo impede, portanto, que o balanço hidrológico anual seja atendido porque somente a entrada de água é considerada.

Adotar, além da precipitação, a evapotranspiração, também não garante que o balanço hidrológico anual seja atendido já que, geralmente, os totais anuais de precipitação e evapotranspiração são diferentes. Desta forma, a consideração do fluxo subsuperficial torna-se necessária. Porém a sua medição representa um problema complexo pela necessidade de considerar o balanço hidrológico em termos de bacia hidrográfica para o nível local. O fluxo basal, a precipitação e a evapotranspiração serão as condições de contorno consideradas nas análises de fluxo e serão desenvolvidos com detalhes nas próximas seções.

### **3.4.1 Obtenção de dados meteorológicos**

A primeira etapa do processo de compreensão de um fenômeno meteorológico consiste na quantificação das variáveis em análise e os valores observados são conhecidos como dados meteorológicos. A categoria e a responsabilidade do projeto definirão a precisão e frequência exigida para a medição de um dado meteorológico. As condições atmosféricas são monitoradas geralmente por estações meteorológicas instaladas no local de observação. As principais variáveis atmosféricas monitoradas são: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e evaporação potencial.

Dados meteorológicos podem ser expressos de variadas maneiras, e utilizados para diferentes fins. Os registros originais de um específico período, são aqueles não tratados estatisticamente e que possuem frequência que varia desde a poucos segundos até tipicamente à frequência acumulada diária. Os dados também podem

ser tratados estatisticamente, como é o caso das médias acumuladas (principalmente mensais), neste caso representando o clima. Uma terceira categoria de dados meteorológicos seriam aqueles que são produtos de previsões meteorológicas.

Desta forma, os registros meteorológicos podem ser apresentados como médias históricas, médias mensais acumuladas, médias diárias acumuladas, dados reais medidos, ou dados de previsão futura. As médias históricas, ou curvas normais, são resultados de médias mensais acumuladas de vários anos e podem ser tratados como dados de referência. Como as médias históricas são, em alguns casos, os únicos dados disponíveis para a realização de um projeto geotécnico, uma cuidadosa interpretação e manipulação desses dados torna-se necessária. Por outro lado, os dados originais (i.e., brutos) medidos representam a totalidade da informação sobre a condição climática. Obviamente, o grande volume de informações correspondente aos dados brutos pode dificultar sua aplicação prática.

A previsão meteorológica é baseada nas condições meteorológicas momentâneas e históricas obtidas por uma rede de estações meteorológicas e por outras fontes. Após a coleta inicial, acontece a interpretação e implementação matemática do problema, gerando as previsões. As formas de implementação são diversas e estão relacionadas com os diferentes órgãos que realizam a previsão meteorológica. No Brasil, os principais órgãos são: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

### **3.4.2 Caracterização do ano climático segundo o total de chuva**

A seguir é apresentada e discutida a metodologia para a caracterização do ano segundo o total de chuva. Esta caracterização permite que, previamente à aplicação dos dados atmosféricos como condições de contorno em análises de fluxo, seja avaliada a relação desses dados com o histórico climático de vários anos. Segundo o total de chuva, os anos podem ser agrupados em três perfis: habitual, excepcional seco e excepcional chuvoso.

A caracterização do ano climático é fundamental para a aplicação do modelo proposto. O ano habitual é caracterizado por uma condição final de água armazenada no solo muito próxima com a condição inicial, e esta característica permite que o modelo seja calibrado. Na calibração a condição inicial pode ser alterada e as definições das

propriedades hidráulicas (CCSA e função de condutividade hidráulica) podem ser ajustadas objetivando o mínimo de variação do volume de água no final de um ano. O ano excepcional chuvoso é caracterizado por um total pluviométrico historicamente elevado e sugere um ano com poropressões mais elevadas ao longo do perfil de solo, favoráveis, por exemplo, à perda de estabilidade de um talude de terra.

Para o conhecimento do ano habitual e suas derivadas, o presente modelo (e suas aplicações) adota como fundamento 21 anos de dados de chuva em escala diária, segundo as recomendações de Zavattini & Boin, 2013. Os autores ressaltam que para a série ser válida, a mesma precisa ser homogênea (i.e. não possuir falhas). Obviamente, um número maior de anos pode ser adotado utilizando como referência as normais climatológicas: 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990, 1991-2020, etc.

Os 21 anos de dados de precipitação considerados devem ser organizados em ordem crescente de total anual de chuva e separados em quartis ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ), limites que separam o conjunto amostral em quatro partes, como mostra a Figura 3.10. Os anos contidos nas duas partes centrais (entre  $Q_1$  e  $Q_3$ ) representam os anos habituais, os anos contidos na parte superior (maior que  $Q_3$ ) representam os anos excepcionais chuvosos, e a parte inferior (menor que  $Q_1$ ) os anos excepcionais secos. Considerando os 21 anos de dados de precipitação, a probabilidade de ocorrer um ano habitual é de 50%, e, a probabilidade de ocorrer um ano chuvoso e a probabilidade de ocorrer um ano seco são as mesmas: 25%.

Mesmo que a proposta de análise transiente seja para um breve intervalo de tempo é fundamental que se busque reunir o máximo de dados climáticos possíveis para que a aplicação seja desenvolvida com incrementos que representem bem a realidade climática e para que exista crítica na relação entre o que foi aplicado e o que habitualmente acontece.

É importante destacar também que a caracterização climática de uma série de anos é extremamente sensível à localização geográfica. Ou seja, para que sua aplicação seja válida na prática geotécnica a série de dados utilizadas precisa representar com eficiência as condições climáticas que agem sobre a região analisada.

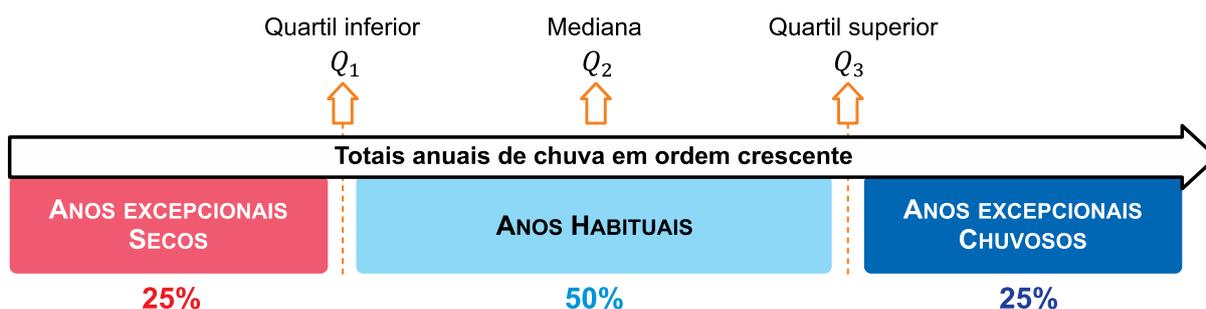


Figura 3.10: Caracterização climática em termos de totais anuais de chuva.

### 3.4.3 Modelagem da precipitação

No desenvolvimento do modelo, três diferentes naturezas de dados serão utilizadas para representar os eventos de precipitação como condições de contorno nas análises de fluxo: 1) chuvas medidas; 2) chuvas de médias mensais históricas e; 3) chuvas máximas, obtidas de avaliações estatística de dados históricos de chuva.

Os dados brutos são utilizados em escala de tipicamente 5 minutos e aplicados na análise de fluxo com a finalidade de verificação e/ou calibração do modelo de análise. Para otimizar a implementação dos dados brutos, são calculadas as acumuladas diárias que depois são concentradas a partir do tempo correspondente a 0,45 dia até o acréscimo dado pela duração real, com resolução de 5 minutos. Para considerar os picos de intensidade dos eventos de chuva, a chuva foi concentrada em função de uma parábola, preservando o total de precipitação do dia. A Equação 3.12 apresenta a metodologia para concentrar a chuva em parábola e a Figura 3.11 mostra o exemplo de um resultado gráfico.

$$P_t = P_{acum} \frac{-6(t^2 - (t_i + t_f)t + t_i t_f)}{(t_f - t_i)^3} \quad ( 3.12 )$$

onde  $P_t$  é a taxa de precipitação instantânea,  $P_{acum}$  é a precipitação acumulada do dia,  $t$  é o tempo qualquer entre  $t_i$  e  $t_f$ ,  $t_i$  é o tempo correspondente ao início da precipitação, e  $t_f$  é o tempo correspondente ao fim da precipitação.

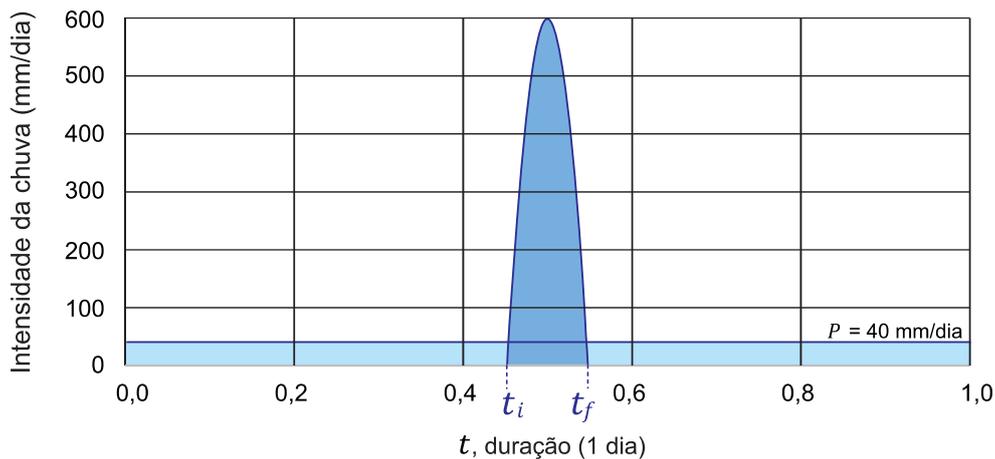


Figura 3.11: Chuva diária e chuva com distribuição parabólica.

As médias mensais históricas de chuva serão obtidas do conjunto de dados de 21 anos de chuva em escala diária utilizados na etapa de caracterização anual climática. As chuvas máximas serão obtidas pela Equação 3.13, segundo recomendações de Oliveira *et al.* (2005). Na avaliação probabilística da estabilidade dos taludes serão utilizadas chuvas máximas de longa e curta duração.

$$i = \frac{K TR^A}{(t_{dur} - B)^C} \quad ( 3.13 )$$

onde:  $i$  é a intensidade máxima média (mm/h);  $TR$  é o período de retorno, em anos;  $t_{dur}$  é o tempo de duração da chuva; e  $K$ ,  $A$ ,  $B$  e  $C$  são coeficientes locais ajustados por regressão linear.

#### 3.4.4 Modelagem da evapotranspiração

Assim como a precipitação, os dados de evaporação potencial podem ser obtidos e modelados de diferentes maneiras. As formas de obtenção de dados de evaporação potencial dependem do tipo de dado disponível. Os métodos de obtenção de dados de evaporação potencial podem ser classificados em métodos diretos e indiretos. O método direto mais usual é baseado no emprego do Tanque Classe A. Já os métodos indiretos são baseados em informações microclimáticas e adotam diferentes abordagens.

É adotado no modelo proposto neste trabalho, o cálculo da evapotranspiração potencial pela aplicação do método indireto de Thornthwaite (1948). Este método,

baseado no balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas diretas da evapotranspiração por lisímetros (Pereira *et al.*, 1997), estima a evapotranspiração potencial mensal ( $E_p$ ) pela utilização das seguintes Equações:

$$E_{T,P} = 16 \left( 10 \frac{T_{med}}{I} \right)^a (mm/mês), \quad 0^\circ C \leq T_{med} \leq 26^\circ \quad ( 3.14 )$$

$$E_{T,P} = -415,85 + 32,24T_{med} - 0,43T_{med}^2 (mm/mês), \quad T_{med} > 26^\circ \quad ( 3.15 )$$

onde:

$T_{med}$  = temperatura média mensal do ar em  $^\circ C$

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2T_{med})^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

$i$  = meses do ano

As equações fornecem a evapotranspiração potencial para condição padrão de meses com 30 dias, e dias com 12 horas de brilho solar. A evapotranspiração em escala de tempo diária pode ser obtida pela multiplicação de  $E_p$  pelo fator de correção proposto por Pereira *et al.* 1997), como segue:

$$C = \frac{F}{12} \frac{1}{30} \quad ( 3.16 )$$

onde:  $F$  é o fotoperíodo de um dia.

De forma aplicada, o volume de evapotranspiração potencial diário pode ser aplicado no período do dia com incidência de luz do sol. Desta forma, o modelo aqui proposto emprega dados de evapotranspiração estimados que serão distribuídos uniformemente ao longo de 12 horas por dia.

Para o cálculo da evapotranspiração real foi empregado o modelo teórico de Wilson (1990), no qual a taxa de evapotranspiração é inversamente proporcional à sucção total na superfície do terreno. Desta forma, a taxa de evaporação deve ser prevista

com base no teor de umidade do solo e na sua curva característica solo-água. De acordo com o modelo de Wilson (1990), a evapotranspiração real pode ser calculada da seguinte forma:

$$E_{T,R} = E_{T,P} \frac{RH - (p_v^a/p_{v,sat})RH_a}{1 - (p_v^a/p_{v,sat})RH_a} \quad ( 3.17 )$$

onde:

$$RH = p_{v,sat} e^{\frac{\psi_{sup} g W_v}{\gamma_w R (T+273,15)}} , \text{ umidade relativa no solo da superfície}$$

$$p_v^a = \text{pressão de vapor no ar próximo à superfície do solo, } kPa$$

$$p_{v,sat} = \text{pressão de saturação de vapor no ar próximo à superfície do solo, } kPa$$

$$RH_a = \text{umidade relativa do ar próximo à superfície do solo}$$

$$\psi_{sup} = \text{sucção no solo da superfície}$$

$$g = \text{aceleração da gravidade, } 9,81 m/s^2$$

$$W_v = \text{peso molecular da água, } 0,018016 \text{ } kg/mol$$

$$R = \text{constante universal dos gases, } 8,314 J/(mol.K)$$

$$T = \text{temperatura, } ^\circ C$$

### 3.4.5 Fluxo de água subsuperficial e função do nível d'água

O fluxo de água subsuperficial pode ser significativo em avaliações transientes de longa duração e pode ser expresso em termos de taxa de fluxo ou de cargas hidráulicas. A utilização do nível d'água (i.e., da carga hidráulica) como forma de consideração do fluxo subsuperficial se justifica por três motivos principais: 1) a variação sazonal do nível d'água, pela consideração do clima tropical, é bem definida e possui, em geral, níveis de máximo e mínimo interanuais semelhantes; 2) a obtenção de dados desta natureza, por meio de instrumentação em campo, é relativamente fácil; 3) a dificuldade da previsão ou medição direta do fluxo de água subsuperficial.

A Figura 3.12 indica a função do nível d'água e os parâmetros concebidos neste trabalho. Utilizando como dados de entrada o nível d'água inicial ( $NA_{ini}$ ), o nível d'água mínimo anual ( $NA_{min}$ ), o nível d'água máximo ( $NA_{max}$ ) e os números de dias de secagem do ano ( $d_{sec}$ ) é possível calcular o nível d'água para qualquer tempo,  $t$ ,

utilizando uma função periódica. Na especificação do nível d'água foi adotado como referência a sua distância em relação à superfície de solo. Os dias de secagem do ano representam o período do ano em que o nível d'água é decrescente. A equação e descrita a seguir:

$$f_{NA}^i = \omega \text{ sen}[\varphi_i(t - 365t_n + c_i)] + NA_{méd} \quad ( 3.18 )$$

onde:

$$i = 1, 2 \text{ ou } 3$$

$$i = 1 \text{ para } (t - t_n \cdot 365) < \frac{df_{NA}^1}{dt}$$

$$i = 2 \text{ para } (t - t_n \cdot 365) < \left( d_{sec} + \frac{df_{NA}^1}{dt} \right)$$

$$i = 3 \text{ para } (t - t_n \cdot 365) > \left( d_{sec} + \frac{df_{NA}^1}{dt} \right)$$

$$\omega = (NA_{máx} - NA_{mín})/2, \text{ amplitude do nível d'água}$$

$$\varphi_1 = 2\pi/d_{mol}, \text{ constante de período}$$

$$\varphi_2 = 2\pi/d_{sec}$$

$$\varphi_3 = \varphi_1$$

$$d_{mol} = 365 - d_{sec}, \text{ número de dias do ano de molhagem}$$

$$t = \text{tempo em dias}$$

$$t_n = t_{n-1} + 1, \text{ função de passo de tempo } (t_1 = 0)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots n_f$$

$$n_f = \text{número de anos considerados na análise}$$

$$c_1 = \text{arcsen}[(NA_{ini} - NA_{méd})/\omega]/\varphi, \text{ constante de primeiro ponto}$$

$$c_2 = \frac{\arccos(0)}{\varphi_2} - \frac{df_{NA}^1}{dt}$$

$$c_3 = \frac{\arccos(0)}{\varphi_1} - \left( \frac{\arccos(0)}{\varphi_2} - c_2 + d_{sec} \right) + d_{mol}$$

$$NA_{méd} = (NA_{máx} + NA_{mín})/2, \text{ nível d'água médio}$$

$$\frac{df_{NA}^1}{dt} = \arccos(0)/\varphi_1 - c_1$$

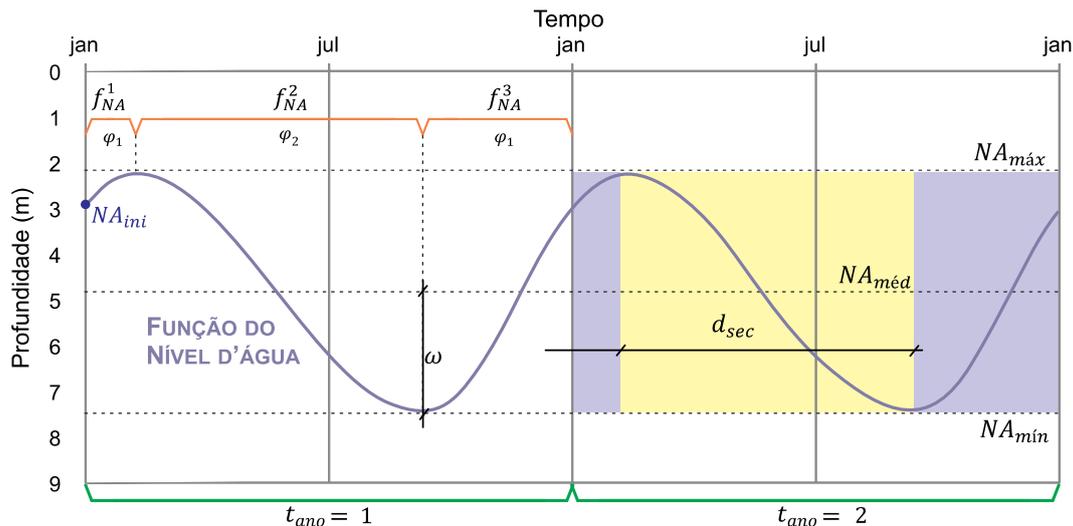


Figura 3.12: Função do nível d'água.

Tal solução pode ser utilizada até em problemas de previsão, dado o ritmo de variação do lençol freático. É importante também notar que o nível do lençol freático é influenciado, principalmente, pela escala regional do clima (escala da bacia hidrográfica), enquanto o fluxo solo-atmosfera sofre influências da escala local. Considerando também que chuvas intensas podem causar variações bruscas no nível do lençol, o comportamento do nível do lençol freático é complexo e intimamente relacionado com sua localização geográfica.

### 3.4.6 Combinação das condições de contorno

As condições atmosféricas são consideradas nas equações diferenciais parciais de conservação de umidade a partir das condições de contorno. Como revela a Figura 3.13, a variação da quantidade de água ( $\Delta V_w$ ) pode ser tratada como função da condição de fronteira superior (fronteira solo-atmosfera) e da condição de fronteira inferior. Desta maneira, as condições de contorno ficam completamente estabelecidas, no caso da avaliação unidimensional do balanço de água em perfis. Em condições bidimensionais, caso exista um nível d'água próximo do horizonte, a correspondente ausência de fluxo lateral torna adequada a adoção de condições de contorno igual a fluxo nulo nos limites laterais do domínio. Neste caso, assim como no caso unidimensional, a recarga e rebaixamento do lençol freático é função da condição de contorno inferior. No caso de nível de água inclinado, a existência de fluxo horizontal exigiria a avaliação das condições de contorno nas laterais do domínio baseadas, por exemplo, no nível d'água em múltiplas posições. Os limites laterais são

utilizados como condições de contorno de fluxo igual a zero. Sendo assim, a recarga e o rebaixamento do lençol freático é, portanto, diretamente, função da condição de fronteira inferior.

O fluxo de água na fronteira solo-atmosfera ( $N$ ) é função da precipitação ( $P$ ), da evapotranspiração ( $E_T$ ) e da poropressão no topo do perfil de solo. Se a evapotranspiração for menor que a precipitação, o fluxo na fronteira representa a saída de água do solo. Caso a precipitação seja maior que a evapotranspiração, o fluxo na fronteira representa a entrada de água no solo. E a quantidade de fluxo é dada pela diferença entre as duas grandezas. Porém, se a precipitação superar a evapotranspiração, e a poropressão no topo do solo for positiva, o valor de água infiltrada será menor do que a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração. A água não infiltrada é considerada, no balanço hídrico, como escoamento superficial ( $R_E$ ) e permanece presente até que as poropressões positivas no topo do solo sejam dissipadas. O escoamento superficial pode ser calculado como a diferença entre  $(P - E_T)$  e  $N$ . Para que a implementação numérica da infiltração sobre a condição de poropressão positiva seja facilitada e as poropressões dissipadas, pode-se considerar, sob esta condição, um fluxo de água na direção inversa.

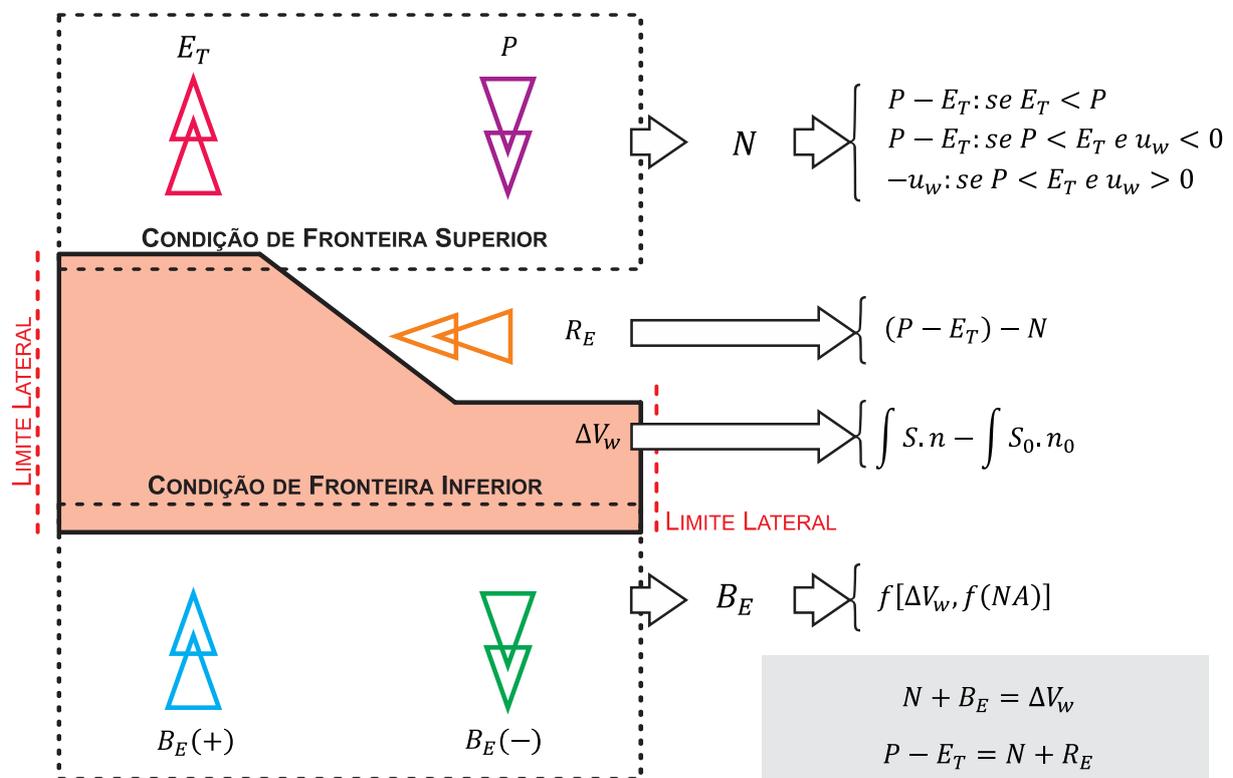


Figura 3.13: Condições de contorno para análise de fluxo.

A precipitação ( $P$ ) aplicada na superfície do perfil de solo deve ser, previamente, multiplicada pelo cosseno do ângulo formado pelo cruzamento da superfície do talude e a superfície horizontal ( $\cos \alpha$ ). Tal multiplicação se justifica pelo fato da trajetória da chuva que alcança o perfil ser vertical e sua medição acontecer na superfície horizontal.

O escoamento subsuperficial de água ( $R_E$ ) será função diretamente da função do nível ( $f_{NA}$ ) e, pode ser também influenciado pela condição na fronteira solo-atmosfera.

### **3.5 ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA**

Incertezas relacionadas às propriedades dos solos e às condições atmosféricas serão consideradas pelo modelo proposto pela utilização da abordagem rítmica probabilística. Busca-se nessa abordagem a avaliação da propagação das incertezas, consideradas na modelagem solo-atmosfera, para os fatores de desempenho, evidenciando a relação entre os elementos atmosféricos, geotécnicos e probabilísticos.

#### **3.5.1 Abordagem rítmica**

A resolução de problemas de engenharia desconsidera, de forma geral, a interação temporal entre a obra analisada e a ação atmosférica. Nas análises de estabilidade de taludes e estruturas de contenção, por exemplo, a aplicação da Mecânica dos Solos é, geralmente, simplificada pela consideração do solo no estado saturado. Porém, muitos perfis de solo nunca atingirão a saturação total que, se considerada, contribuirá para que os projetos sejam mais onerosos e menos confiáveis. Mesmo quando a situação mais desfavorável está relacionada com um nível do lençol freático máximo ou chuva mais intensa conhecidos, a falta de domínio das condições inicial e intermediária pode fornecer resultados igualmente incipientes. Apesar da farta disponibilidade de ferramentas para se projetar usando os conceitos de solos não saturados, isso ainda não é prática comum (Futai *et. al.*, 2011).

A abordagem rítmica aqui proposta é baseada em análises transientes de duração relativamente longa que permite a consideração de ciclos atmosféricos e a previsão

do comportamento de maciços. A metodologia proposta é inspirada na análise rítmica estabelecida na Climatologia Geográfica (Monteiro, 1971; Zavattini & Boin, 2013). A abordagem possui aplicações práticas relacionadas com o projeto e segurança de taludes, melhor definição da condição inicial, e planejamento de monitoramento e previsão de desempenho de obras geotécnicas em geral. Em termos de condições atmosféricas, podem ser considerados tanto ciclos rítmicos, interanuais, baseados em limites habituais, quanto eventos excepcionais.

A abordagem rítmica aqui proposta se preocupa com a análise dos eventos climatológicos como determinantes para a alteração do estado do solo, e considera que as condições atmosféricas rítmicas (i.e., sazonais) geram no estado do solo também um padrão rítmico, correspondente à combinação das condições atmosféricas e características de fluxo interno do maciço.

A percepção do ritmo na variação da poropressão e umidade do solo pode ser, de forma simples e direta, observada pela variação do nível do lençol freático ao longo de um ano. Com a série de dados do nível do lençol freático, é possível estimar a variação de quantidade de água e sucção ao longo do perfil, considerando a situação hidrostática. Para a porção de solo abaixo do nível d'água, tal consideração é eficiente pois o solo está no seu estado saturado. Já para a porção de solo acima do nível d'água, o contato direto do solo com a atmosfera pode gerar constantes processos de molhagem e secagem, alterando completamente o perfil de umidade e sucção do solo, distanciando a situação real da prevista pela consideração da condição hidrostática.

Ao considerar a aplicação do evento excepcional (arrítmico) ou desvios extremos, a abordagem rítmica, desconsiderando as médias e ressaltando tais disritmias, revela sua importância como estudo aplicado ao projeto e monitoramento de obras geotécnicas.

Na abordagem rítmica a avaliação dos elementos transientes que apresentam variações rítmicas será o foco. Os elementos transientes podem ser organizados em três grupos: atmosféricos, geotécnicos e probabilísticos. Os principais elementos atmosféricos rítmicos que serão investigados são: precipitação, evapotranspiração, temperatura e umidade relativa do ar. Esses elementos serão analisados na etapa de modelagem das condições de contorno de fluxo.

Os principais elementos geotécnicos que terão o seu comportamento rítmico estudado são: nível do lençol freático, volume de água no solo, distribuição de umidade e distribuição de sucção. Os elementos probabilísticos que serão avaliados são: distribuição probabilística de poropressão de água, fator de segurança, probabilidade de ruptura e fator de influência dos parâmetros considerados incertos.

### **3.5.2 Abordagem probabilística**

A abordagem probabilística aqui proposta, e inserida no conceito de abordagem rítmica, é baseada em análises transientes de longa duração que evidenciam a propagação do rítmico atmosférico nos parâmetros de desempenho do solo e podem fornecer critérios para a análise de projeto e programação de monitoramento.

A abordagem probabilística proposta é estruturada pela aplicação de três cenários chuvosos sobre o perfil de solo: ano habitual, ano excepcional chuvoso e chuva máxima. Estes cenários, mostrados na Figura 3.14, são definidos pela aplicação de diferentes condições climáticas. O cenário de ano habitual é baseado na aplicação de um ano chuvoso habitual (como definido na Seção 3.4.2) como condição de contorno para um problema geotécnico. Nesse cenário, as condições iniciais, as propriedades hidráulicas (CCSA e função de condutividade hidráulica), e os dados de evapotranspiração podem ser calibrados (ajustadas segundo as informações de referência) com o objetivo de obter a variação mínima de água armazenada após a aplicação do ano chuvoso habitual. A calibração na aplicação do cenário de ano habitual é justificada pela condição hidrológica fornecida na Equação 2.2.

A distribuição de poropressão final do cenário de ano habitual é utilizado como condição inicial do cenário de ano excepcional chuvoso.

No cenário de ano excepcional chuvoso é utilizado como condição de fronteira a série de chuvas de um ano excepcional chuvoso. Neste cenário é investigado o desenvolvimento do fator de segurança (e outros parâmetros relacionados ao desempenho) ao longo do tempo. Como o cenário é baseado na aplicação de um total de chuva que representa uma condição atmosférica crítica (considerando que os anos excepcionais chuvosos sejam críticos), os resultados de parâmetros de desempenho obtidos podem indicar limites críticos para a vida útil da obra, sendo úteis na definição de um programa de monitoramento e nas análises que envolvem a definição de um

projeto geotécnico. Para exemplificar a importância do estudo do ritmo dos parâmetros de desempenho, será apresentado a seguir uma simples aplicação prática.

É de conhecimento comum nas discussões estatísticas que viagens de avião são mais seguras que viagens de carro (i.e. a probabilidade de uma pessoa morrer numa viagem de carro é maior). Supondo que em um ano (365 dias), um indivíduo “um” passe 364 dias viajando de carro e um dia viajando de avião, e outro, indivíduo “dois”, passe um dia viajando de carro e o restante dos dias do ano viajando de avião, qual dos dois indivíduos possuem a maior probabilidade de morrer em uma viagem? Mesmo os dois indivíduos possuindo a mesma probabilidade crítica de um dia para morrer (a viagem de carro), o indivíduo “um” passa mais tempo no ano viajando de carro e, portanto, no ano, possui maior probabilidade de morrer do que o indivíduo “dois”. Portanto, insere-se aqui a importância não somente da probabilidade de ruptura de um talude submetido à uma condição crítica, mas como a probabilidade de ruptura varia ao longo do tempo. Informações como estas podem colaborar para que melhores decisões sejam realizadas na Engenharia.

Como as determinações de um ano habitual e um ano excepcional chuvoso são baseadas na chuva diária acumulada, a compreensão de como um cenário de chuva máxima aplicado em durações específicas torna-se também interessante visto o carácter prático do modelo. Desta forma, o cenário de chuva máxima utiliza a condição mais desfavorável do cenário de ano excepcional chuvoso como condição inicial para aplicação de duas categorias de chuvas máximas: uma de curta duração e alta intensidade, e outra de longa duração e baixa intensidade. As duas categorias são baseadas na aplicação da curva IDF (intensidade, duração e frequência). É importante que o tempo de retorno utilizado seja compatível com o tempo de vida útil para o projeto, ou com as bases do programa de monitoramento.

A abordagem probabilística aqui proposta não tem como objetivo a determinação de uma condição mais desfavorável (maior probabilidade de ruptura, por exemplo) certa para o talude. Mas fornece uma maior compreensão sobre a evolução dos parâmetros de desempenho nas análises transientes de longa duração, sendo estas informações valiosas para os tomadores de decisão e no gerenciamento de riscos.

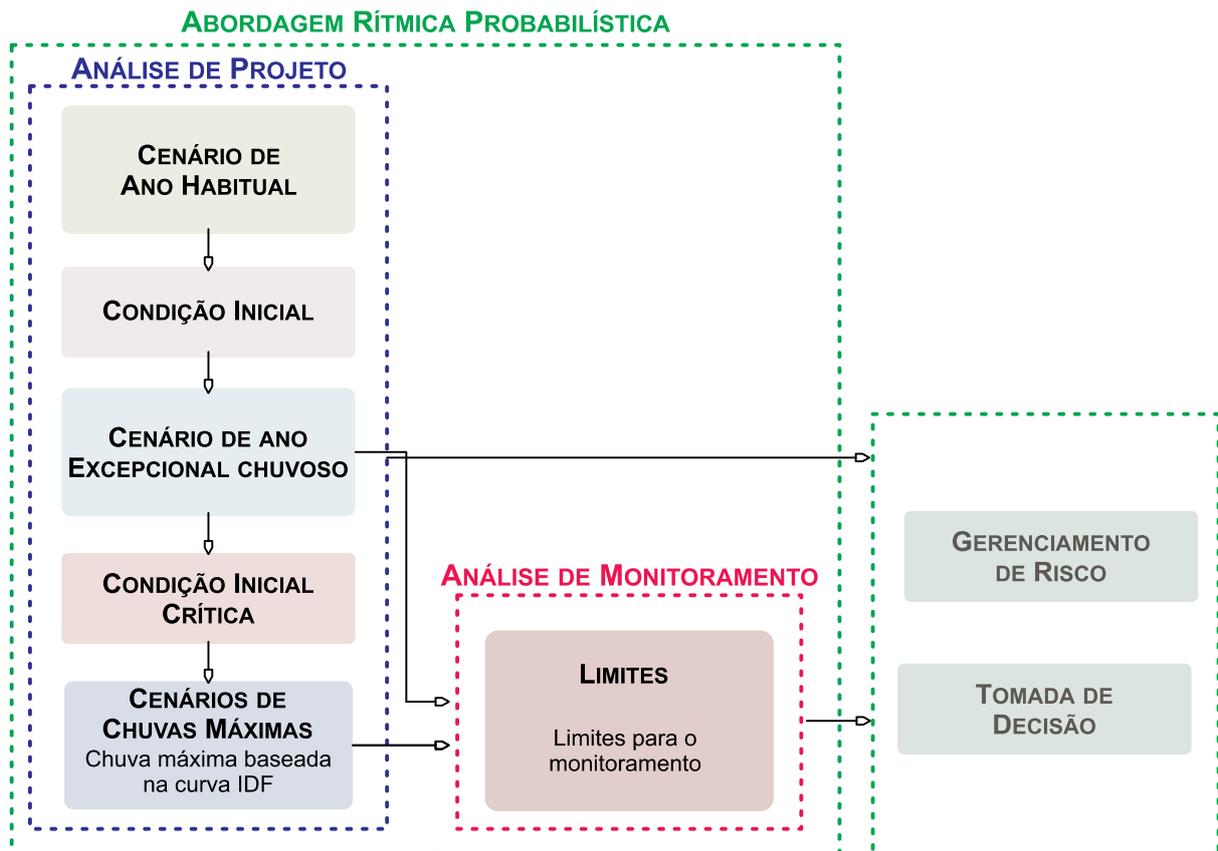


Figura 3.14: Metodologia de aplicação da abordagem rítmica probabilística em problemas de estabilidade de taludes.

### 3.5.3 Considerações finais sobre a abordagem rítmica probabilística

A facilidade que hoje tem-se de aplicar métodos matemáticos complexos (como os relacionados com o fluxo de água no solo, por exemplo) permite que a abordagem probabilística seja realizada em vários cenários e vários passos de tempo. Sendo assim a abordagem probabilística também pode ser desenvolvida, de forma viável, pela consideração da abordagem rítmica. A possibilidade de submeter problemas geotécnicos à abordagem rítmica possui grandes vantagens, tais como:

- Maior segurança em relação a condição inicial de fluxo do problema
- Maior controle sobre o desempenho da obra pela possibilidade de acompanhar o fator de segurança de forma sazonal
- Projetos menos onerosos baseados na aplicabilidade da Mecânica dos Solos Não Saturados
- Possibilidade de inserir processos de depreciação ao problema (como a degradação do enrocamento e filtro de barragens) e conseqüentemente obter, com mais clareza, a vida útil da obra

- Compreender a relação que rege a interação de cenários atmosféricos específicos no desempenho da obra

### 3.6 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Nesta seção será apresentada e discutida a metodologia de aplicação do modelo proposto. A Figura 3.15 apresenta as principais etapas consideradas na metodologia: caracterização, monitoramento, implementação das equações diferenciais parciais, tratamento dos dados, Safe-DP, métodos probabilísticos e análise de sensibilidade.

A metodologia é fundamentada na caracterização de um perfil de solo tropical específico e no clima que age sobre o mesmo. Será considerada na presente análise um campo experimental implantado em Aparecida de Goiânia (GO) que consiste em um poço de monitoramento de mais de 4 m de profundidade, dois piezômetros e uma miniestação meteorológica. Das amostras deformadas e indeformadas de solo deste campo experimental foram obtidos para várias profundidades: índice de vazios, massa específica dos grãos, granulometria, curvas características solo-água e permeabilidade saturada. A caracterização do clima se dará pela avaliação de 21 anos de dados diários de chuva.

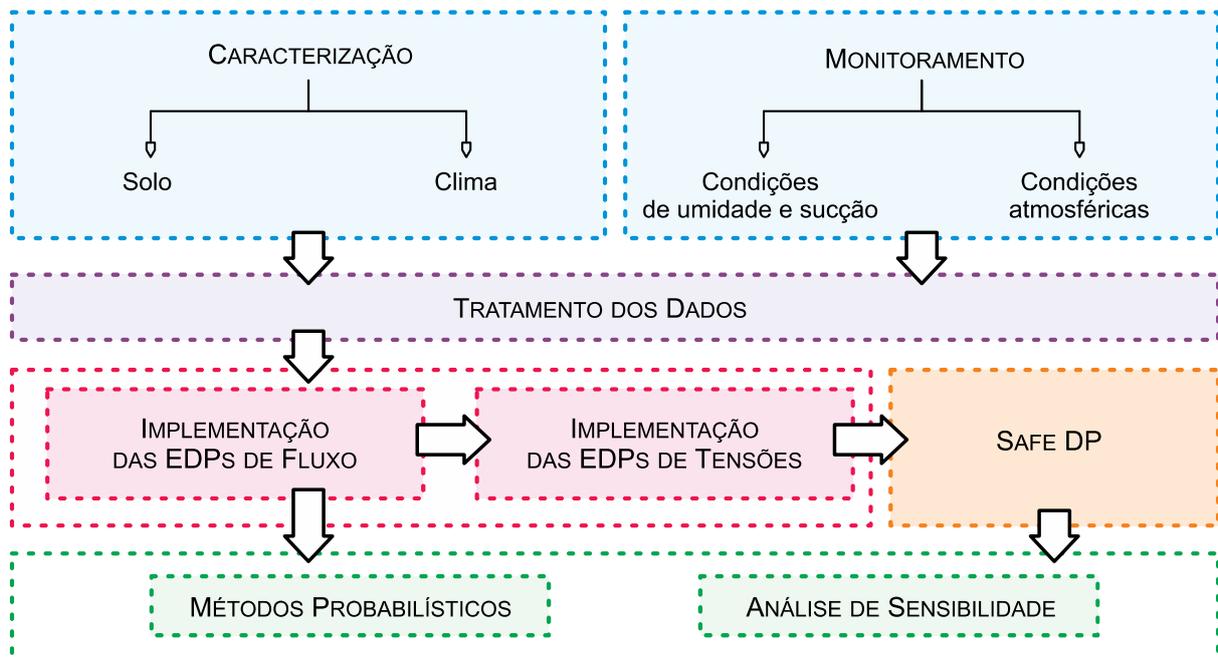


Figura 3.15: Visão geral da metodologia.

As condições de umidade e de sucção do solo, juntamente com as condições atmosféricas, foram monitoradas de 2010 a 2013 no campo experimental. Dois métodos de monitoramento de sucção foram aplicados: papel filtro e sucção. A umidade foi obtida pela retirada direta de amostra e secagem em estufa. As condições atmosféricas monitoradas foram: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento. A grande quantidade de dados obtida foi organizada e tratada em planilhas eletrônicas.

As equações diferenciais parciais de fluxo e tensões, apresentadas na Seção 3.1, foram implementadas no programa FlexPDE. A modelagem solo-atmosfera, proposta na Seção 3.4, foi implementada na análise de fluxo utilizando como dados de entrada a caracterização do solo e as condições atmosféricas monitoradas. A validade da análise de fluxo foi discutida pela comparação dos resultados obtidos e os dados de sucção e umidade monitorados no campo experimental.

A análise de tensões e estabilidade foi desenvolvida considerando dois taludes hipotéticos, a caracterização do solo tropical e do clima, e as condições atmosféricas monitoradas. Na análise de tensões, também realizada no programa FlexPDE, para calcular os valores de tensões totais foi considerado a quantidade de água no solo obtida em uma análise de fluxo, realizada previamente. Por fim, a distribuição de poropressão de água e tensões totais foram utilizadas na análise de estabilidade realizada no programa Safe-DP que fornece, para os taludes analisados, o fator de segurança e a superfície crítica.

A abordagem probabilística foi aplicada para a avaliação da previsão de sucção e umidade do perfil do solo do campo experimental e para a análise da estabilidade dos taludes hipotéticos. Na aplicação da abordagem foram utilizados os métodos probabilísticos FOSM e APEM.

As metodologias específicas de implementação das equações diferenciais parciais de fluxo e tensões, e aplicação dos métodos probabilísticos serão apresentadas em seguida com detalhes. Mais informações e análises sobre as etapas de caracterização, monitoramento e tratamento dos dados serão apresentadas no Capítulo 4.

### 3.6.1 Implementação das análises de fluxo e tensões no FlexPDE

A implementação das equações diferenciais de fluxo e tensões foi desenvolvida no programa FlexPDE. O programa é uma ferramenta computacional que fornece um ambiente de solução integrada (permitindo que o usuário descreva o problema utilizando uma linguagem de computação simples), modelagem matemática e dados de saída das soluções. O usuário é responsável pela escolha das equações diferenciais parciais, condições de contorno e propriedades dos materiais. A Figura 3.16 apresenta as telas de entrada de dados e de apresentação gráfica da versão 6.36 do programa FlexPDE, utilizado na pesquisa. A descrição completa do programa pode ser encontrada no manual do usuário do FlexPDE disponível no site do desenvolvedor (<http://www.pdesolutions.com>).

No FlexPDE as variáveis da solução são interpoladas por polinômios de ordem baixa sobre cada célula da malha de elementos finitos. A mudança descontínua em condições de contorno ao longo do trajeto de fronteira exige um intenso refinamento da malha para resolver a transição e, conseqüentemente, um maior tempo para solução do problema é necessário. Por isto, sempre que possível, deve-se evitar inserir parâmetros de entrada (ou desenvolver estados) descontínuos.

Nas condições de contorno de fluxo as cargas impostas foram amortecidas considerando, para o cálculo do fluxo basal, uma função suave dada a variação do nível d'água (função apresentada na Seção 3.4.5), e na fronteira solo-atmosfera, a precipitação e a evapotranspiração real foram aplicadas segundo a função parabólica, evitando aplicações bruscas de carga hidráulica. É importante também que a condição inicial imposta seja consistente, ou seja, ela deve corresponder a um estado de poropressão possível para o período de análise inicial.

A curva característica solo-água de ajuste baseada em hipérbolos proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) e a função de condutividade hidráulica apresentada na Seção 3.3 também favorecem para que a distribuição e desenvolvimento da umidade e da sucção sejam suavizadas.

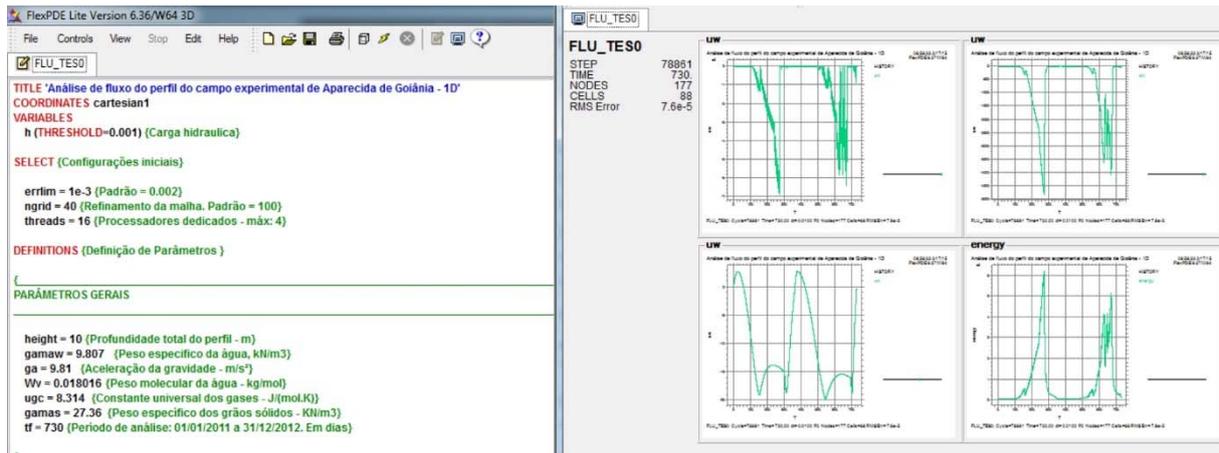


Figura 3.16: Exemplos de telas do FlexPDE.

A consideração de análises transientes de longa duração, e a complexidade das condições de contorno de fluxo foram grandes desafios na implementação das equações diferenciais parciais. Buscando evitar descontinuidades na descrição das variáveis, e otimizar o tempo de análise vários incrementos são discutidos com detalhes a seguir.

### 3.6.1.1 Função de transição SWAGE

A adoção de diferentes valores para uma mesma propriedade ao longo da profundidade pode, pela descontinuidade imposta, gerar dificuldades na resolução de equações diferenciais parciais. Por exemplo, para um perfil de 10 metros de solo, obtidas duas curvas características solo-água experimentais, é comum na elaboração de modelos de fluxo considerar dois trechos e adotar uma CCSA para cada um. Porém, é possível realizar uma transição suave entre as curvas pela aplicação da função SWAGE do FlexPDE para os parâmetros da curva, como indica a Figura 3.17. Esta transição somente é possível pela adoção de uma equação de ajuste único. Em análises de viabilidade a equação de ajuste bimodal proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) mostrou-se eficiente para ajustar tanto para curvas bimodais como para curvas unimodais, e será considerada na análise de fluxo.

A função SWAGE é equivalente a aplicação da função SE, porém, no trecho de transição dado pelo parâmetro de transição, a função é suavizada.

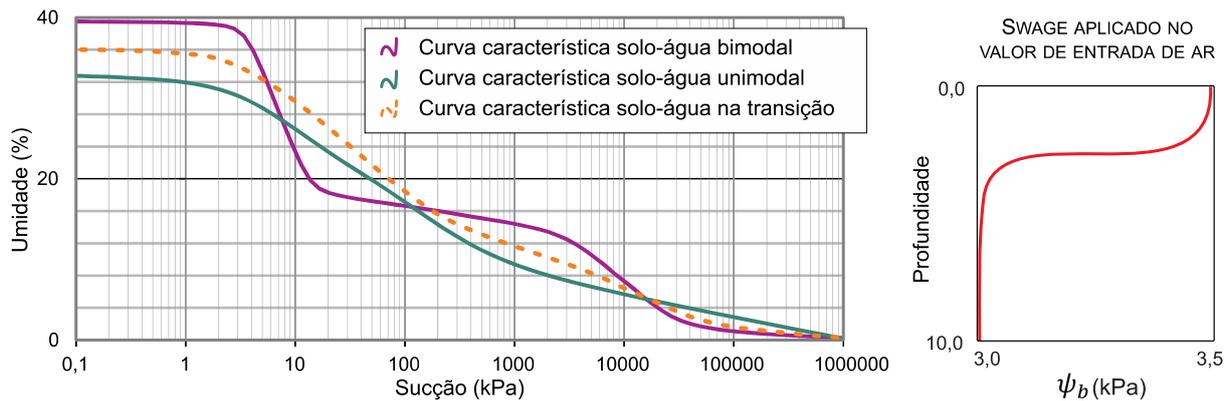


Figura 3.17: Aplicação da função SWAGE.

### 3.6.1.2 Função do nível d'água e função de condutividade hidráulica

Conhecido o comportamento rítmico do nível d'água, é possível que ele seja ajustado à uma função e considerado na modelagem de problemas de fluxo pela aplicação da carga hidráulica correspondente na base do perfil de solo considerado. Com o objetivo de garantir a distribuição hidrostática abaixo do nível d'água, pode ser adotado na zona freática um maior valor de condutividade hidráulica, colaborando para que a carga hidráulica imposta na base do perfil seja, o mais rápido possível, transmitida até o nível do lençol freático. Tal consideração pode também otimizar o desempenho do modelo ao facilitar o fluxo na zona freática.

### 3.6.1.3 Solo mais permeável no topo

Na análise de fluxo, quando o solo é submetido a longos períodos de evapotranspiração, a sucção, na região mais rasa, pode alcançar altos valores. Por consequência, a condutividade hidráulica pode chegar a valores bem baixos, e a fronteira solo-atmosfera aproxima de uma condição impermeável. Por isto, aplicar valores de precipitação, após longos períodos de seca, pode gerar grandes dificuldades na resolução de problemas de fluxo.

Na tentativa de facilitar a resolução de problemas de fluxo na transição entre períodos secos e chuvosos, é possível adotar uma camada de solo de pequena espessura que seja mais permeável impedindo que na fronteira solo-atmosfera sejam alcançados valores extremos, inviabilizando a resolução do problema. A espessura dessa camada deve ser pequena o suficiente para não alterar o regime do fluxo. É importante observar que este ajuste é coerente com o que geralmente acontece com a camada

mais superficial dos perfis de solo, que, submetida às intensas intempéries e servindo de suporte para vegetais torna-se mais porosa e, conseqüentemente, mais permeável.

### 3.6.1.4 Fluxo de água na fronteira solo-atmosfera

O fluxo de água na fronteira solo-atmosfera, como já discutido na Seção 3.4, depende essencialmente da precipitação efetiva ( $P - E_{T,R}$ ). Quando a precipitação efetiva é menor do que zero, indicando que a evapotranspiração supera o valor da precipitação, aplica-se a precipitação efetiva na fronteira. Já quando a precipitação efetiva é maior do que zero, é necessário observar a poropressão de água, pois ela pode indicar (quando positiva) o escoamento superficial, diminuindo o valor de entrada de água na fronteira. Na condição indicada na Figura 3.13, quando a poropressão no topo do perfil for positiva, aplica-se um fluxo no sentido contrário numericamente igual a  $u_w$  para facilitar a dissipação das poropressões e, por conseqüência, um providenciar um fluxo mais estável. Porém, na implementação do modelo no FlexPDE, optar somente por condicionais simples (do tipo: *se  $x > y$  então A senão B*), pode gerar instabilidade no processamento, e conseqüentemente uma perda de precisão, já que a transição oferecida pela condicional é brusca. Com o objetivo de suavizar a transição entre as condições foi proposto para a modelagem a seguinte equação:

$$N = P_{efe} \operatorname{atan} \left( \frac{(-10u_w)^3}{\log(k^w)^2} \right) / \left( \frac{\pi}{2} \right) \text{ para } P_{efe} \geq 0 \quad ( 3.19 )$$

$$N = P_{efe} \text{ para } P_{efe} < 0$$

onde:  $N$  é o fluxo de água na fronteira solo-atmosfera,  $P_{efe}$  é a precipitação efetiva ( $P - E_{T,R}$ ),  $P$  é a precipitação,  $E_{T,R}$  é a evapotranspiração real e  $u_w$  é a poropressão de água.

A Figura 3.18 ilustra a transição suavizada pela aplicação da Equação 3.19.

A largura do trecho de transição irá depender da poropressão de água e do valor da condutividade hidráulica, ambos correspondentes ao topo do perfil. Quanto menor o valor da condutividade hidráulica, maior será o trecho de transição devido à dificuldade de fluxo imposta pelos baixos valores de condutividade hidráulica.

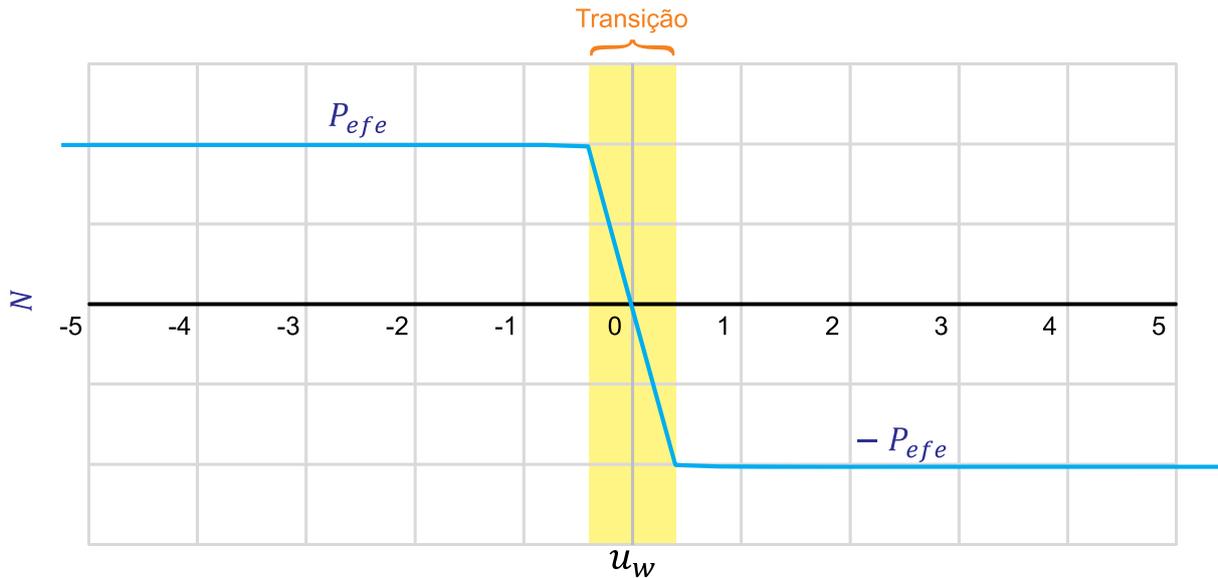


Figura 3.18: Transição de fluxo de água na fronteira solo-atmosfera com a variação da poropressão.

O trecho de transição otimiza o cálculo do escoamento superficial que, pode ser calculado pela diferença entre a precipitação efetiva e o fluxo na fronteira solo-atmosfera. Só existirá escoamento superficial para casos de precipitação efetiva positiva.

### 3.6.1.5 Medição de erro

O erro da implementação numérica pode ser avaliado pela conservação de massa na análise de fluxo pela diferença entre a integral de volume da umidade volumétrica ( $V_{w1}$ ) e o balanço de água no interior do solo ( $V_{w2}$ ). A Equação é definida a seguir:

$$\epsilon(\%) = 100 \frac{(V_{w1} - V_{w2})}{V_{w1}} \quad ( 3.20 )$$

onde:

$$V_{w1} = \int \theta \, dv$$

$$V_{w2} = \int \theta_0 \, dv + \int N' \, dt + \int B_E' \, dt$$

$$N' = \int N \, dv$$

$$B_E' = \int B_E \, dv$$

### 3.6.2 Aplicação dos métodos probabilísticos

Dois métodos probabilísticos encontrados na literatura serão considerados neste trabalho: FOSM e APEM (Gitirana Jr., 2005). A Figura 3.19 apresenta como a abordagem probabilística será desenvolvida. A aplicação dos métodos probabilísticos será realizada em planilha eletrônica e serão adotados como dados de entrada as distribuições probabilísticas das variáveis consideradas como incertezas. Os métodos probabilísticos serão aplicados na análise dos perfis de poropressão de água e dos parâmetros de desempenho.

Devem ser consideradas variáveis independentes incertas aquelas que possuem grande influência na variável dependente. A influência de cada variável independente no cálculo da variável dependente é realizada pela análise de sensibilidade. No presente modelo, considerando a análise de sensibilidade dos taludes hipotéticos apresentados por Gitirana Jr. (2005), quatro variáveis serão consideradas incertas: valor de entrada de ar ( $\psi_b$ ), condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}^w$ ), coesão efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ).

Na análise de fluxo, considerando o valor de entrada de ar e condutividade hidráulica saturada como parâmetros incertos, são obtidas distribuições probabilísticas de poropressão e umidade, que, por sua vez, são dados de entrada na análise de tensões. As análises de tensões, obtidas considerando dados de entrada probabilísticos, também fornecem resultados incertos que se propagam novamente para a análise de estabilidade.

Para a análise de estabilidade mais duas variáveis são consideradas incertas: a coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo. Por fim, na análise de estabilidade, é obtido a distribuição probabilística do fator de segurança e, conseqüentemente, define-se a probabilidade de ruptura.

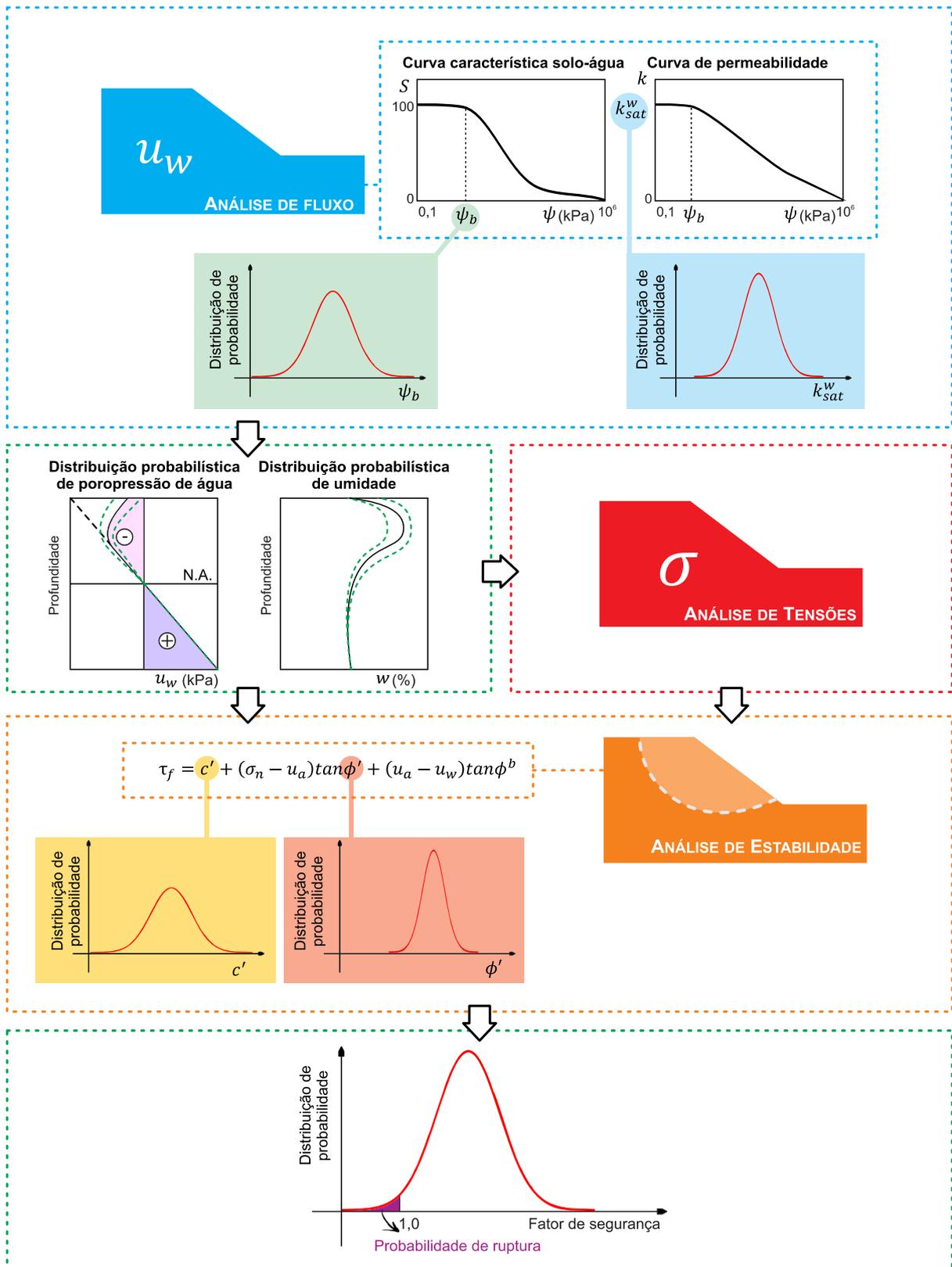


Figura 3.19: Aplicação da abordagem probabilística.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A síntese da metodologia aplicada, em termos dos dados de entrada e saída de cada etapa, é mostrada na Figura 3.20. São considerados como dados de entrada para a análise de fluxo a distribuição de chuva, a evapotranspiração diária, a umidade relativa, a função do nível d'água e a temperatura, além das características hidráulicas do solo. A análise de fluxo fornece a umidade gravimétrica do solo para a consideração do peso próprio na análise de tensões que, por sua vez, fornece tensões normais para análise de estabilidade. A abordagem rítmica probabilística é, então, aplicada para os dados de poropressão de água e fator de segurança. Todos os dados considerados no modelo são organizados em planilha eletrônica e gerados no formato de arquivo texto para serem considerados dados de entrada nos programas FlexPDE e SafeDP que fornecem os resultados finais da avaliação.

Apesar do modelo proposto focar na estabilidade de taludes como aplicação prática, o modelo pode ser, a partir da modelagem solo-atmosfera, aplicada a vários outros problemas geotécnicos. A Figura 3.21 ilustra aplicações práticas que podem se beneficiar com a modelagem solo-atmosfera fundamentada na obtenção e tratamento das condições de contorno.

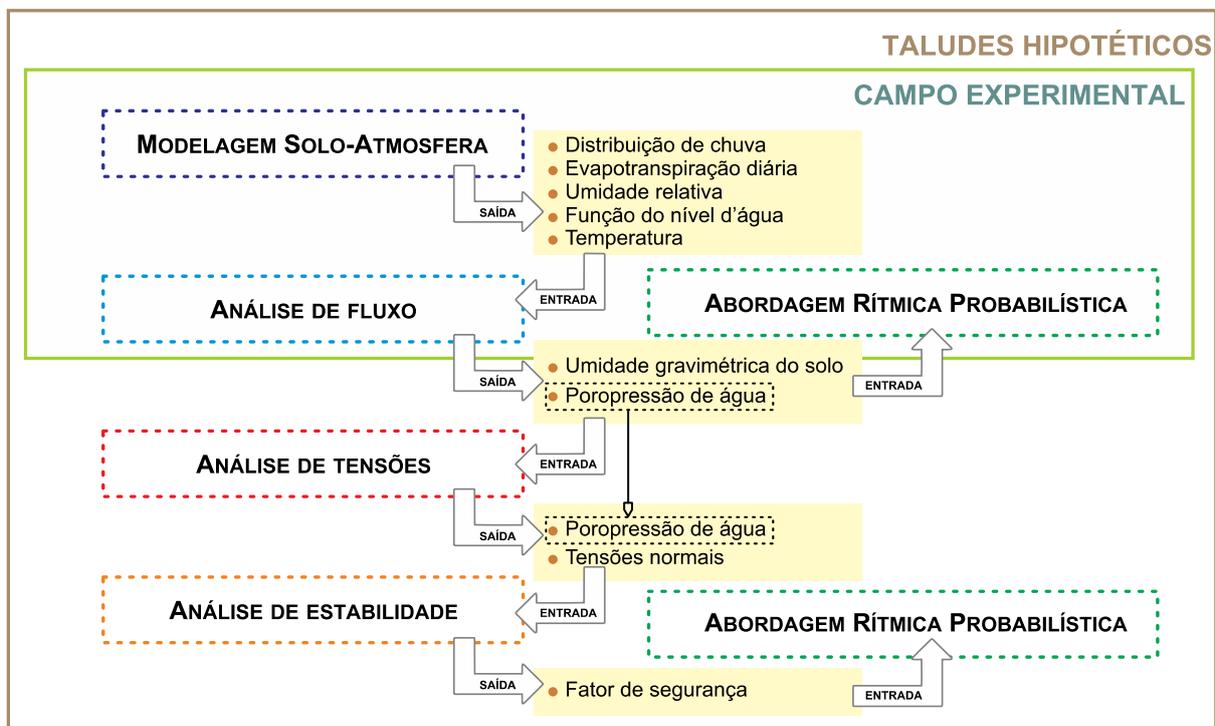


Figura 3.20: Síntese da aplicação do modelo proposto.

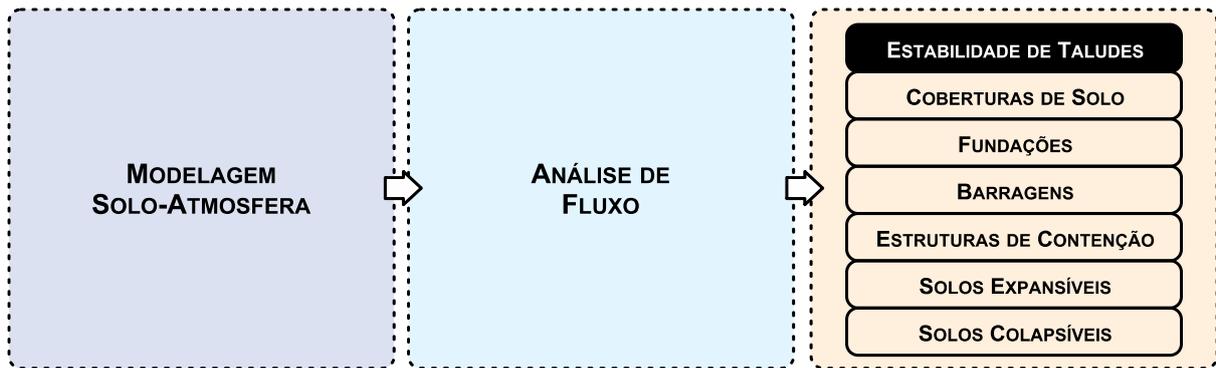


Figura 3.21: Avaliação de aplicações práticas pela consideração dos dados atmosféricos.

O modelo proposto será aplicado, a seguir, para dois casos práticos: um estudo do fluxo de água no solo e uma análise da estabilidade de taludes hipotéticos. Nos dois casos a abordagem rítmica probabilística será aplicada, porém, no primeiro caso as análises de tensões e estabilidade não serão consideradas.

## **4 ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA APLICADA NA ANÁLISE DE FLUXO DE ÁGUA NO SOLO**

Este capítulo apresenta a aplicação da abordagem rítmica probabilística na previsão do balanço e fluxo de água, e na análise da interação solo-atmosfera, considerando um perfil de solo tropical. A Região Centro-Oeste brasileira tem um clima marcado por estações chuvosas e de estiagem bem definidas. No caso do Estado de Goiás, a estiagem é prolongada, geralmente iniciando em abril e terminando em setembro. São esperadas, portanto, significantes variações de sucção e umidade do solo próximo da superfície. A compreensão do desenvolvimento do ritmo do estado do solo é fundamental para a avaliação de maciços sujeitos às condições atmosféricas.

O perfil em questão foi monitorado entre junho de 2010 e setembro de 2013, sendo que os detalhes sobre a implantação do monitoramento e os dados parciais (de agosto de 2010 a março de 2011) foram apresentados por Silva Júnior (2011). No presente trabalho serão evidenciados os dados medidos de janeiro de 2011 a 2012, contemplando dois anos consecutivos de monitoramento.

O monitoramento foi realizado de forma a oferecer dados de umidade e sucção ao longo da profundidade e do tempo que pudessem ser empregados na verificação do desempenho do modelo de análise de fluxo e interação solo-atmosfera. A natureza desafiadora do problema em questão, que envolve processos transientes de longa duração e com condições de contorno complexas e dinâmicas, foi modelada conforme a metodologia descrita no Capítulo 3. Serão apresentadas a seguir breves descrições do perfil de solo e condições atmosféricas monitorados, das propriedades do solo e das metodologias adotadas para medição de umidade e sucção.

### **4.1 DESCRIÇÃO DO CAMPO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO**

O campo experimental foi implantado nas dependências do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.C), localizado em Furnas (Aparecida de Goiânia – GO). Suas coordenadas geográficas são 16°47'47" sul e 49°13'49" oeste e a altitude é de 788 m. Esta região é constituída principalmente de micaxistos e quartizitos micáceos, dando origem a solos residuais.

O campo experimental de Furnas em Aparecida de Goiânia é apresentado na Figura 4.1. Foi aberto, no campo experimental, um poço para retirada de amostras deformadas e indeformadas. Uma extensa campanha de ensaios de laboratório foi conduzida por Borges (2010), incluindo ensaios de caracterização física, química e mineralógica e de determinação das propriedades hidráulicas do solo (incluindo curvas características solo-água).

O poço de amostragem foi preservado e transformado em um poço de acesso para a instalação de instrumentos utilizados no monitoramento da sucção e da umidade do solo ao longo do perfil. Silva Júnior (2011) desenvolveu e implementou uma metodologia de monitoramento de dados atmosféricos e da umidade e sucção do perfil do solo e realizou, durante o ano de 2010 e o início de 2011, testes analisando o desempenho do monitoramento. A presente pesquisa deu continuidade na coleta de dados nos anos de 2011 a 2013, focando na análise dos mesmos e na previsão numérica dos perfis de umidade e sucção.

A Figura 4.2 apresenta a disposição espacial dos diversos instrumentos empregados no monitoramento do perfil do solo. As condições atmosféricas foram monitoradas utilizando uma miniestação meteorológica, e as seguintes variáveis foram monitoradas: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento. A profundidade do lençol freático foi monitorada utilizando dois piezômetros (pontos “E” e “F” da Figura 4.2) constituídos por um cano PVC inteiriço de 10 m de comprimento, e um tampão na extremidade. O nível d’água foi medido, utilizando os dois piezômetros, com o auxílio de um medidor de nível d’água, popularmente conhecido como “piu”.



Figura 4.1: Campo experimental em Aparecida de Goiânia.

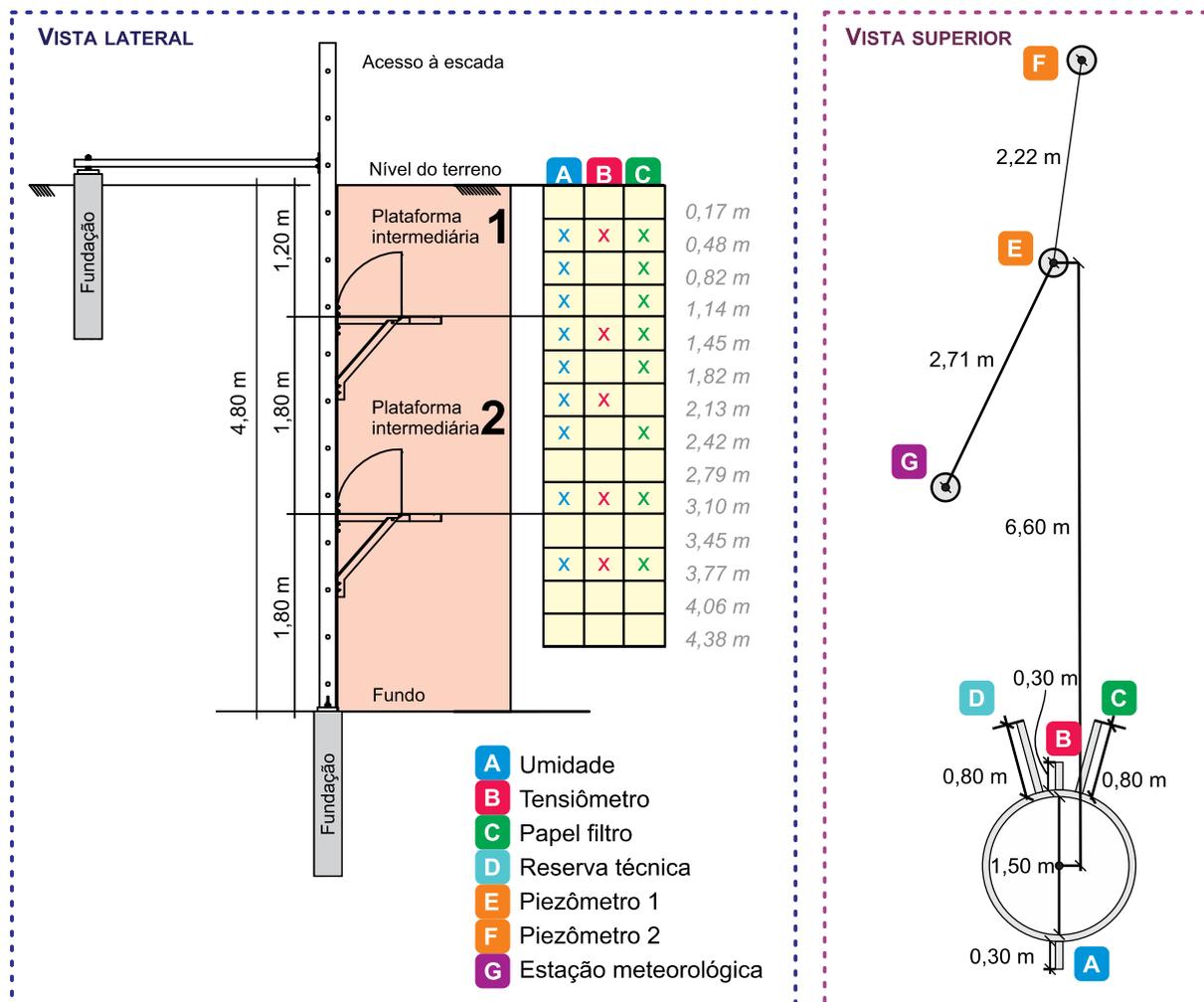


Figura 4.2: Disposição dos equipamentos no campo experimental.

Os dados do perfil do solo monitorados foram umidade e sucção. A umidade foi obtida através da retirada de amostras do solo seguida de secagem em estufa, já a sucção foi obtida por dois métodos de medição: papel filtro e tensiômetro (este último com capacidade para medir sucções de até 100 kPa). O método do papel filtro compreende as seguintes etapas:

- 1) Cortar o papel filtro em pedaços retangulares de 3 x 1 cm.
- 2) Fixar dois papéis filtro no prendedor do dispositivo para a instalação do papel filtro, fabricado com um tubo interno – que contém o prendedor – com 20 mm de diâmetro, e um tubo externo, com 25 mm de diâmetro (Figura 4.3 A).
- 3) Inserir o tubo interno no tubo externo, e colocar o dispositivo (posição fechada - Figura 4.3 B) no canal aberto no solo, conforme ilustrado na Figura 4.3; com o cano externo fixo, girar o cano interno de modo a expor os papéis filtro ao contato indireto com o solo, conforme a Figura 4.3 C.

- 4) Após 14 dias, realizar o procedimento de retirada dos dois papéis filtro, descrito a seguir. O cano interno é girado, voltando a posição fechada, e removido. Com luvas e pinça, os papéis filtro devem ser retirados e colocados cada um sobre um recorte de papel alumínio quadrado com 10 cm de lado, previamente identificado com fita adesiva e caneta e pesado utilizando balança com resolução de 0,0001 g. Os papéis alumínio devem ser dobrados com cuidado de modo a isolar bem os papéis filtro. Os dois conjuntos, papel filtro e papel alumínio, são acondicionados cada um em um recipiente hermeticamente fechado e então levados ao laboratório, onde são pesados utilizando a balança com resolução de 0,0001 g. A diferença entre o peso do conjunto e o peso do papel alumínio é igual ao peso do papel filtro.
- 5) Após a pesagem do papel filtro, o mesmo deve ser colocado em uma cápsula, com devida identificação, e, então, inserida em uma estufa à 60 °C, para secagem do papel filtro.
- 6) O papel filtro deve permanecer na estufa por um período mínimo de seis horas. Passado este período, o papel filtro é novamente pesado e a sua umidade calculada.
- 7) A partir da umidade do papel filtro é possível obter o valor de sucção correspondente através da curva de calibração do papel filtro. Foi utilizada a curva de calibração de de Chandler *et al.* (1992) desenvolvida para o papel Whatman nº 42.

Os furos (representados pontos A, B, C e D da Figura 4.2) possuem aproximadamente 5 cm de diâmetro e foram realizados utilizando brocas. Estes furos permaneceram sempre ocupados e vedados pela utilização de “esperas” confeccionadas em tubos de PVC que somente eram removidos quando as medições eram feitas nos mesmos. Mais detalhes da metodologia desenvolvida para medição de sucção no campo pelo método do papel filtro podem ser encontrados em Silva Júnior *et al.* (2011).

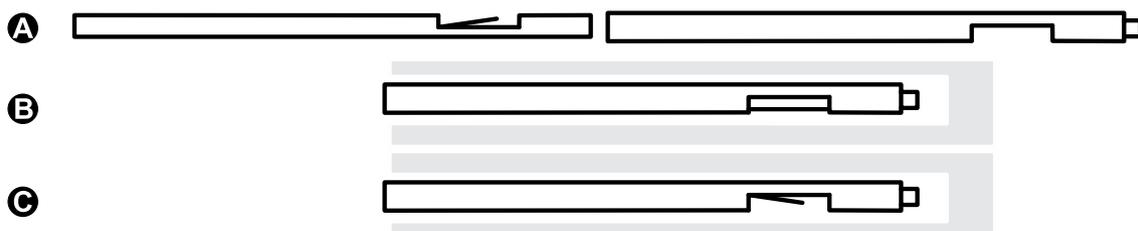


Figura 4.3: A) Tubo externo e tubo interno; B) Posição fechada; C) Posição aberta.

O processo de saturação de um tensiômetro tem duração aproximada de 40 minutos e foi sempre realizado antes da utilização do tensiômetro no campo. A bomba a vácuo se mostrou um método eficiente para saturação dos tensiômetros. Um melhor contato entre o copo cerâmico poroso e o solo foi observado principalmente nas profundidades mais úmidas.

#### **4.1.1 Detalhamento do perfil de solo e suas propriedades**

Serão apresentadas nesta seção, de forma objetiva, as propriedades do perfil de solo, com ênfase nas propriedades hidráulicas, necessárias para o estudo do fluxo e interação solo-atmosfera. Os dados apresentados nesta seção foram obtidos em uma extensa campanha experimental cujos resultados foram publicados por Borges (2010).

A Figura 4.4 apresenta os limites de Atterberg, a condutividade hidráulica saturada e o índice de vazios ao longo de perfil do solo de Aparecida de Goiânia. Os limites de Atterberg foram obtidos com secagem prévia do material e indicam um índice de plasticidade praticamente constante ao longo da profundidade.

Os índices de vazios apresentados foram obtidos a partir dos corpos de prova de amostras indeformadas de solo utilizados no ensaio de papel filtro. Os valores dos índices de vazios vão de 0,86 na profundidade de 4,8 m até 1,12 na profundidade de 2,2 m. Para a região mais rasa, os índices de vazios possuem o valor médio de 1,1 e a partir de 3 m de profundidade os valores dos índices de vazios diminuem ficando próximos de 0,9. O dado do índice de vazios é fundamental para o cálculo da umidade gravimétrica do solo e a determinação do peso específico natural, utilizados nas análises de fluxo, tensões e estabilidade. A distribuição dos valores de condutividade hidráulica saturada indica um solo mais permeável no topo do perfil ( $10^{-6}$  m/s) e um solo menos permeável para a região próxima de 4 m de profundidade, onde também foram observados menores valores de índice de vazios. Os valores de índice de vazios e condutividade hidráulica serão utilizados na definição do perfil de solo para análise numérica na Seção 4.3.1. A discriminação do solo em bimodal e unimodal foi realizada segundo o formato das curvas características solo-água correspondentes às profundidades analisadas.

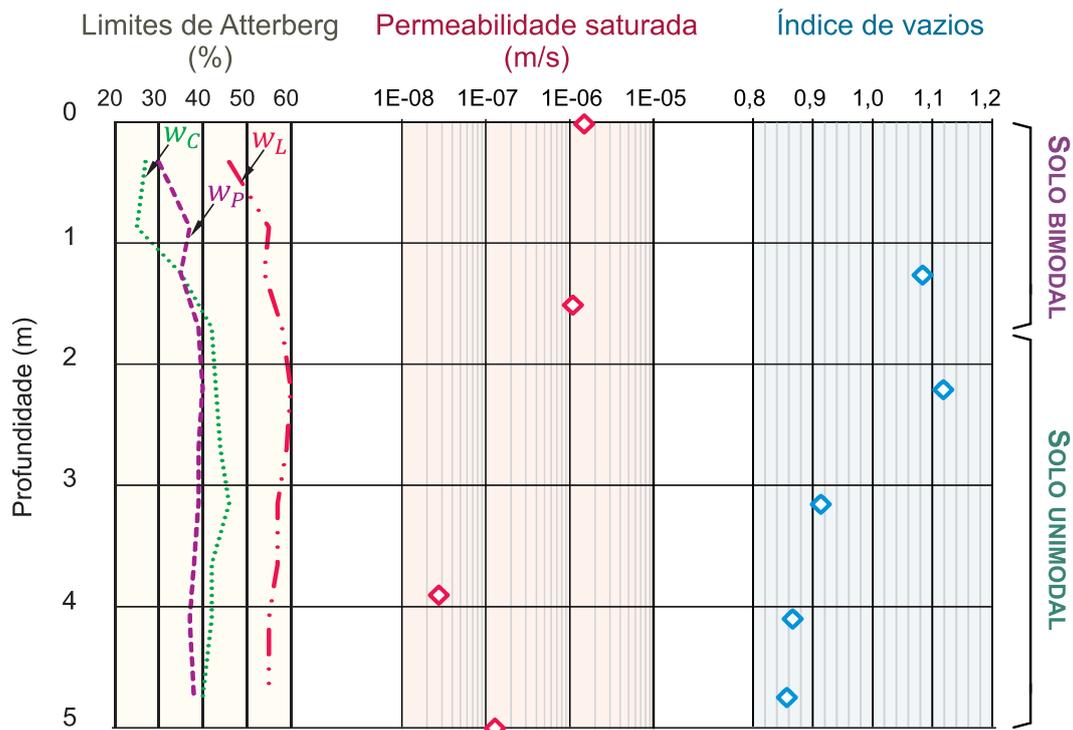


Figura 4.4: Limites de Atterberg, índice de vazios e condutividade hidráulica saturada do solo de Aparecida de Goiânia.

A Figura 4.5 apresenta as curvas granulométricas obtidas para as seguintes profundidades: 1,00 a 1,50 e 3,00 a 3,30 m.

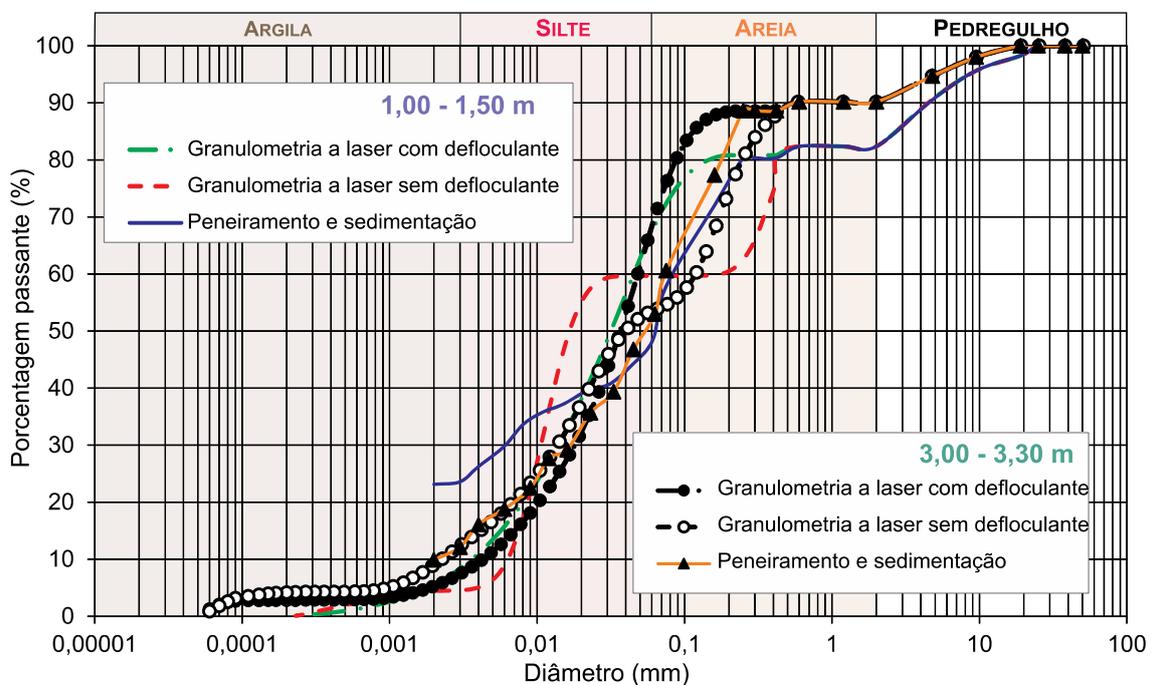


Figura 4.5: Curvas granulométricas para o solo de Aparecida de Goiânia.

As granulometrias para o perfil estudado foram obtidas pelo método convencional de peneiramento e sedimentação segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984), e pelo processo de granulometria a laser segundo recomendações de Lima *et al.* (2002) e Roseno & Camapum (2007). Para cada profundidade analisada foram obtidas três curvas granulométricas, sendo duas correspondentes a granulometria a laser (GL) e uma correspondente ao método convencional (ABNT). Comparando os conjuntos de curvas granulométricas correspondentes às duas profundidades investigadas, observa-se formatos de curvas semelhantes.

A granulometria obtida a laser sem a utilização defloculante para a profundidade de 1,00 a 1,50 m foi a que mais se diferenciou das restantes em relação ao formato da curva, apresentando um patamar horizontal intermediário, na transição do silte para areia, bem definido. Geralmente, as curvas granulométricas indicam um solo com alta porcentagem de areia fina e silte. Os dados das curvas granulométricas, bem como os limites de Atterberg, não serão utilizados diretamente no modelo numérico de avaliação de fluxo mas são apresentadas pois ajudam no entendimento da relação existente entre a caracterização do solo e as variações que ocorrem no seu interior.

As curvas características solo-água são apresentadas na Figura 4.6. As curvas características solo-água foram obtidas calibrando a equação de ajuste proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) para pontos experimentais obtidos em laboratório pela técnica do papel filtro. Para a profundidade de 1,00 a 1,50 nota-se um comportamento tipicamente bimodal, com dois valores de entrada de ar bem definidos.

Considerando a sucção matricial, observa-se para o trecho de sucção entre 1 e 10 kPa uma grande variação de umidade, indicando intensa drenagem de água. As curvas características solo água para a profundidade de 3,00 a 3,30 possuem a característica unimodal com um único valor de entrada de ar.

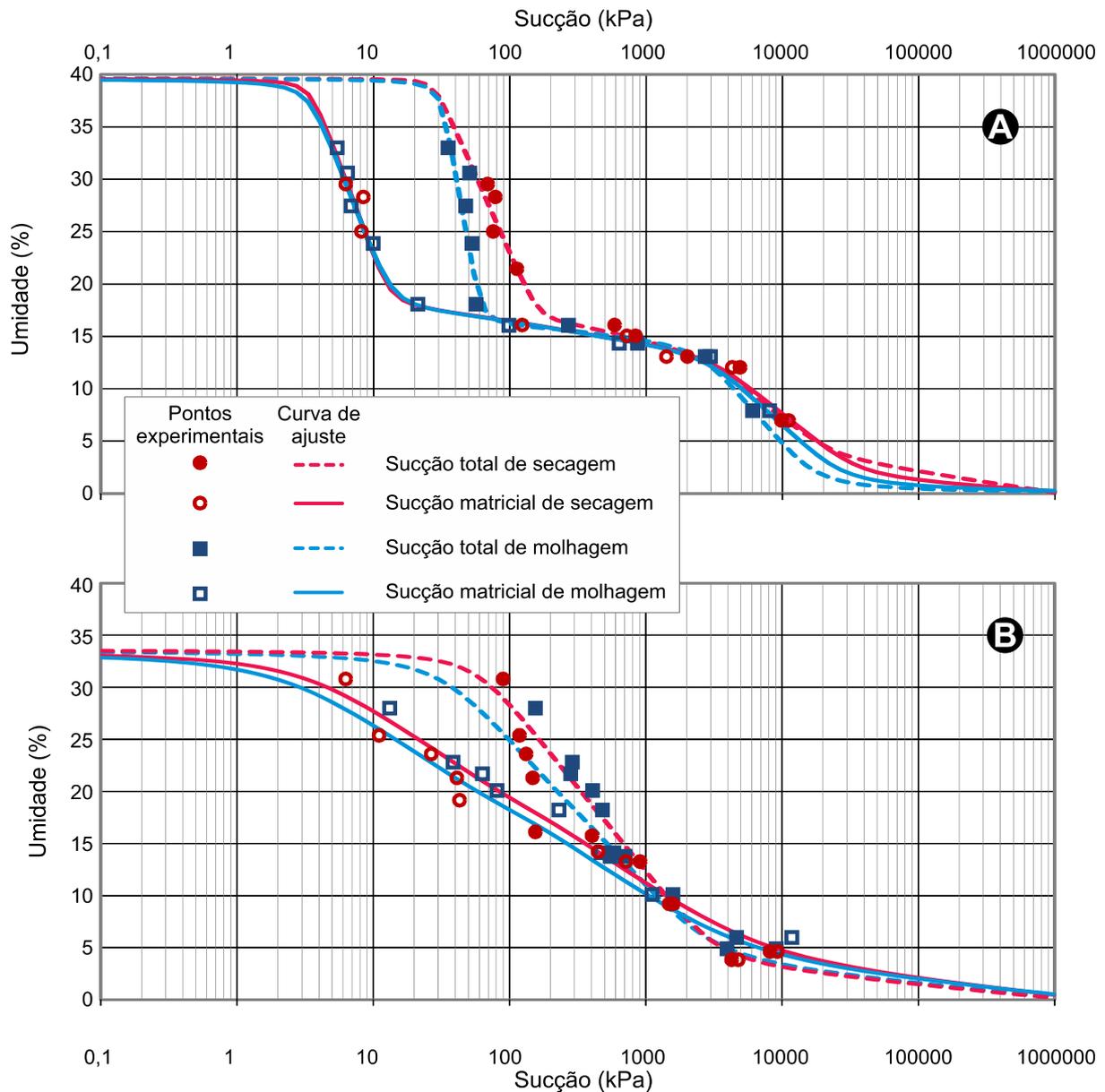


Figura 4.6: A) Curvas característica solo-água para a profundidade de 1,00 a 1,50 m, B) Curvas características solo-água para a profundidade de 3,00 a 3,30.

#### 4.1.2 Avaliação comparativa do desempenho dos diversos métodos de medição de sucção

Nesta seção serão avaliados e comparados os desempenhos dos diversos métodos de medição de sucção aplicados em campo. Além da sucção medida pelo tensiômetro e pela técnica do papel filtro, pode-se obter uma terceira avaliação da sucção a partir da umidade do solo medida em campo e a medição da curva característica solo-água medida em laboratório. Portanto, cada valor de umidade medido fornece indiretamente um correspondente valor de sucção pela relação contida na curva característica solo-água. Deve-se, no entanto, levar em conta que a histerese da curva característica

impede a determinação de um único par de sucção para o teor de umidade. Tem-se, na verdade, uma faixa de valores possíveis de sucção, definidos pela curva principal de secagem e pela curva principal de molhagem. Na tentativa de realizar uma análise mais criteriosa, os dados de sucção medidos no período de seca (abril a setembro) serão relacionados com a curva de secagem, e os dados medidos no período chuvoso (outubro a março) serão relacionados com a curva de molhagem.

Erros grosseiros de medição de umidade do solo e de medição de sucção matricial utilizando tensiômetro podem ser evitados utilizando procedimentos rigorosos, como a proteção cuidadosa de amostras, saturação e calibração dos tensiômetros. No caso do papel filtro, no entanto, mesmo tomando os devidos cuidados com relação ao procedimento de extração de armazenamento do papel filtro, a metodologia proposta está sujeita a erros, como a falta de equilíbrio entre a sucção do solo e do papel filtro, e a contaminação do papel filtro durante sua extração.

Como controle de qualidade das medições de sucção utilizando papel filtro foram utilizados dois papéis, de forma a se ter um como contraprova. Admite-se aqui que a qualidade dos dados pode ser parcialmente avaliada comparando os teores de umidade obtidos pelos dois papéis filtro usados em conjunto, num mesmo dispositivo de instalação. A Figura 4.7 mostra tal comparação. Considerando como critério de corte uma diferença, entre os valores de umidade, maior que 10%, 354 pares de dados foram rejeitados (de um total de 672 pares).

A qualidade dos dados pode também ser avaliada comparando os dados de sucção obtidos pelas diversas técnicas utilizadas. A Figura 4.8 compara os dados de sucção obtidos pelo tensiômetro com os dados de sucção matricial obtidos a partir da umidade do solo, utilizando a CCSA de secagem e molhagem. Os dados indicam uma relativa congruência de valores, dentro da faixa possível de trabalho do tensiômetro (que vai de 0 a 100 kPa). Existem pontos para baixas sucções obtidas pelos tensiômetro, abaixo de 10 kPa, que não apresentam boa comparação com os dados de sucção estimados pelo teor de umidade do solo. Esta diferença pode ser explicada pela falta de um bom contato entre o tensiômetro e o solo, já que a maioria dos pontos citados se apresenta na profundidade mais rasa (0,48 m), onde o solo geralmente se apresenta mais seco e com presença de cascalho, dificultando que o copo cerâmico poroso seja envolvido pelo solo.

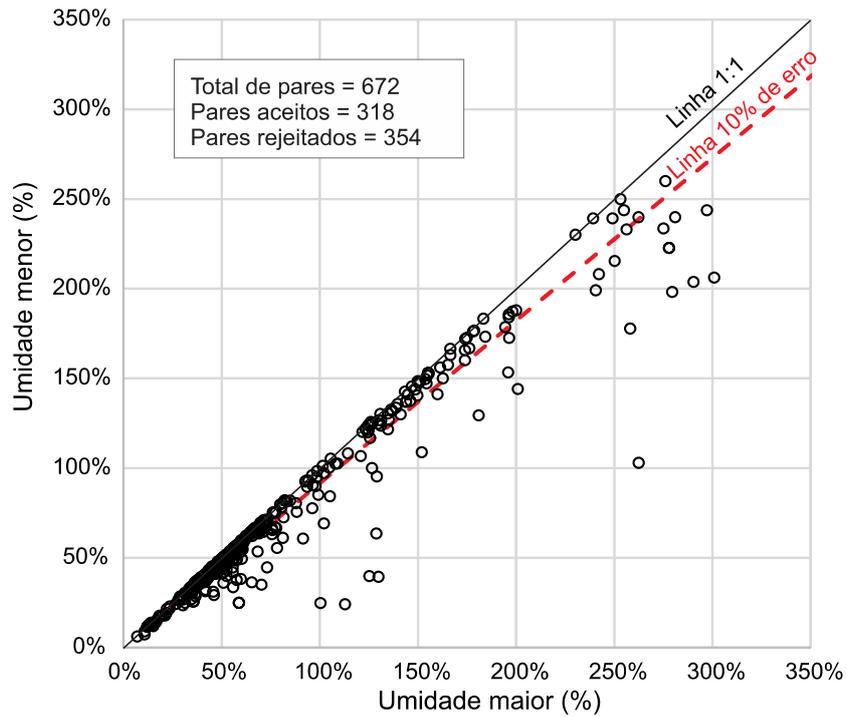


Figura 4.7: Comparação entre teores de umidade dos papéis filtro.

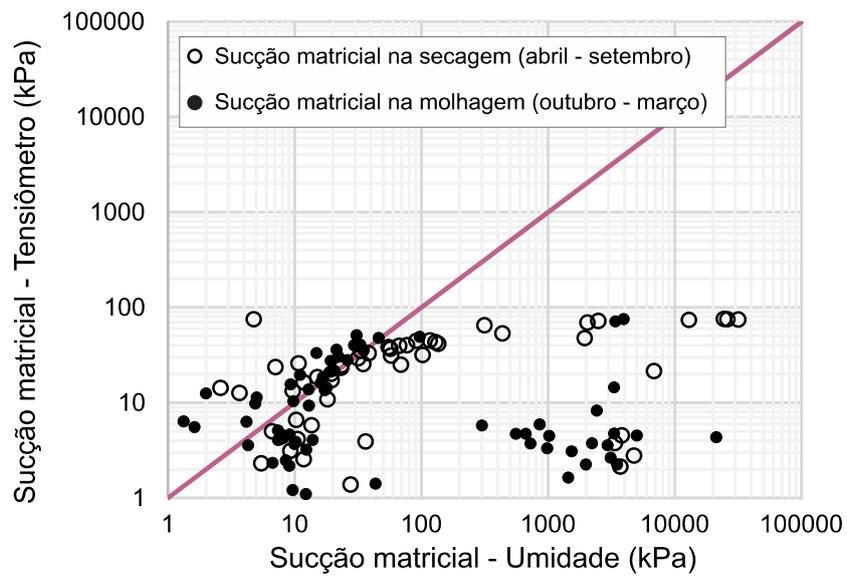


Figura 4.8: Comparação de dados de sucção obtidos pelo tensiômetro e pelas CCSA matricial de secagem e molhagem.

A Figura 4.9 compara os resultados de sucção obtidos pelo método do papel filtro com dados de sucção matricial obtidos a partir da umidade e das curvas característica solo-água de secagem e molhagem.

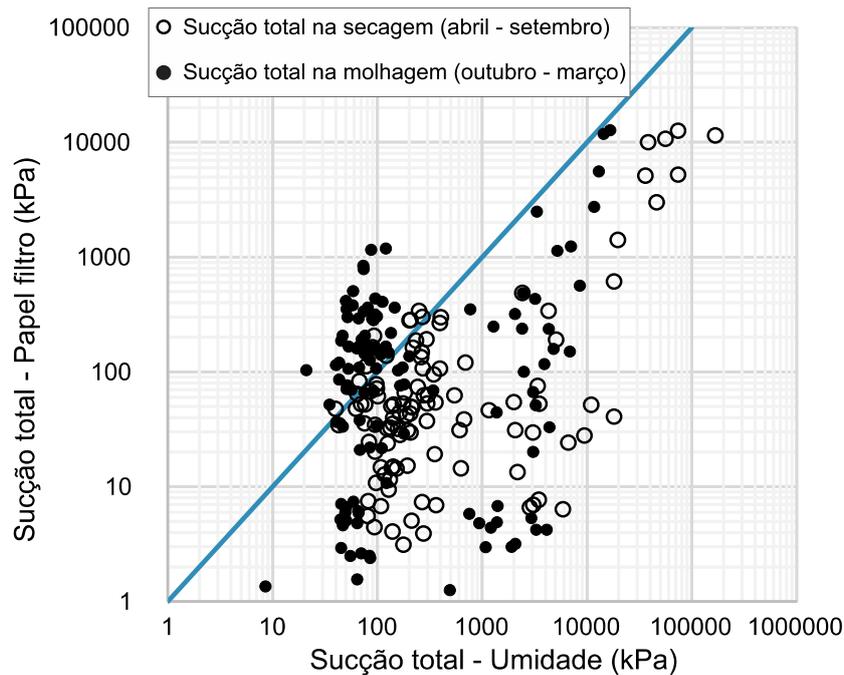


Figura 4.9: Comparação de dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro e pelas CCSA total de secagem e molhagem.

Apesar da grande dispersão dos dados, é possível identificar que muitos valores de sucção medidos pelo método do papel filtro, principalmente valores acima de 100 kPa, se aproximam dos valores de sucção total obtidos a partir da umidade do solo. Existe, no entanto, uma incongruência que parece ser sistemática caracterizada por valores de sucção obtidos a partir da umidade do solo. Além disso, alguns pontos, correspondentes aos valores de sucção total medidos pelo método do papel filtro abaixo de 10 kPa, se distanciaram bastante dos valores previstos pelas curvas de secagem e molhagem. Estes pontos coincidem com valores de sucção obtidos por papéis filtro encontrados encharcados em períodos chuvosos e que não foram descartados pela consideração da contraprova.

Na Figura 4.10 foram comparados também os resultados de sucção obtidos pelos tensiômetros e pelo método do papel filtro. A quantidade de pontos observados é menor em relação às figuras anteriores pois em algumas profundidades onde foram utilizados os papéis filtro, não foram utilizados os tensiômetros (como indicado na Figura 4.2), ou, não foram obtidos valores de sucção correspondentes. Enquanto o método do papel filtro mede a sucção total e possui um tempo de equilíbrio de 14 dias, os tensiômetros medem a sucção matricial e possuem tempo de equilíbrio igual a um dia. Estas diferenças justificam a dificuldade em tentar relacionar os resultados obtidos pelos dois métodos de medição de sucção.

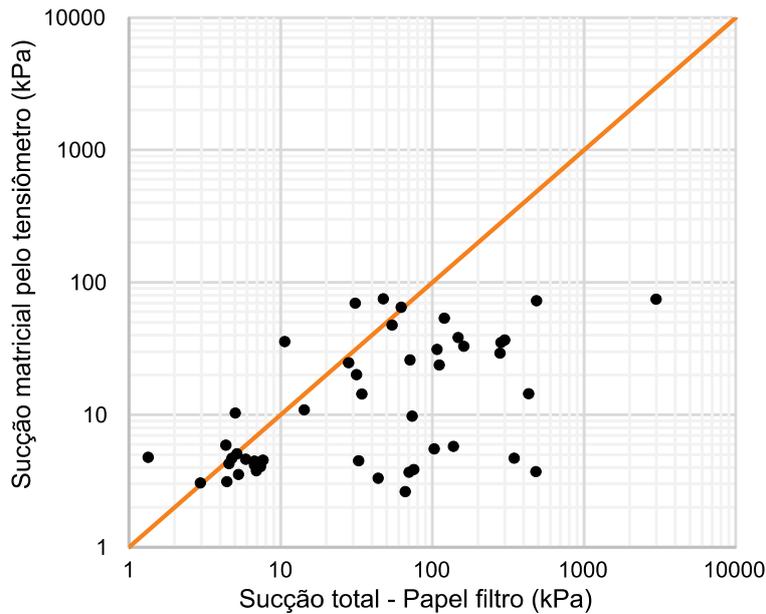


Figura 4.10: Comparação de dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro e pelo tensiômetro.

Os pares de dados, sucção (papel filtro e tensiômetro) e umidade do solo, obtidos no campo, foram também plotados juntamente com as correspondentes curvas características solo-água obtidas em laboratório. Para os dados correspondentes ao trecho de 1,00 a 1,50 m de profundidade (Figura 4.11 A), tem-se uma significativa dispersão, com uma grande quantidade de dados não se situando entre as curvas de molhagem e secagem, como seria correto. Tal dispersão pode ser associada ao desempenho dos diversos instrumentos e técnicas e à significativa heterogeneidade do solo superficial, bimodal.

No caso dos dados de sucção obtidos pelo tensiômetro, que não acompanharam as curvas obtidas em laboratório, o principal fator é a falta de contato entre o tensiômetro e o solo. Os dados de sucção obtidos pelo método do papel filtro em campo se encontram bastante dispersos em relação às curvas totais obtidas no laboratório para a profundidade mais rasa. O provável motivo é o fato de que o solo superficial sofre relativamente rápidas alterações de umidade e sucção devido às condições atmosféricas, que não permitem o equilíbrio entre o solo e o papel filtro. Ou seja, o uso do papel filtro para profundidades relativamente rasas não parece ser recomendável. A mesma questão pode ser levantada para a utilização do tensiômetro, porém, neste caso, o tempo necessário para o equilíbrio é menor. Para acompanhar as rápidas alterações de sucção, parece ser recomendado a utilização do teor de umidade e curva característica para estimar o valor da mesma.

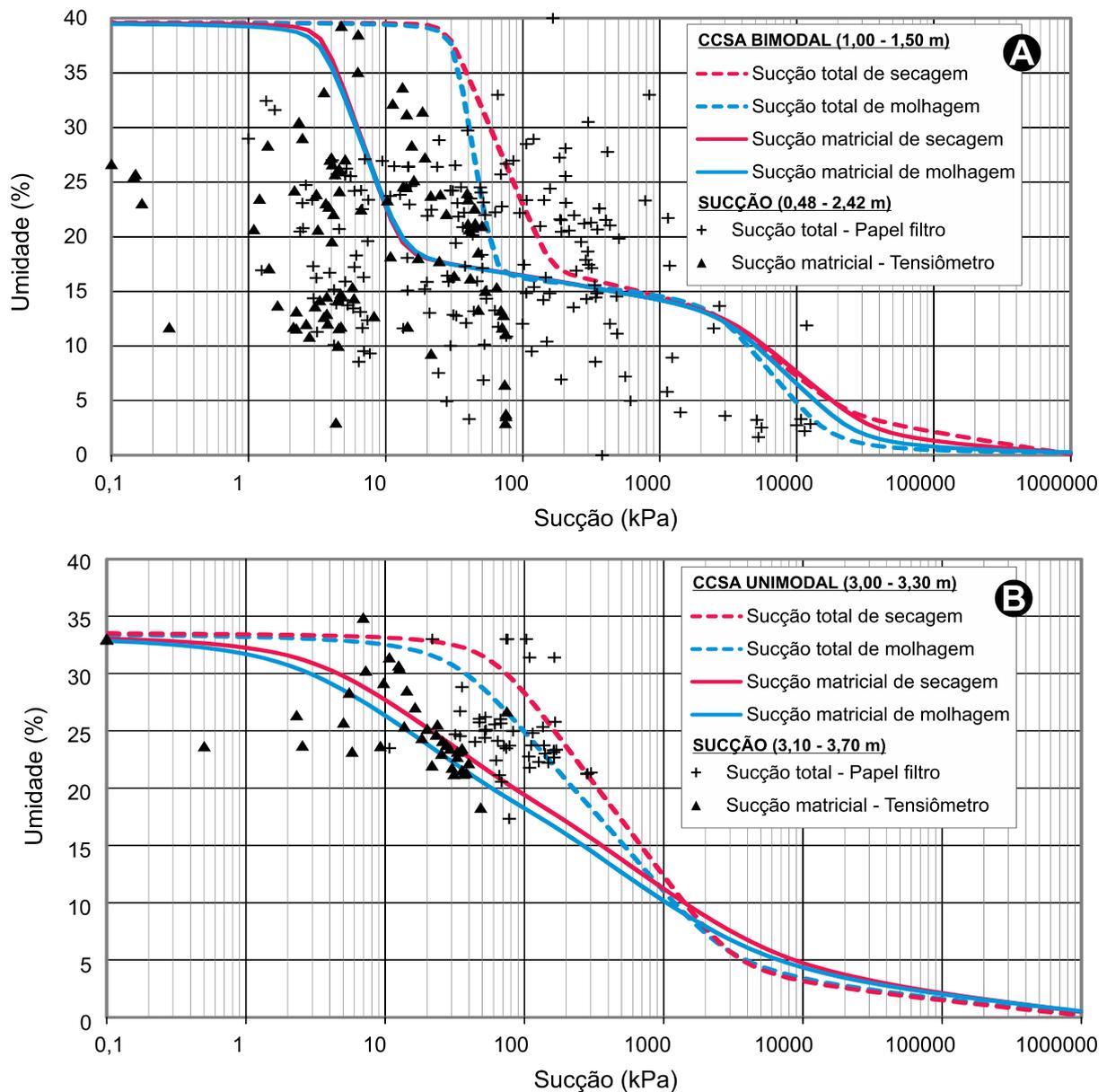


Figura 4.11: A) Curvas características solo-água e dados de sucção obtidos em campo (1,00 a 1,50 m); B) Curvas características solo-água e dados de sucção obtidos em campo (3,00 a 3,30 m).

Para o trecho de 3,00 a 3,30 m de profundidade (Figura 4.11 B), a maioria dos dados de sucção obtidos pelo tensiômetro e papel filtro se encontram entre as curvas de secagem e molhagem, conforme o esperado. Alguns poucos dados do tensiômetro se localizaram abaixo da curva de secagem, provavelmente devido ao mal contato do instrumento com o solo.

A comparação dos valores monitorados em campo com a CCSA medida em laboratório permitiu verificar a qualidade dos dados coletados, sempre com bons resultados, guardadas as faixas de trabalho das várias técnicas empregadas. Foi

também observado a viabilidade técnica de emprego do papel filtro, que se mostrou um método de fácil utilização, e o seu emprego pode ser importante para futuros estudos e em aplicações práticas, que antes seriam inviáveis.

#### **4.1.3 Variação temporal das condições de umidade e sucção do solo**

As variações sazonais de chuva, temperatura, nível do lençol freático, umidade e sucção, para os anos de 2011 e 2012, são mostrados na Figura 4.12. O limite inferior de sucção (0,1 kPa) representa a condição saturada do solo.

As medições feitas com o “piezômetro 1” e com o “piezômetro 2” revelam boa concordância e o lençol atingiu o seu nível mínimo nos meses de outubro, alcançando uma profundidade superior a 8,0 m.

Com o início do período chuvoso, ocorre a elevação do nível do lençol e, em três meses, o nível d’água sobe pouco mais de 5,0 m, alcançando aproximadamente 3,0 m de profundidade em janeiro. Este aumento no nível do lençol inclusive impediu o acesso a níveis mais profundos do poço experimental, que foram tomado pela água. A região de solo abaixo do nível d’água foi considerada saturada nas análises. É interessante também notar que o mês de máxima profundidade do nível d’água (novembro) não coincide com o mês menos chuvoso (julho) indicando um atraso entre o ritmo climatológico e o ritmo do estado do solo, que pode ser explicado pelas variáveis relacionadas à percolação da água no solo. Outro ponto que deve ser destacado é que o lençol freático, apresentando um comportamento cíclico bem definido, demora praticamente três vezes mais para ser rebaixado em relação ao tempo de elevação.

As curvas de umidade gravimétrica também revelam o processo da infiltração de água no solo, registrando o atraso entre as variações de umidade ao longo da profundidade e os eventos atmosféricos. O início das chuvas, em outubro de 2011, por exemplo, causa imediata variação no teor de umidade na profundidade mais rasa, enquanto para a profundidade de 3,77 m a variação só acontece em dezembro. Para as duas maiores profundidades, 2,42 m e 3,77 m, os teores de umidade de saturação, definidos em laboratório, são alcançados durante os períodos chuvosos pela identificação da inundação na profundidade correspondente.

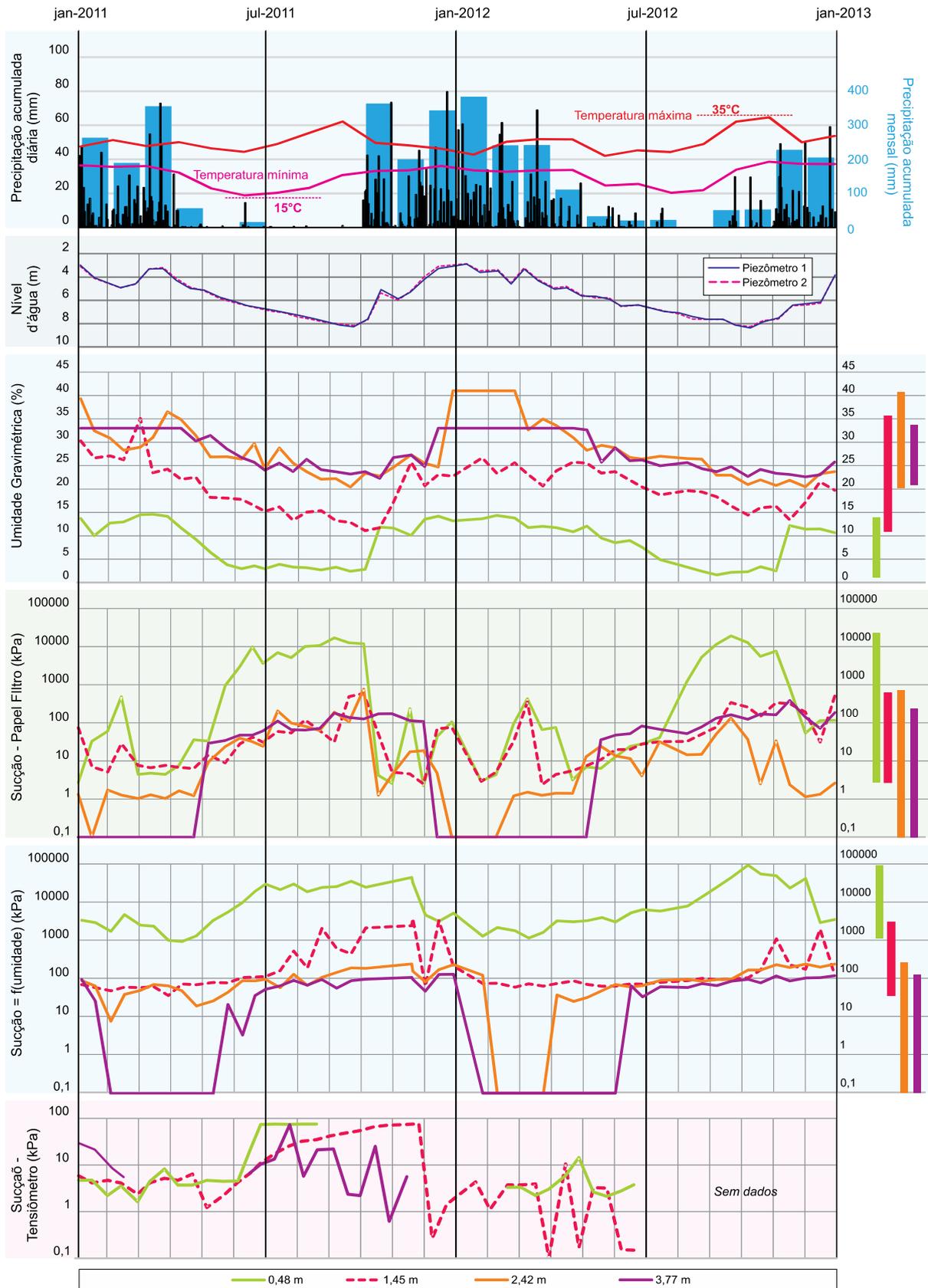


Figura 4.12: Comportamento rítmico no campo experimental.

Em relação ao comportamento das curvas de sucção obtidas com os dados do papel filtro, a profundidade mais rasa (0,48 m) foi a mais sensível às variações, enquanto que para a maior profundidade (3,77 m), a variação foi a menor observada e além disto, para quase metade do período, a sucção foi nula, expondo a condição saturada do solo. Ainda para os resultados de papel filtro, o intervalo de variação de sucção é decrescente no sentido das maiores profundidades, sendo possível identificar as zonas mais ativas do solo. As curvas de sucção obtidas com o tensiômetro expõem a grande dificuldade da técnica em acompanhar grandes variações e sua limitação para aplicação em campo.

As curvas de sucção obtidas a partir dos teores de umidade do solo em termos das CCSA experimentais, possuem, geralmente, maiores valores do que os valores de sucção correspondentes às curvas de sucção do papel filtro, e a natureza dos métodos de obtenção de sucção pode justificar tal observação. Enquanto o papel filtro armazena o histórico de sucção no período de equilíbrio considerado, os valores de sucção obtidos pela umidade são fundamentados em uma única condição de umidade. Como eventos chuvosos inibiram a coleta de material para determinação da umidade, os picos de umidades não foram identificados. Consequentemente, os menores valores de sucção também não. Além disto, as curvas de sucção obtidas a partir da umidade e da curva característica solo-água podem ser consideradas mais sensíveis à variação do índice de vazios e o peso específico dos grãos sólidos do solo devido a determinação indireta.

Apesar das diferenças entre as diversas técnicas de obtenção sucção, todos as curvas oferecem resultados qualitativamente semelhantes. A instrumentação mais rasa (0,48 m) apresenta as maiores variações de sucção, sempre em resposta imediata às condições atmosféricas. A instrumentação mais profunda (3,77 m) apresenta relativamente menor variação de sucção (porém ainda significativa), resultado da proximidade do nível do lençol freático.

Tem-se, portanto, uma condição na qual a definição da zona ativa, como sendo a zona superficial do terreno sujeita às interferências atmosféricas, não revela completamente a dinâmica da água e a sazonalidade das condições do perfil. O fluxo basal também tem grande importância na definição do ritmo do estado do solo ao longo do ano e

pode ser identificado pela tentativa de definir o balanço de água no interior do solo, que será discutido mais adiante.

Uma relação interessante foi obtida confrontando os dados de sucção medidos pelo método do papel filtro, para a profundidade mais rasa (0,48 m), e o nível do lençol freático, e é ilustrada na Figura 4.13. Maiores valores para a profundidade do nível do lençol freático correspondem a maiores valores de sucção para a porção mais rasa do solo, claramente inserida na zona ativa do perfil de solo. Mesmo a sucção à 0,48 m não sendo diretamente influenciada pelo fluxo basal – e sim pelo fluxo na fronteira solo-atmosfera – a origem das duas variações está relacionada com a mesma fonte, as condições atmosféricas.

A Figura 4.14 sintetiza a relação entre o volume de água no interior do solo e sucção média considerando o trecho de solo da superfície até 3,77 m de profundidade. O volume de água foi calculado em função da umidade e a sucção média em função dos resultados do monitoramento de sucção pelo papel filtro.

A intensidade da chuva, plotada na Figura 4.14, indica a interação que existe entre a o ritmo atmosférico e a variação nos estados do solo. Nos meses mais chuvosos o volume de água no interior do solo aumenta enquanto a sucção média diminui; e nos meses mais secos o volume de água diminui e a sucção média alcança os maiores valores. É importante observar que como a sucção média foi plotada segundo a escala logarítmica, um pequeno incremento no volume de água no interior do solo pode resultar em uma grande variação na distribuição de sucção.

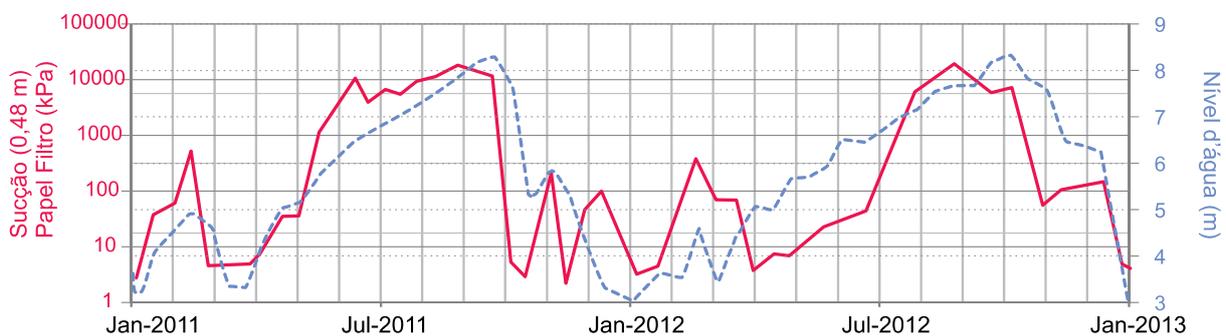


Figura 4.13: Sucção medida pelo papel filtro à 0,48 m de profundidade versus nível d'água.

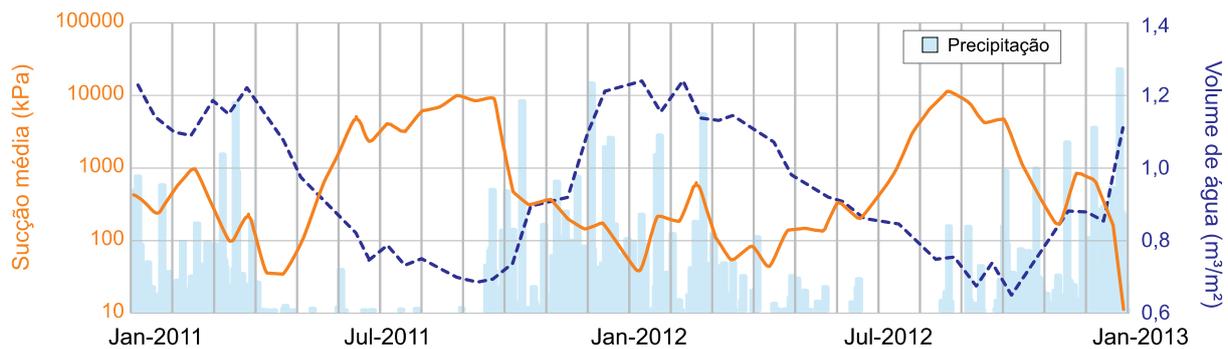


Figura 4.14: Síntese do ritmo do solo do campo experimental de Aparecida de Goiânia.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

Conforme apresentado no Capítulo 3, a caracterização anual climática será realizada segundo a metodologia apresentada por Zavattini & Boin (2013) utilizando os dados de totais anuais de chuva. O objetivo da caracterização climática é identificar os anos habituais, anos excepcionais chuvosos e anos excepcionais secos, a partir de uma série histórica de dados climáticos. A caracterização climática é necessária para a aplicação do modelo proposto, especificamente na utilização dos cenários de ano habitual e de ano excepcional chuvoso.

A miniestação meteorológica implantada no campo experimental oferece um conjunto de dados limitados a pouco mais de três anos. Desta forma, para a caracterização dos anos chuvosos segundo os perfis climáticos, se faz necessário a utilização de dados de uma estação meteorológica de responsabilidade do INMET, localizada na cidade de Goiânia (latitude: 16°40'25" sul; longitude: 49°15'50" oeste; altitude: 770 m), e com registros iniciados em 1992. Neste estudo foram considerados 21 anos de dados, de 1992 a 2012. Os dados originais de precipitação se encontram em termos de valores acumulados diários.

Foram calculados os totais de precipitação para a escala mensal e anual que são apresentados na Tabela 4.1. No período de 1992 a 2002, o ano mais chuvoso foi justamente o primeiro, 1992, com um total de 1924,3 mm, e o ano mais seco foi o ano de 2007 com apenas 1095,2 mm de chuva.

A amplitude total de variação (ATV) para o período é a diferença entre os extremos: 828,1 mm. Comparando os totais por mês para os 21 anos conclui-se que dezembro foi o mês mais chuvoso (média de 274,6 mm) e julho o mês mais seco (média de 1,3

mm), o que expõe com clareza a dinâmica do clima tropical nos termos de estações secas e chuvosas bem definidas.

Tabela 4.1: Chuvas mensais e anuais em milímetro de Goiânia (1992 - 2012).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1992	257,0	229,3	208,3	169,4	15,8	0,0	0,0	0,3	125,5	368,9	214,1	335,7	1924,3
1993	132,4	249,7	201,2	42,8	17,0	38,0	0,0	58,9	44,2	178,1	219,6	316,2	1498,1
1994	337,7	184,9	304,3	67,7	17,7	28,7	8,6	0,0	5,1	112,0	296,7	247,0	1610,4
1995	278,0	207,6	398,9	173,8	81,6	3,6	0,0	0,0	12,4	104,1	185,3	249,0	1694,3
1996	213,6	174,4	320,4	239,1	21,0	0,5	0,1	43,5	54,5	308,8	214,8	172,4	1763,1
1997	268,5	186,9	425,2	122,9	54,8	76,4	0,0	6,6	33,1	63,6	211,6	146,5	1596,1
1998	245,9	326,3	264,2	69,6	20,5	0,4	0,0	3,6	41,3	145,6	256,0	201,0	1574,4
1999	196,5	188,2	119,2	27,6	66,7	7,0	0,0	0,0	70,9	175,0	200,8	295,6	1347,5
2000	385,7	319,8	207,4	44,6	9,4	0,0	0,6	31,5	106,0	84,3	327,8	316,4	1833,5
2001	209,0	226,9	181,6	172,0	72,1	2,0	0,0	51,5	124,5	185,0	314,7	227,6	1766,9
2002	253,7	398,0	300,3	27,5	12,0	0,0	0,2	6,3	69,5	34,4	149,7	284,8	1536,4
2003	314,9	267,5	202,3	107,9	0,2	0,0	0,0	12,9	35,3	110,5	265,2	224,3	1541,0
2004	282,3	310,2	264,2	120,3	18,0	1,0	5,8	0,0	6,2	168,1	128,6	251,2	1555,9
2005	237,5	176,4	526,0	50,4	34,2	2,6	0,0	3,2	55,8	90,9	269,7	460,2	1906,9
2006	137,9	217,4	319,1	206,2	20,1	0,0	0,0	10,6	84,1	283,4	188,2	238,1	1705,1
2007	200,1	267,4	87,3	59,6	9,2	5,1	6,0	0,0	1,8	55,9	223,1	179,7	1095,2
2008	280,8	294,4	373,8	202,2	53,2	0,0	0,0	0,0	51,8	109,4	197,5	246,2	1809,3
2009	178,6	148,2	185,6	258,0	41,2	31,3	2,0	16,8	71,0	196,4	194,9	443,9	1767,9
2010	98,3	208,0	190,4	188,4	0,0	14,3	0,0	0,0	16,9	107,9	281,9	449,8	1555,9
2011	287,8	240,4	367,1	62,3	0,0	15,3	0,0	0,0	1,2	300,3	245,4	292,8	1812,6
2012	467,4	357,9	268,0	176,2	41,8	18,5	3,0	0,0	57,3	92,8	224,5	188,6	1896,0
<b>Média</b>	250,6	246,7	272,1	123,3	28,9	11,7	1,3	11,7	50,9	156,0	229,1	274,6	1656,7
<b>Mediana</b>	253,7	229,3	264,2	120,3	20,1	2,6	0,0	3,2	51,8	112,0	219,6	249,0	1694,3

Para a análise de tendência central foram calculados a média e a mediana. O mês com maior valor total de precipitação, dezembro, possui consequentemente a maior média. Porém em termos de mediana, dezembro possui o terceiro maior valor. Esta diferença é importante e pode influenciar a maneira como são interpretados os dados mensais históricos que representam uma longa série, pois, mesmo expondo um valor médio para cada mês, a sequência como as chuvas se procedem ao longo de um ano qualquer pode ser bem diferente.

Para os 21 anos de dados climatológicos foram analisadas as formas de acumular os dados em: acumulado anual, acumulado mensal e acumulado diário. As três formas expostas na Figura 4.15 revelam um ponto crítico na análise de fluxo pois a

precipitação acumulada, sendo maior que o coeficiente de permeabilidade do solo, pode indicar o início do escoamento superficial. Observa-se, ainda na Figura 4.15, que nunca ocorrem mais de três anos consecutivos que possuem o mesmo sentido de variação (crescente ou decrescente) em relação ao ano anterior no acumulado anual.

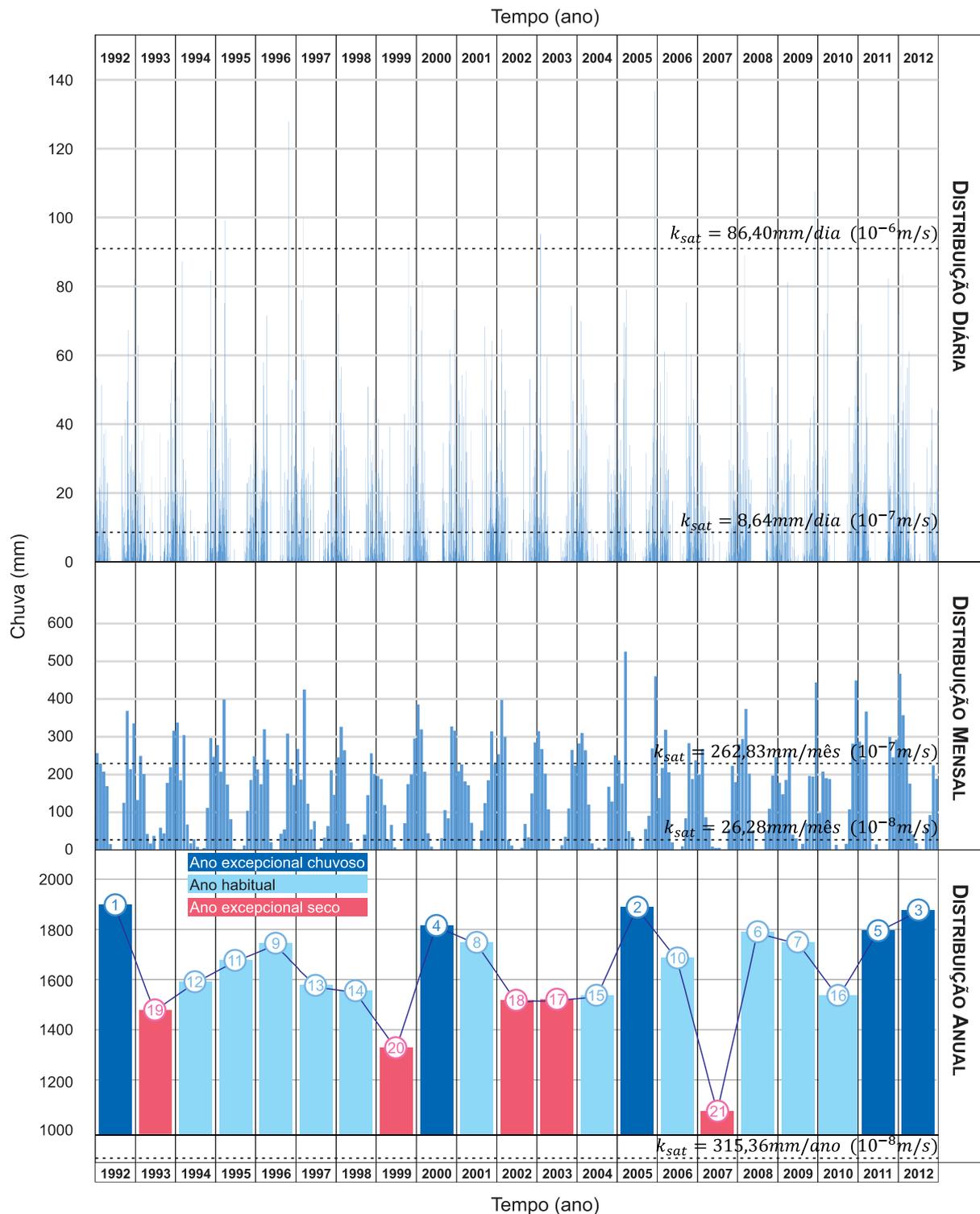


Figura 4.15: Possibilidades de acúmulo de dados de precipitação.

A mediana divide uma distribuição em duas metades, considerando os dados em ordem crescente de valores, e o desvio quartílico divide cada metade em mais duas metades, totalizando quatro partes com o mesmo número de ocorrência. As chuvas totais anuais que estão contidas nos limites da amplitude interquartílica (de 1555,9 mm a 1809,3 mm) indicam anos habituais (Figura 4.15), enquanto as chuvas fora dos limites da amplitude interquartílica indicam anos excepcionais que podem ser secos (grupo abaixo do quartil inferior) e chuvosos (grupo acima do quartil superior).

Portanto, é possível identificar, no conjunto de 21 anos de dados de chuva estudados, quais são os anos considerados excepcionais e quais são habituais. Na aplicação da abordagem rítmica probabilística que será desenvolvida no próximo capítulo, serão considerados o ano de 1994, como ano habitual de referência, e o ano de 2011, como o ano excepcional chuvoso de referência

### **4.3 ANÁLISE NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUA**

A metodologia apresentada no capítulo anterior será aplicada na análise numérica do perfil de solo de Aparecida de Goiânia. Serão simulados dois anos de fluxo, coincidindo com o período de monitoramento do campo experimental (2011 – 2012). As análises numéricas apresentadas têm o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento do perfil, avaliar a sensibilidade do modelo segundo alguns dados de entrada e, finalmente, permitir uma melhor compreensão da resposta rítmica do perfil de solo quanto à distribuição de umidade e poropressão de água.

Primeiro serão apresentados os dados gerais para a modelagem da análise de fluxo de água e, em seguida, será discutida a validação do modelo numérico e os perfis probabilísticos de sucção. Por fim, serão discutidas metodologias para a simplificação do modelo de fluxo.

#### **4.3.1 Geometria e características do perfil, e condição inicial**

A análise numérica realizada considera um perfil de solo e o fluxo unidimensional de água. A partir da avaliação dos dados de caracterização, foram definidas duas camadas de solo para a análise (nomeadas segundo a forma da curva característica solo-água): camada inferior composta por solo com CCSA unimodal (0,0 a 8,3 m), e uma camada superior, de solo mais intemperizado, com CCSA bimodal (8,3 a 10,0 m).

A altura total do domínio (10 m), foi adotada de forma que a zona de flutuação do nível d'água não ultrapasse os limites do perfil de solo.

A Figura 4.16 apresenta o perfil de solo, suas camadas e a condição inicial de poropressão de água adotados. O peso específico dos grãos sólidos adotado para todo perfil foi de 27,36 kN/m<sup>3</sup>. Para o estado inicial foi considerado uma distribuição hidrostática de poropressão de água utilizando como referência o nível d'água inicial na cota 6,1 m. A distribuição do índice de vazios ao longo da profundidade foi obtida considerando a média de dois grupos de dados experimentais. Para a condutividade hidráulica saturada do solo ( $k_{sat}^w$ ), foi considerada uma curva parabólica ajustada para os quatro pontos experimentais obtidos em laboratório, de acordo com a seguinte equação:

$$k_{sat}^w = 9,30 \cdot 10^{-8} y^2 - 1,13 \cdot 10^{-6} y + 3,50 \cdot 10^{-6} \quad ( 4.1 )$$

onde:  $y$  é a elevação do perfil adotado.

Para a cota menor do que 4 m foi adotado um valor constante de condutividade hidráulica igual a  $4,2 \cdot 10^{-7}$  m/s.

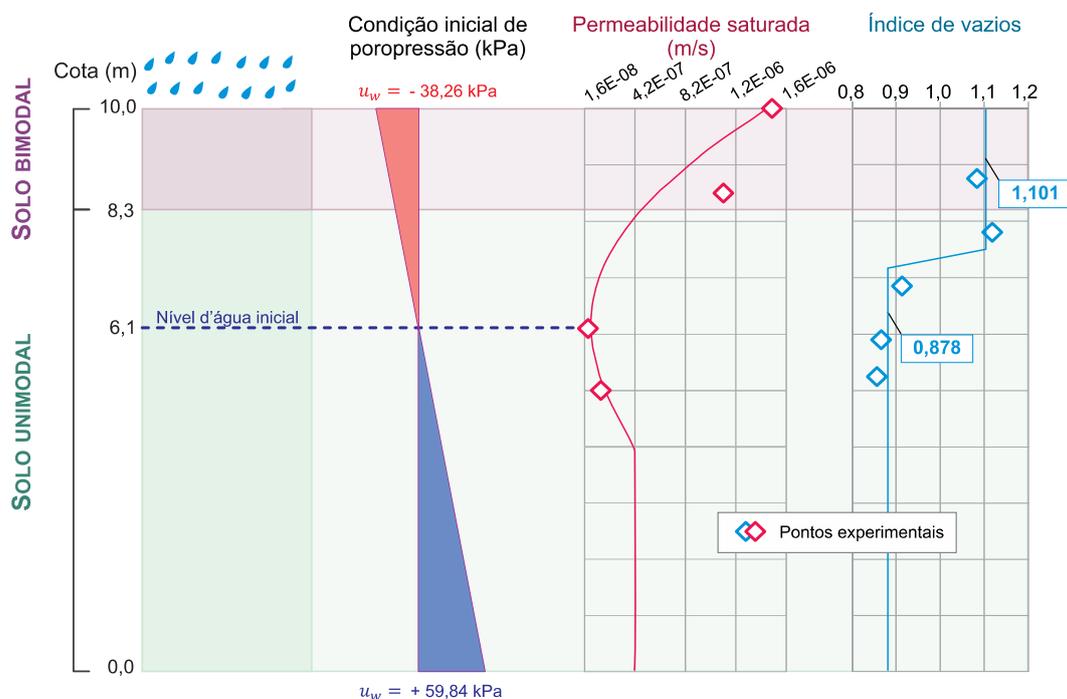


Figura 4.16: Características gerais do perfil do solo do campo experimental considerado na análise numérica.

Para cada camada de solo (unimodal e bimodal), uma CCSA foi definida considerando a equação proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) ajustada aos parâmetros médios das respectivas curvas de secagem e molhagem experimentais de sucção matricial. As curvas unimodal e bimodal possuem umidades de saturação igual a 33,6% e 39,6%, respectivamente.

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros considerados nos ajustes das duas curvas e a Figura 4.17 apresenta o resultado gráfico. A permeabilidade não saturada foi obtida, a partir da CCSA, pela equação de Brooks & Corey (1964). Baseado no estudo de Ebrahimi *et al.* (2000) foi adotado ainda um valor de condutividade de hidráulica mínimo de  $10^{-13}$  m/s para a água no estado líquido. O limite proposto pelos autores é baseado na teoria do fluxo de vapor d'água.

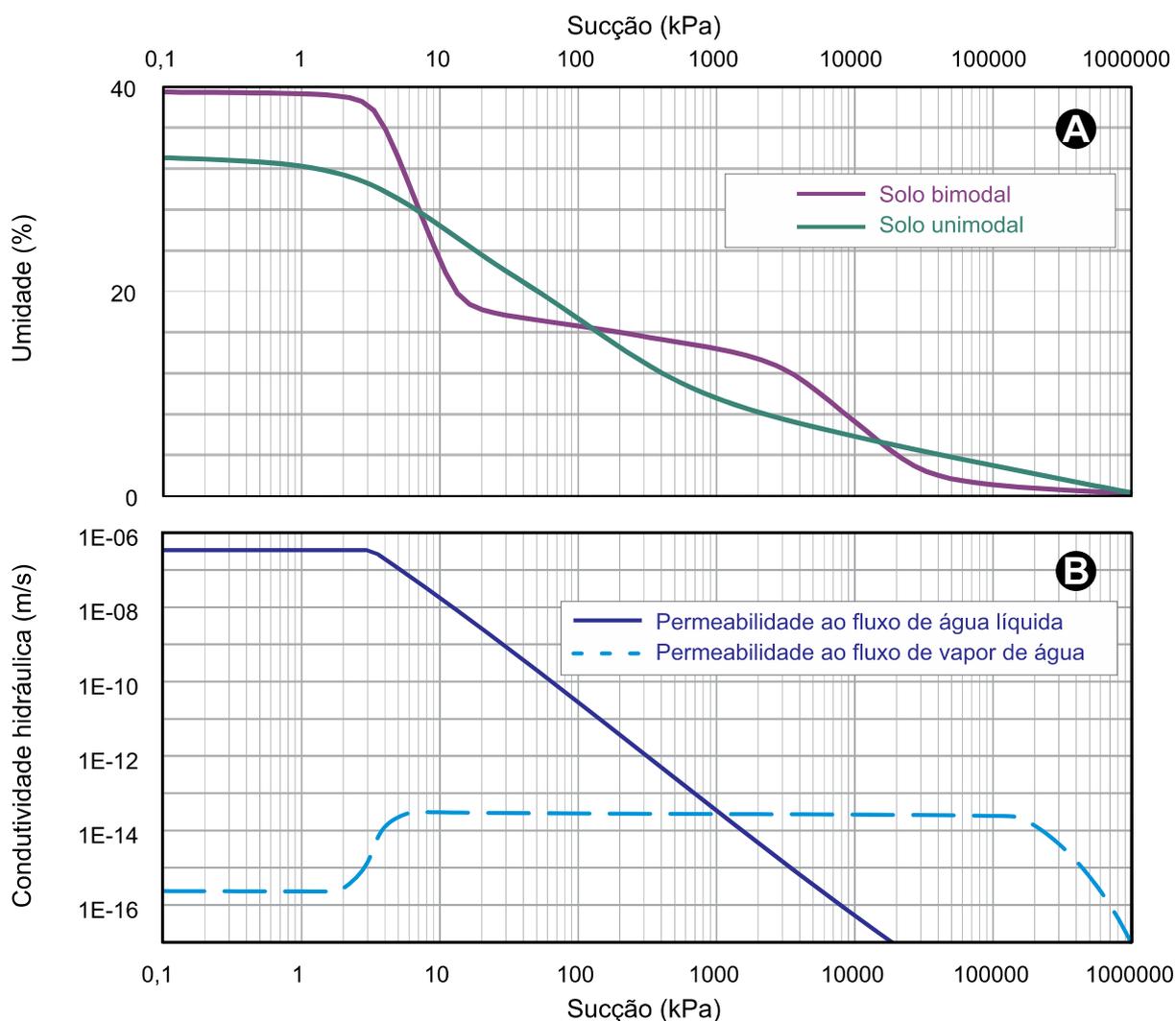


Figura 4.17: A) Curvas características solo-água, B) Função de permeabilidade.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na construção das CCSA bimodal e unimodal.

	Solo bimodal	Solo unimodal
$\psi_{b1}$ (kPa) <sup>(1)</sup>	3,5	3,0
$\psi_{res1}$ (kPa) <sup>(2)</sup>	13	490
$S_{res1}$ <sup>(3)</sup>	45%	25%
$\psi_{b2}$ (kPa) <sup>(4)</sup>	3500	5000
$S_b$ <sup>(5)</sup>	36%	26%
$\psi_{res2}$ (kPa) <sup>(6)</sup>	25950	50950
$S_{res2}$ <sup>(7)</sup>	2%	3%
$\alpha$ <sup>(8)</sup>	0,06	0,07

(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) e (8) estão definidos na Seção 3.3.1.1.

### 4.3.2 Condições de contorno

As variações rítmicas do perfil do solo são reflexo das condições de contorno, tanto solo-atmosfera, quanto de fluxo basal. O fluxo na fronteira solo-atmosfera é o principal fator determinante das condições do solo superficial e, por outro lado, a importância do fluxo basal é proporcional à amplitude de flutuação e a quão próximo da superfície do terreno se encontra o nível do lençol freático.

Os dados atmosféricos obtidos ao longo dos anos de 2011 e 2012 no campo experimental de Aparecida de Goiânia revelam uma chuva média anual próxima de 1800 mm, que, considerando a porosidade igual a 52,8%, corresponde à um volume de água que preencheria os vazios de uma espessura de 3,4 m de solo. Por outro lado, a variação anual do nível do lençol freático observada foi de aproximadamente 5 m de profundidade (Figura 4.12). Desta forma, pode-se esperar que tanto as condições atmosféricas quanto o fluxo basal sejam importantes na determinação do fluxo e do comportamento rítmico dos estados do solo do perfil.

A Figura 4.18 apresenta os dados atmosféricos que serão utilizados na definição da condição de fronteira no topo. Os dados de precipitação serão utilizados, dependendo do tipo de análise, de três diferentes formas: diário concentrado (considerando a duração real do evento chuvoso), diário uniforme e média histórica mensal. A chuva diária aplicada (concentrada e uniforme) foi correspondente aos dados de monitoramento do campo experimental, enquanto a média histórica mensal foi definida a partir dos 21 anos de dados de chuvas apresentados na Seção 4.2.

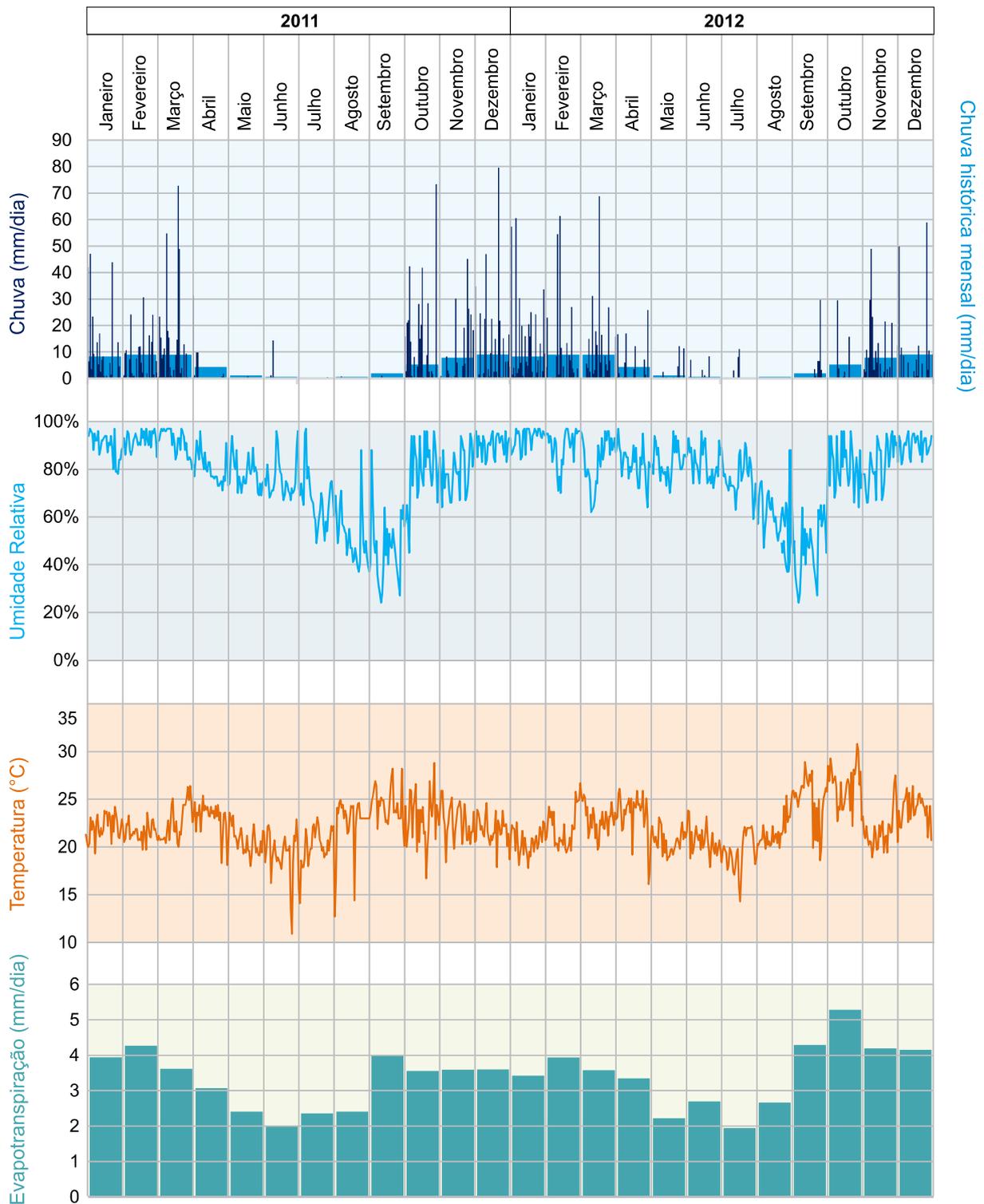


Figura 4.18: Dados atmosféricos monitorados no campo experimental.

A precipitação diária concentrada, que representa de forma mais fiel a precipitação real de campo, será empregada em análises cujo principal objetivo é avaliar o desempenho do modelo numérico e sua capacidade de reproduzir a umidade e sucção observadas em campo. As demais formas de consideração da precipitação podem ser consideradas formas simplificadas e práticas, e serão consideradas em

análises posteriores para a investigação de diferentes abordagens de avaliação do fluxo de água no perfil do solo. Os dados de temperatura média diária (Figura 4.18) serão utilizados no cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite (1948). A evapotranspiração real será calculada, a partir da evapotranspiração real e umidade relativa, pelo modelo teórico de Wilson (1990).

A Figura 4.19 apresenta o resultado do monitoramento do nível d'água e a aplicação da função proposta na Seção 3.4.5 como ajuste para a variação do mesmo. Na condição de contorno basal será considerado um fluxo subsuperficial, função da variação do nível d'água experimental.

### 4.3.3 Dados considerados incertos

Para a avaliação probabilística do fluxo de água no solo serão considerados como dados incertos a condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) e o primeiro valor de entrada de ar da CCSA ( $\psi_{b1}$ ), e o método APEM. Para aplicação do método será necessária a análise de cinco cenários, sendo um correspondente aos parâmetros médios e outros quatro, nos quais cada um dos parâmetros é variado individualmente, para valores iguais a média mais ou menos um desvio padrão.

A Figura 4.20 apresenta os valores médios dos parâmetros incertos ( $E(x)$ ) e suas respectivas variações ( $E(x) - \sigma$  e  $E(x) + \sigma$ ), considerados na análise pelo método APEM. Os cenários de primeiro valor de entrada de ar foram definidos a partir do valor experimental (a CCSA unimodal e a CCSA bimodal possuem o mesmo parâmetro de primeiro valor de entrada de ar) e o coeficiente de variação igual a 115% (Tabela 2.2).

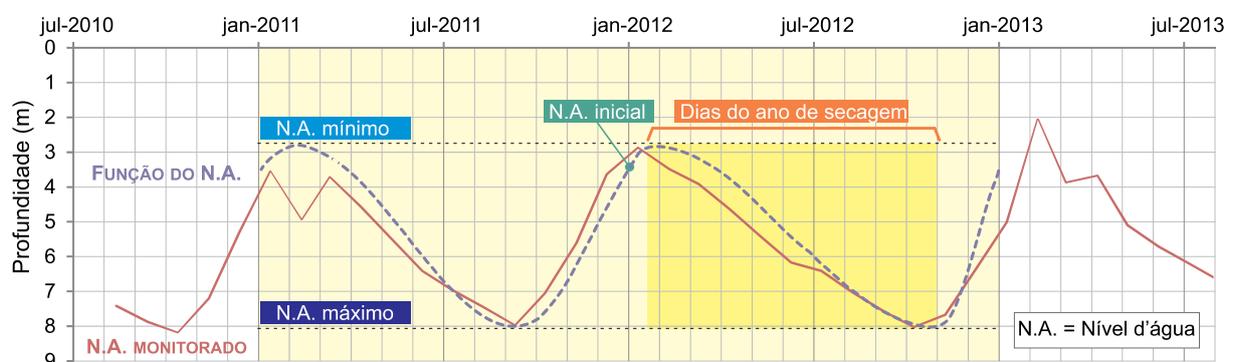


Figura 4.19: Nível d'água monitorado e função do nível d'água.

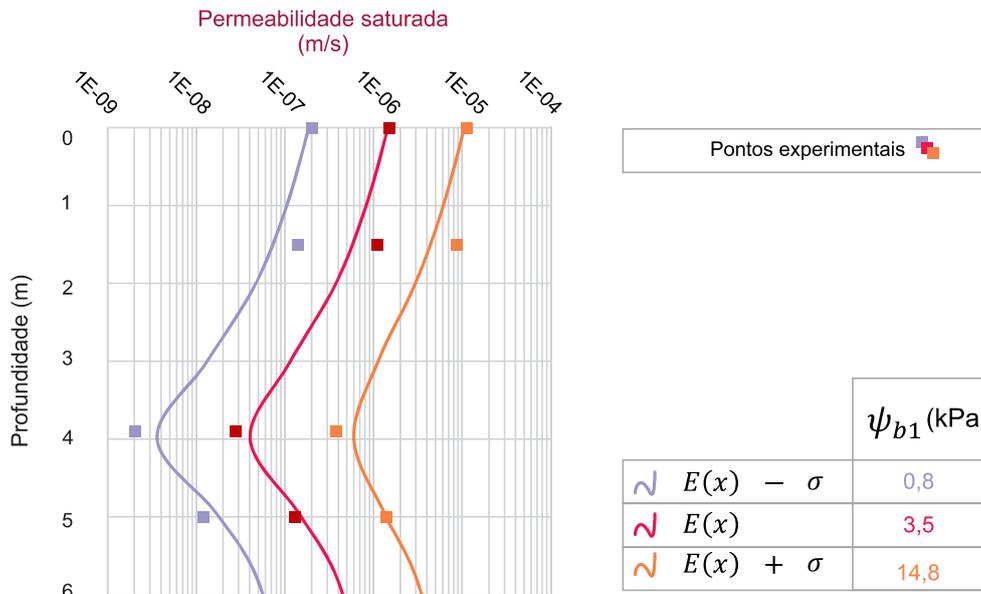


Figura 4.20: Dados considerados incertos na análise de fluxo.

Da mesma forma, considerando o coeficiente de variação igual a 15%, foram obtidos os cenários para os valores de condutividade hidráulica medidos ao longo da profundidade. Nos dois casos, foi admitida uma perfeita correlação entre os valores de condutividade hidráulica e entre os valores de primeiro valor de entrada de ar ao longo da profundidade. Ao longo dos dois anos considerados na análise transiente, foram definidos oito tempos específicos para a avaliação de dados ao longo do perfil, que coincidem com datas nas quais foram realizados registros de monitoramento em campo.

#### 4.3.4 Avaliação do desempenho do modelo de fluxo proposto

A avaliação e validação do modelo de análise de fluxo rítmico foi realizada comparando os resultados previstos pelo modelo com os dados de sucção obtidos no monitoramento do campo experimental. A Figura 4.21 apresenta a evolução de diversas variáveis ao longo do tempo. Considerando o desenvolvimento da sucção e do volume de água ao longo do tempo os resultados foram bastante satisfatórios. Nos períodos chuvosos, os baixos teores de sucção medidos pelo tensiômetro para as profundidades de 0,48 e 1,45 m se aproximam bem da análise numérica. Utilizando como referência a sucção medida pelo papel filtro, a análise numérica superestimou os valores de sucção no período chuvoso e subestimou os valores no período seco. Os dados de sucção obtidos pela consideração da umidade se apresentaram quase sempre maiores do que os dados previstos.

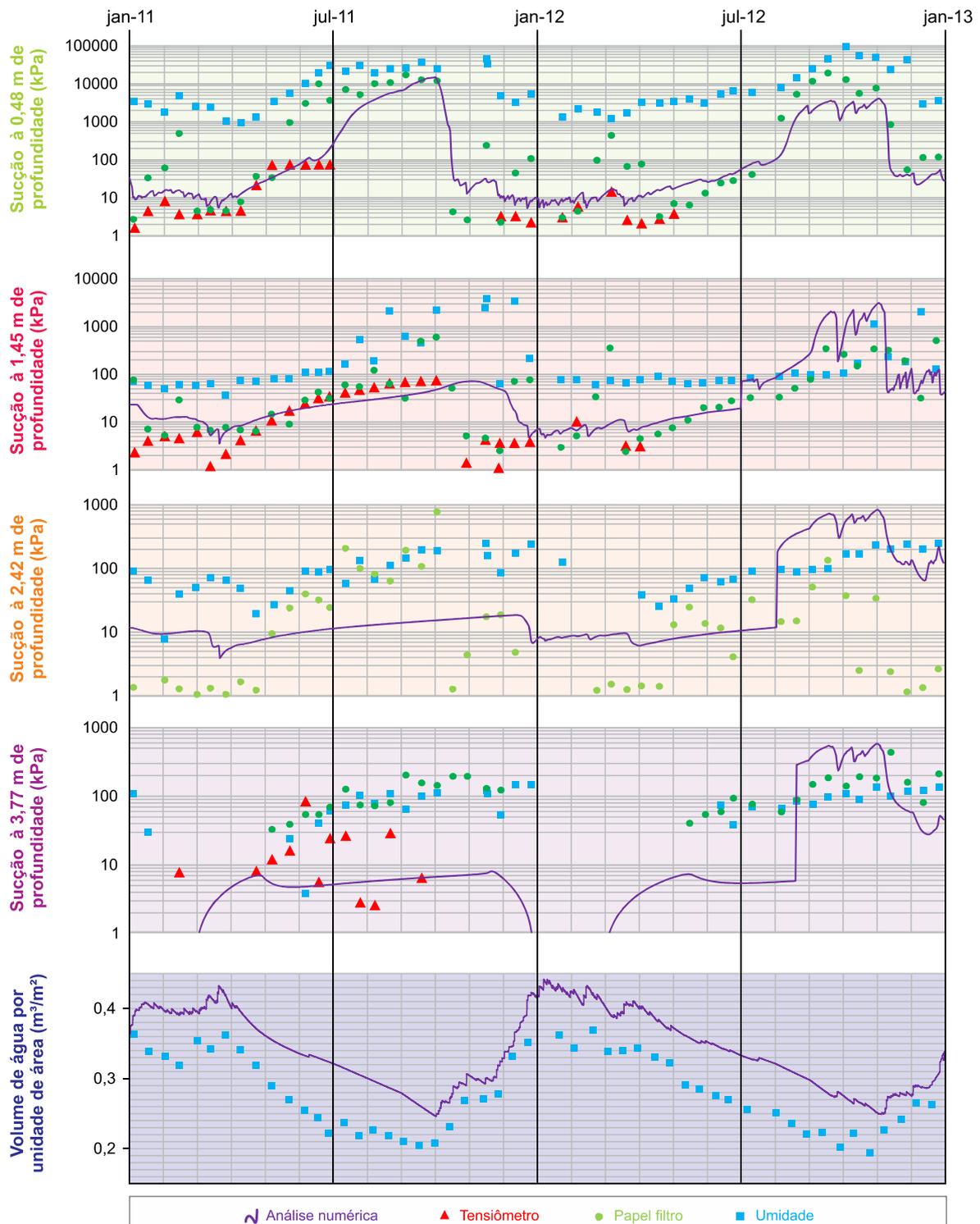


Figura 4.21: Validação da análise de fluxo no tempo.

Pelos dados de sucção previstos é possível estimar que a zona ativa esteja entre 1,45 e 2,42 m, de profundidade da superfície do solo, visto que em 1,45 m ainda ocorrem grandes variações de sucção (10 a 1000 kPa, aproximadamente) e na profundidade de 2,42 m a faixa de flutuação de sucção é extremamente reduzida. Considerando somente o trecho de 0,00 a 3,77 m de profundidade, o volume de água (em termos de

área de solo) também foi avaliado para a validação. A previsão de quantidade de água no solo pela análise numérica se aproxima bem dos dados experimentais obtidos pela umidade. A análise numérica conseguiu representar até as micro variações observadas, por exemplo, nos dados experimentais no mês de abril de 2012.

A Figura 4.22 apresenta os valores de sucção obtidos na análise numérica, ao longo da profundidade, para oito tempos específicos. É possível identificar uma boa relação entre o perfil de sucção previsto e os dados experimentais de sucção. Para os meses mais chuvosos (dezembro, janeiro e abril) o perfil de sucção previsto situou, quase sempre, entre os dados experimentais do papel filtro, tensiômetro e umidade. Nos meses mais secos (agosto de 2011 e de 2012), a sucção prevista no o topo do solo ultrapassou o valor de 1000 kPa, acompanhando a tendência dos dados experimentais medidos nas profundidades mais rasas do poço experimental.

#### **4.3.5 Balanço de água**

A Figura 4.23 apresenta o balanço de água obtido pela análise de fluxo considerando os parâmetros médios. O fluxo foi considerado positivo quando associado à entrada de água no solo e negativo quando associado à saída. A precipitação é o principal componente atmosférico responsável por introduzir água no solo, e a evapotranspiração é o elemento que retira a água do solo. A evolução da curva de precipitação acumulada revela três períodos chuvosos bem definidos: 1) jan/2011 à mar/2011, 2) out/2011 à abr/2012, e 3) out/2012 à dez/2012. A ação da evapotranspiração é praticamente constante ao longo dos dois anos de análise. A evapotranspiração foi obtida em termos potencial e real. A evapotranspiração real se distancia da evapotranspiração potencial nos períodos secos para os quais os valores de sucção são bastante elevados. O fluxo na fronteira solo-atmosfera corresponde à quantidade de água que entra ou sai do topo do solo. Na prática ela é dependente dos valores de precipitação, evapotranspiração real e escoamento superficial como sugerido na Figura 3.13. A ação do escoamento subsuperficial se resume aproximadamente no fornecimento de água ao durante às primeiras metades dos períodos chuvosos e na retirada de água nos meses restantes, e sua contribuição é relevante e essencial para que a variação de água no interior do solo seja equalizada. A variação de água no interior do solo foi calculada utilizando como referência o trecho entre as cotas 10,00 e 6,33 m, que corresponde ao trecho monitorado em campo.

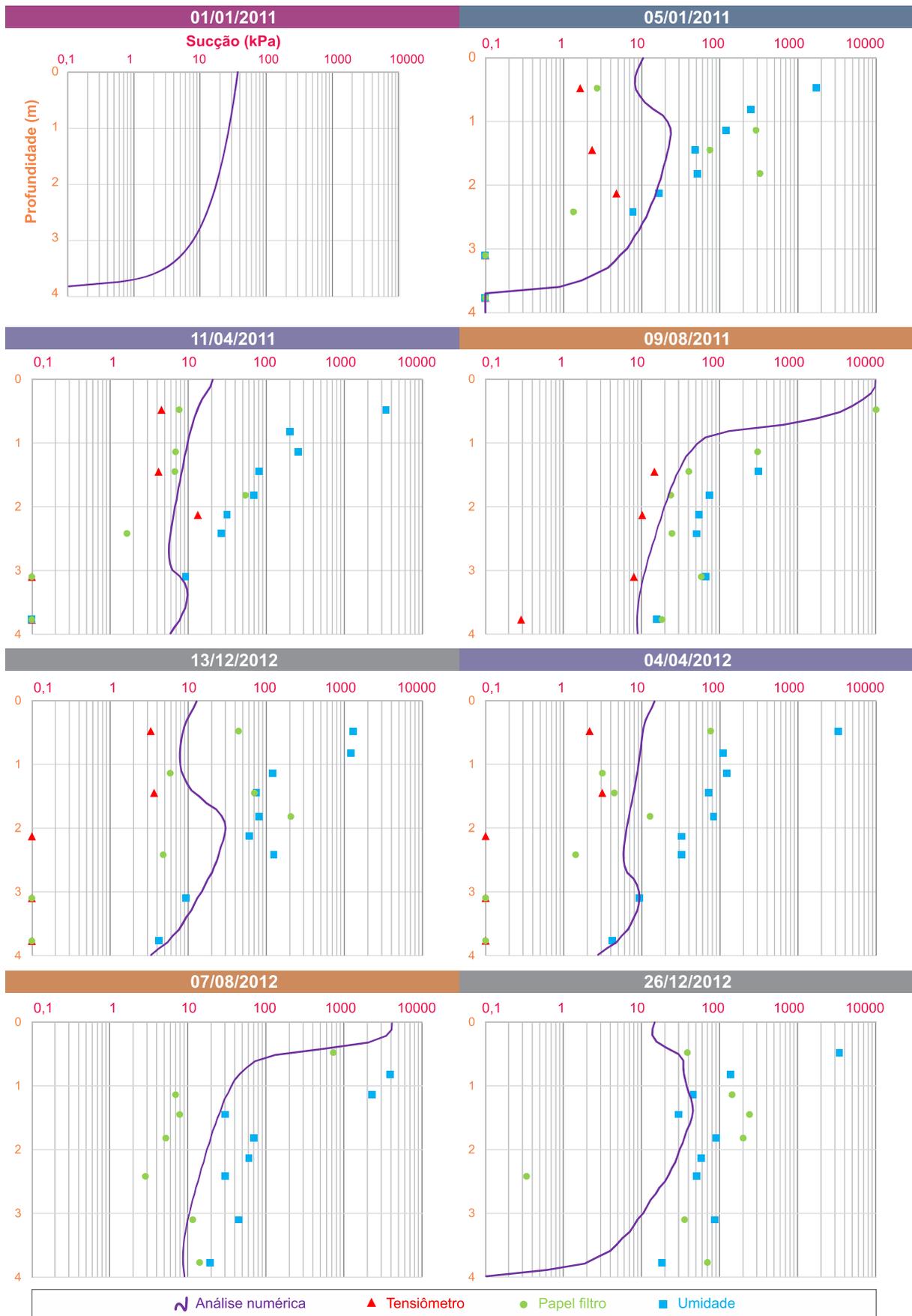


Figura 4.22: Validação da análise de fluxo na profundidade.

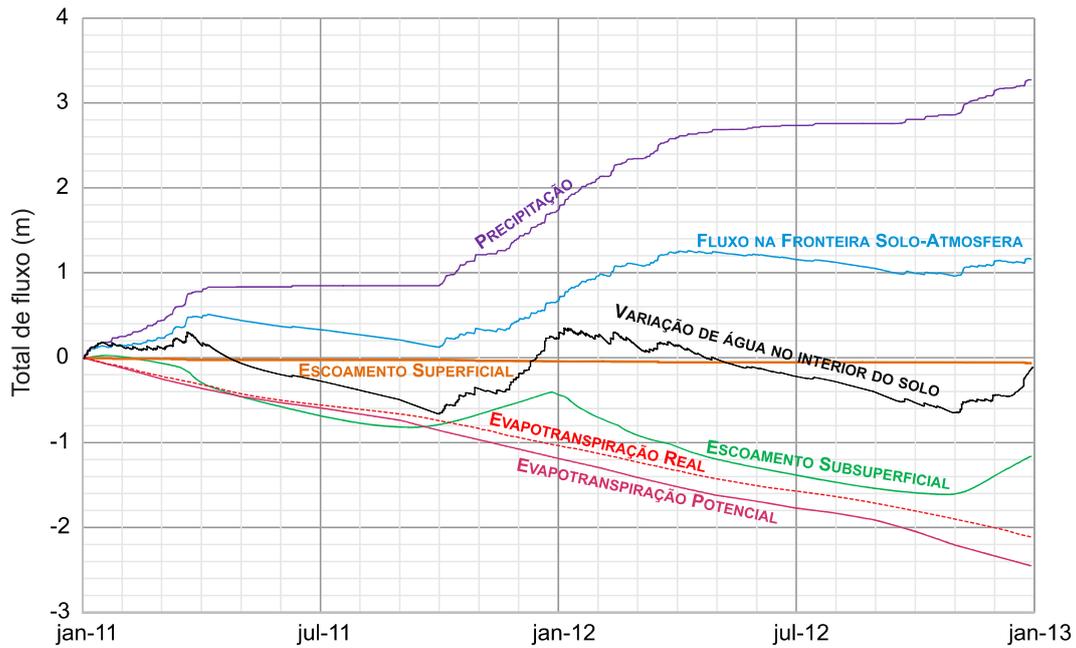


Figura 4.23: Balanço de água na análise de fluxo (valores acumulados).

#### 4.3.6 Distribuição probabilística de sucção

Como já discutido na Seção 2.3, as avaliações geotécnicas tradicionalmente utilizam a abordagem determinística (i.e. consideram como parâmetros de entrada para os modelos de avaliação apenas valores médios); e a abordagem probabilística, quando utilizada, geralmente é na determinação da probabilidade de ruptura de taludes. Considerando a importância da distribuição probabilística em relação ao valor médio, e com o propósito de discutir outras aplicações da abordagem probabilística na prática geotécnica, a presente seção discute a distribuição probabilística da sucção ao longo do tempo pela utilização do método APEM (Seção 2.3.2). Foram considerados como dados entrada incertos a condutividade hidráulica e o primeiro valor de entrada ar.

A Figura 4.24 apresenta a distribuição probabilística da sucção prevista ao longo do tempo para as profundidades de 0,48 e 2,42 m. Primeiramente, nota-se a diferença entre a previsão de sucção utilizando os parâmetros médios ( $u_w[E(x)]$ ) e a média das previsões de sucção ( $E(u_w)$ ). Tal diferença é explicada pela não proporcionalidade entre as previsões utilizando os parâmetros mais um desvio ( $\sigma$ ) e os parâmetros menos um desvio, fundamento do método APEM, pela forma complexa como estas variações agem alterando o fluxo de água no solo.

As previsões probabilística de sucção foram calculadas utilizando a curva normal e uma diferença de três desvios padrão em relação à média. Os resultados

apresentados na Figura 4.24 (A e B) mostram que a faixa de possibilidade de valores de sucção (valores entre  $E(u_w) + 3\sigma$  e  $E(u_w) - 3\sigma$ ), é diretamente proporcional ao valor central da previsão. A evolução dos coeficientes de variação das previsões para as correspondentes profundidades, apresentada na Figura 4.24 (C), sintetiza a relação entre o desvio padrão e a média ao longo do tempo. Observa-se que a capacidade do modelo em retornar para uma condição próxima da inicial (quando encerra-se um ciclo anual), influencia diretamente na variação dos coeficientes de variação. Ou seja, o comportamento rítmico das condições atmosféricas aplicadas como condições de contorno para o problema de fluxo, favorece para que o coeficiente de variação da variável prevista também tenha um comportamento rítmico interanual.

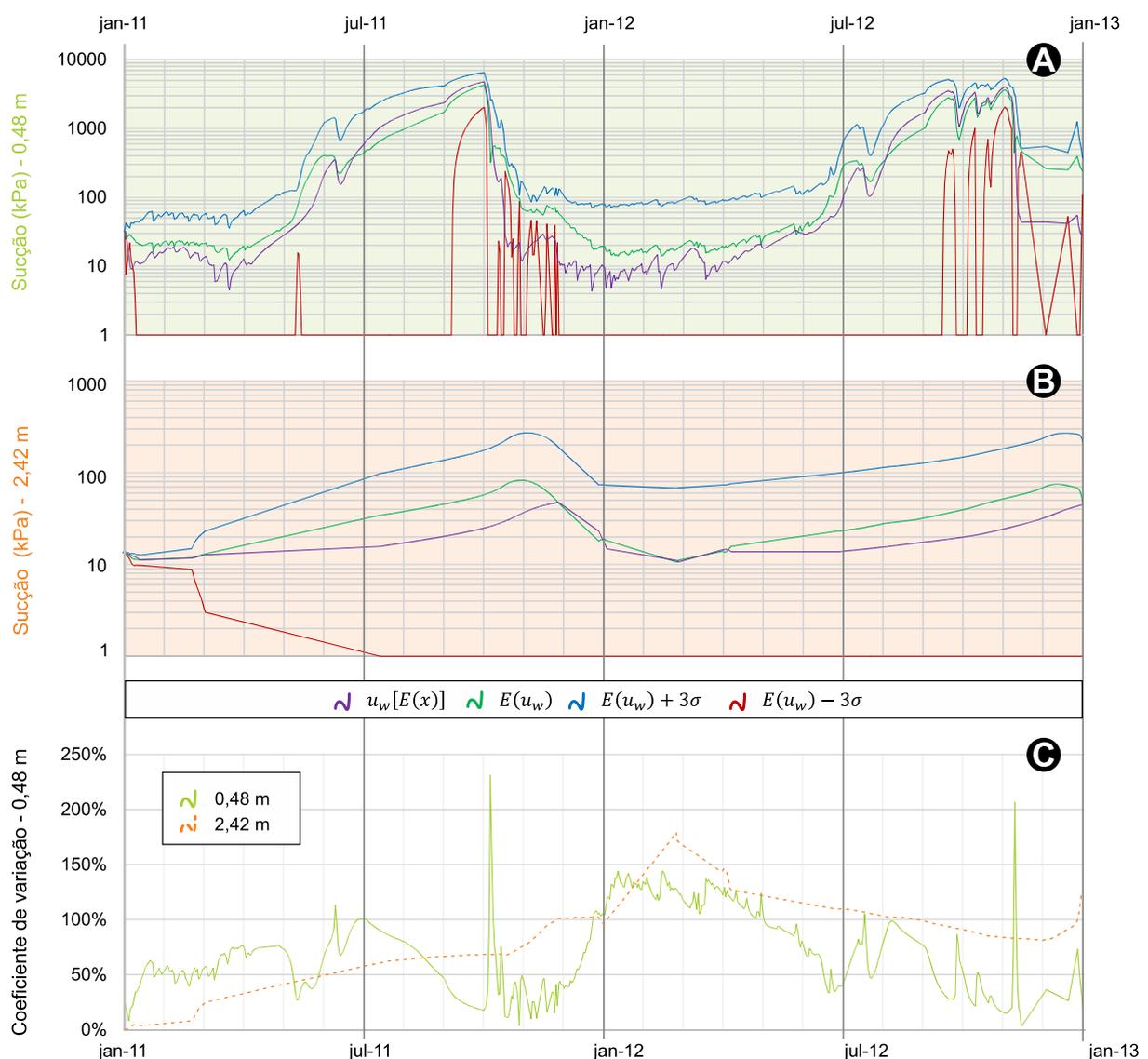


Figura 4.24: A) Distribuição probabilística de sucção ao longo do tempo – 0,48 m, B) Distribuição probabilística de sucção ao longo do tempo – 0,48 m, C) Coeficiente de variação da análise probabilística.

A Figura 4.25 apresenta a distribuição probabilística de sucção prevista ao longo da profundidade para sete tempos específicos. O perfil de sucção plotado em escala logarítmica permite que as variações de sucção ao longa da profundidade para os dias mais secos (09/08/2011 e 07/08/2012) sejam observadas com proporcional clareza em relação as variações de sucção para os dias mais chuvosos (11/04/2011 e 04/04/2012). Porém, individualmente, a distribuição probabilística do perfil de sucção fica deformada (i.e. perde visualmente a proporcionalidade).

As incertezas consideradas possuem grande influência nos valores de sucção na zona próxima à fronteira solo-atmosfera e, quanto mais próximo do nível d'água, menores são as variações observadas dos perfis probabilísticos. Esta influência das incertezas consideradas nos valores de sucção mais superficiais é relativamente grande. Por exemplo, no dia 09/08/2011, considerando as incertezas dos parâmetros hidráulicos, a faixa de possíveis valores de sucção está entre 0 e 5000 kPa.

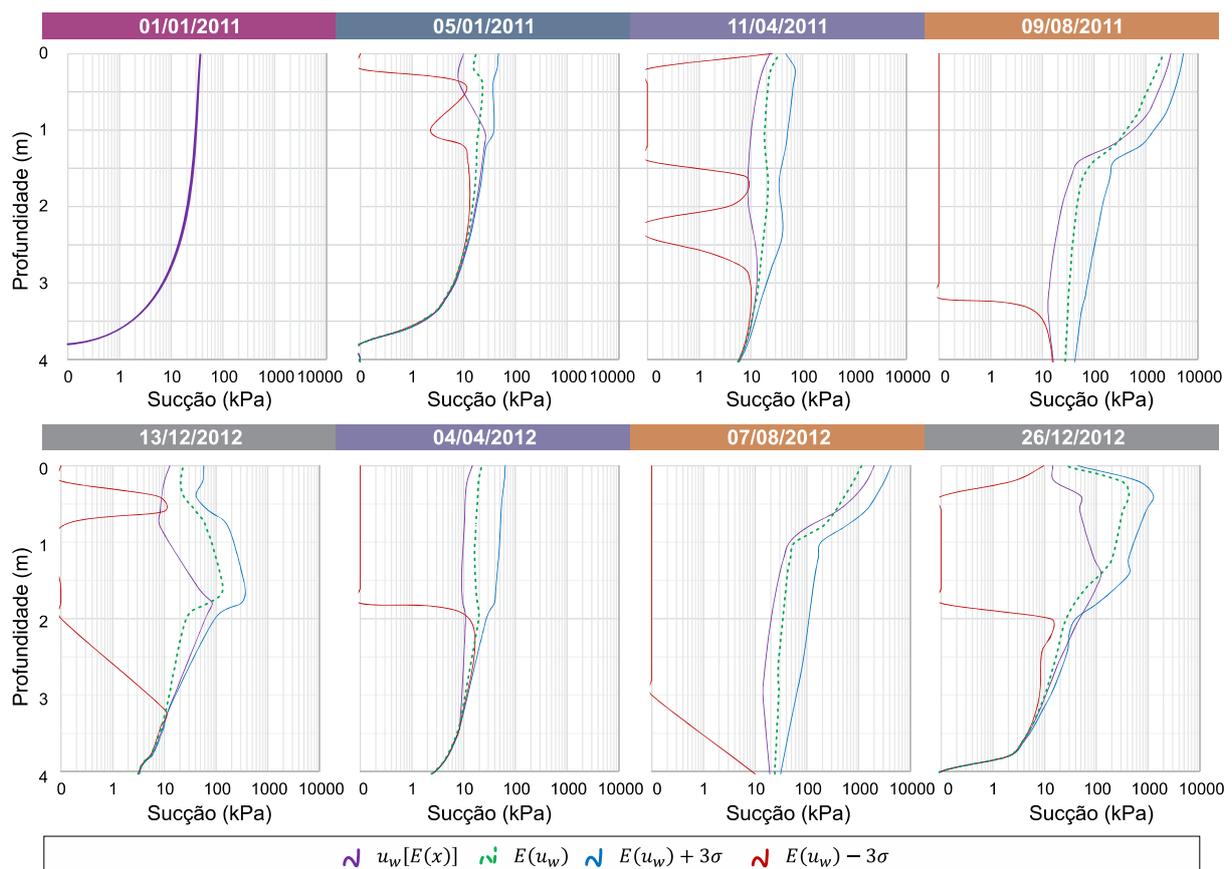


Figura 4.25: Perfis probabilísticos de sucção.

#### 4.4 METODOLOGIAS DE SIMPLIFICAÇÃO DO PROBLEMA NUMÉRICO

Os dados de precipitação que geralmente estão disponíveis – ou são os únicos disponíveis - para a modelagem solo-atmosfera, são dados de chuva acumulada no dia e as médias históricas mensais. A forma como estas simplificações, entre outras (relacionadas à consideração de eventos reais de chuva), alteram a distribuição de sucção ao longo da profundidade do perfil do solo é a grande discussão da presente seção. Serão consideradas nas análises de fluxo as características do perfil do solo do campo experimental apresentadas na Seção 4.3.1.

A Figura 4.26 apresenta a distribuição de sucção ao longo do tempo para as quatro profundidades de referência do campo experimental considerando quatro simplificações das condições de contorno mostradas na Seção 4.3.2: chuva acumulada diária, chuva da média histórica mensal, somente fluxo na fronteira solo-atmosfera, e somente fluxo basal. São também apresentadas as sucções previstas utilizando a duração real da chuva, já trabalhadas nas seções anteriores.

Considerando as diferentes distribuições de chuva (duração real, diário e mensal), observa-se em todas as profundidades que quanto maior a duração da distribuição, maior o atraso para a elevação do valor da sucção. Ou seja, ao tomar um evento real de chuva e distribuir o seu volume de água para períodos maiores, a tendência é que o solo seja mantido mais úmido por mais tempo. Esta mesma distribuição de água para períodos maiores também facilita para que o volume de água da chuva infiltre no solo e o escoamento superficial seja evitado (como mostra o total de fluxo, também apresentado na Figura 4.26). As variações de fluxo e sucção na análise considerando os dados da chuva histórica mensal são mais suavizadas justamente pela não consideração de eventos de chuvas intensas.

A desconsideração do fluxo basal (linha vermelha) altera de maneira significativa a distribuição da sucção ao longo do tempo. A elevação da sucção também é atrasada em relação à previsão padrão pois ao desconsiderar o rebaixamento do nível d'água o solo é mantido úmido (com baixa sucção) por mais tempo. Após aproximadamente um ano de análise, o perfil do solo se aproximou do estado de saturação total e a análise foi interrompida.

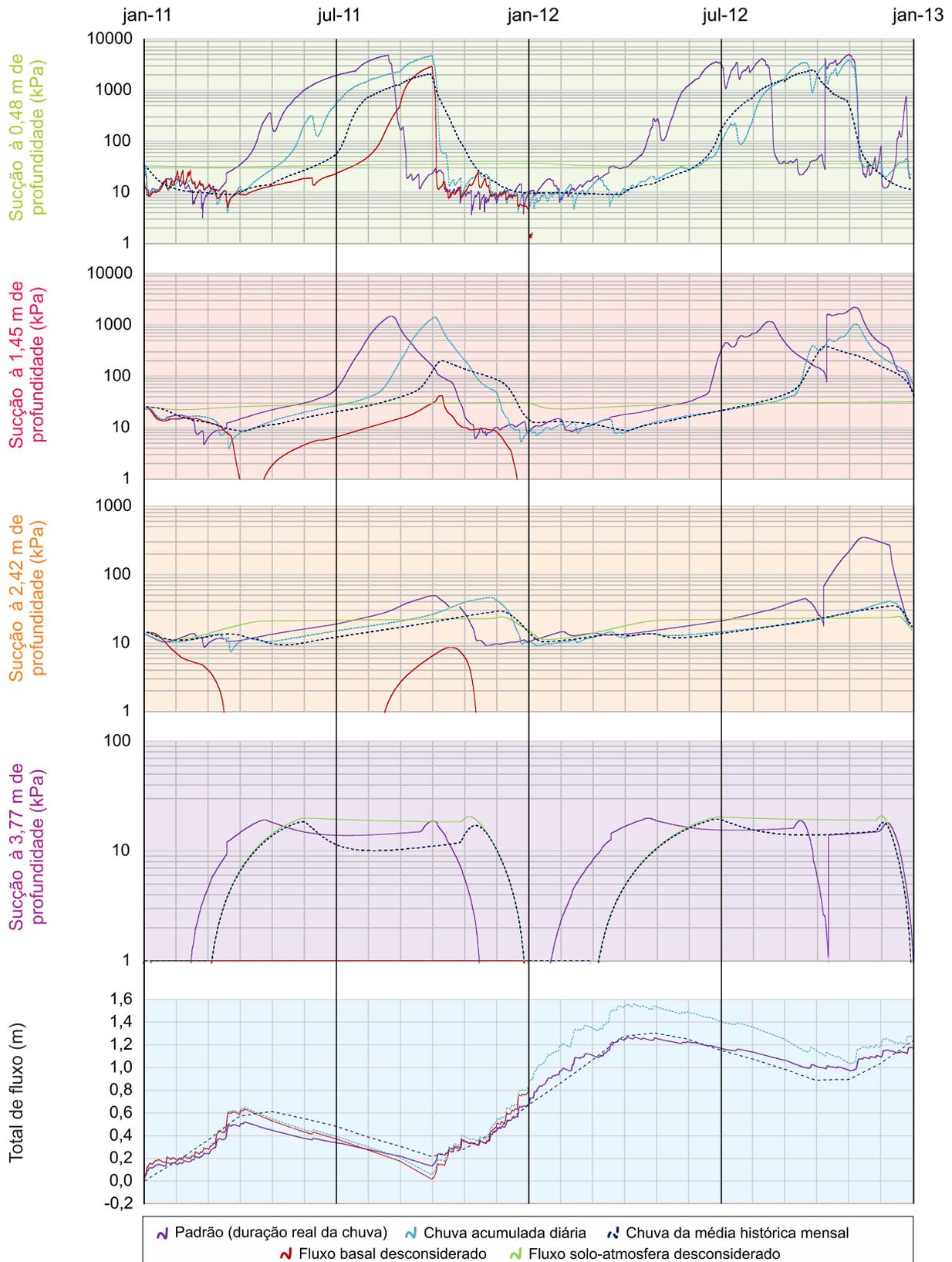


Figura 4.26: Distribuição de sucção ao longo do tempo segundo metodologias de simplificação.

A linha verde (Figura 4.26) representa a análise que desconsidera o fluxo na fronteira solo-atmosfera. As variações de sucção para tal simplificação são mínimas pois o intenso fluxo de entrada e saída de água, característico da fronteira solo-atmosfera, não atua no perfil e a variação do nível d'água acaba influenciando pouco o trecho mais raso do perfil.

#### **4.5 DESAFIOS E DESEMPENHO DA ANÁLISE NUMÉRICA**

As análises de fluxo de longa duração representaram um grande desafio em termos de modelagem solo-atmosfera, obtenção e aplicação de dados atmosféricos, e monitoramento de sucção e umidade para a validação da análise numérica. A consideração de dados atmosféricos monitorados, a aplicação da chuva em nível de duração real e a modelagem solo-atmosfera refinada representaram um alto nível de dificuldade para a geração de scripts que pudessem ser resolvidos em tempo compatível com as necessidades práticas.

Outro grande desafio foi desenvolver uma integração eficiente entre as diferentes ferramentas de análises (em termos de coleta de dados, geração de scripts e relatórios de resultados) devido à utilização de dados de diferentes naturezas e a necessidade de contar com diferentes programas computacionais.

Entre os programas utilizados, o que mais exigiu estudo e tempo para as análises foi o FlexPDE. Para obter os resultados apresentados no capítulo foram necessárias mais de 200 h reais de análises no programa. O tempo médio para rodar um cenário de análise de fluxo de dois anos foi de 20 h. Considerando também as análises prévias, atualizações, ajustes, e verificação dos scripts, mais de 5000 h podem ser contabilizadas.

A metodologia da análise numérica de fluxo de água no solo discutida no presente capítulo será desenvolvida para um caso prático de análise de estabilidade de taludes hipotéticos no próximo capítulo, focando nas flutuações dos parâmetros de desempenho ao longo do tempo.

# 5 APLICAÇÃO DA ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

A abordagem rítmica probabilística proposta será aplicada na avaliação de taludes hipotéticos, considerando o solo tropical do campo experimental de Aparecida de Goiânia (GO). O presente capítulo desenvolve a avaliação dos taludes hipotéticos em termos de análise de fluxo, tensões e estabilidade, focando, na apresentação dos resultados, na análise de estabilidade.

## 5.1 GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS TALUDES HIPOTÉTICOS, E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O detalhamento geométrico e as características do solo dos taludes hipotéticos são apresentados na Figura 5.1. Os taludes têm a altura igual a cinco metros e a inclinação igual  $33,7^\circ$ , e se diferenciam somente pela amplitude anual do nível d'água (Figura 5.2). O talude hipotético "A" possui a amplitude anual igual a 7 m e o talude "B" possui amplitude anual igual a 2 m. Os valores do nível d'água máximo são coincidentes para os taludes. Os taludes possuem, portanto, a mesma condição local mas estão inseridos em diferentes condições de bacia hidrográfica pela particularidade da flutuação do nível d'água.

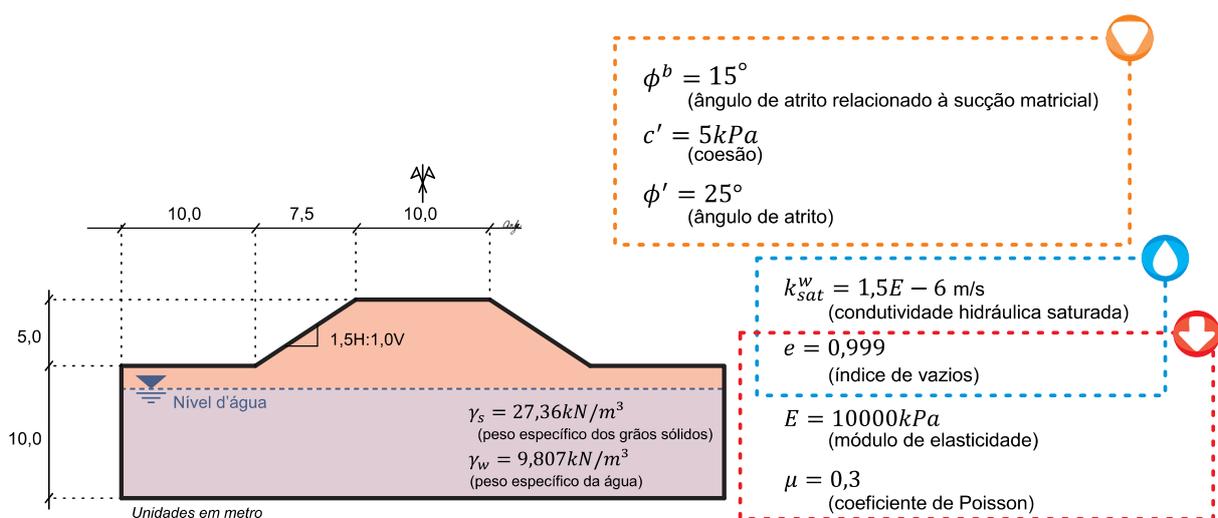


Figura 5.1: Geometria e características dos taludes hipotéticos.

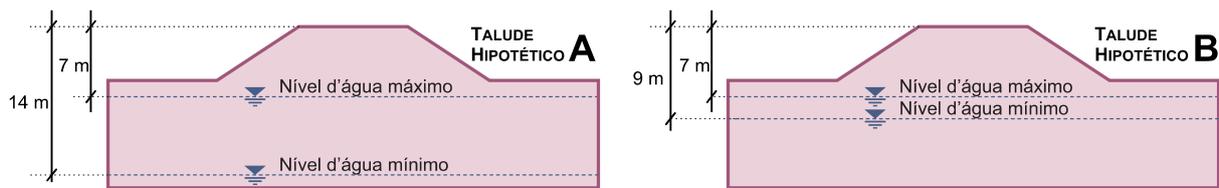


Figura 5.2: Amplitude anual do nível d'água para os taludes hipotéticos.

A Figura 5.3 apresenta as condições de contorno de fluxo e tensões dos taludes hipotéticos. Serão considerados condições de contorno: (1) condições atmosféricas aplicadas na fronteira solo-atmosfera; (2) fluxo basal pela aplicação da carga hidráulica correspondente ao nível d'água. Para aplicação das condições atmosféricas serão utilizados dados do monitoramento de chuva, temperatura e umidade relativa realizada no campo experimental de Aparecida de Goiânia (Seção 4.3.2), e os dados históricos de precipitação apresentados na Seção 4.2. O fluxo basal será função da equação do nível d'água proposta na Seção 3.4.5. Nos limites laterais do talude o fluxo de água será nulo. Na presente aplicação, a análise de tensões tem como objetivo apenas determinar as tensões totais iniciais correspondentes ao peso próprio do solo. Para as análises de tensões a base do talude será impedida de sofrer descolamentos nas direções x e y, e as laterais do talude terão o deslocamento na direção y impedido.

A curva característica solo-água bimodal obtida no estudo do perfil do solo do campo experimental de Aparecida de Goiânia será utilizada na definição do solo do talude hipotético. A curva foi ajustada utilizando a equação de Gitirana Jr. & Fredlund (2004) e é apresentada na Figura 5.4. A função de condutividade hidráulica foi construída a partir da definição do valor da condutividade hidráulica saturada e das características da CCSA, pela aplicação do método de Brooks & Corey (1964). O limite inferior adotado para a condutividade hidráulica foi de  $10^{-13}$  m/s, segundo recomendação de Ebrahimi *et al.*, 2000. A condição inicial será definida na aplicação do cenário de ano habitual na Seção 5.3.1.

A abordagem probabilística será aplicada na avaliação dos taludes hipotéticos pela consideração de que quatro parâmetros do solo são incertos: condutividade hidráulica saturada, valor de entrada de ar, coesão e ângulo de atrito. A Tabela 5.1 apresenta o valor médio e o coeficiente de variação de cada parâmetro. Os coeficientes de variação foram selecionados a partir da coletânea de valores típicos apresentados na Tabela 2.2, utilizando como referência o solo siltoso não saturado.

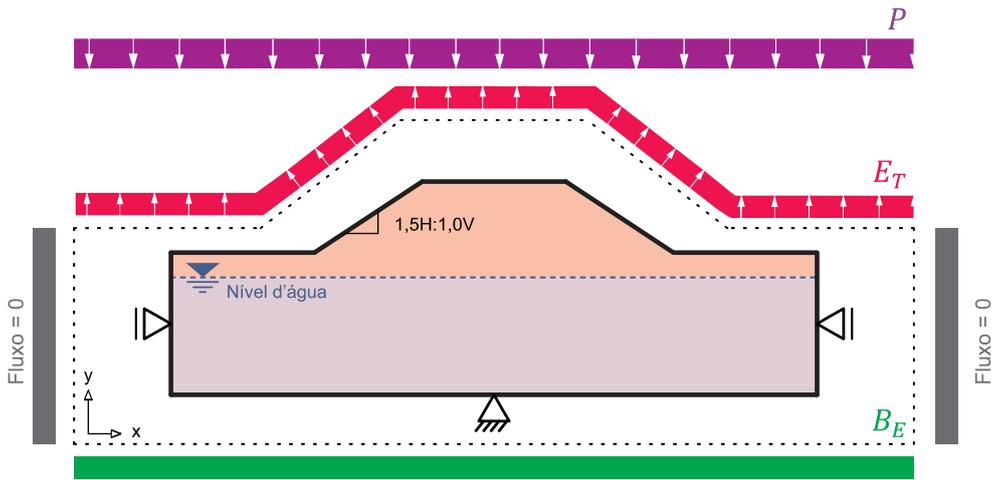


Figura 5.3: Condições de contorno de fluxo e tensões.

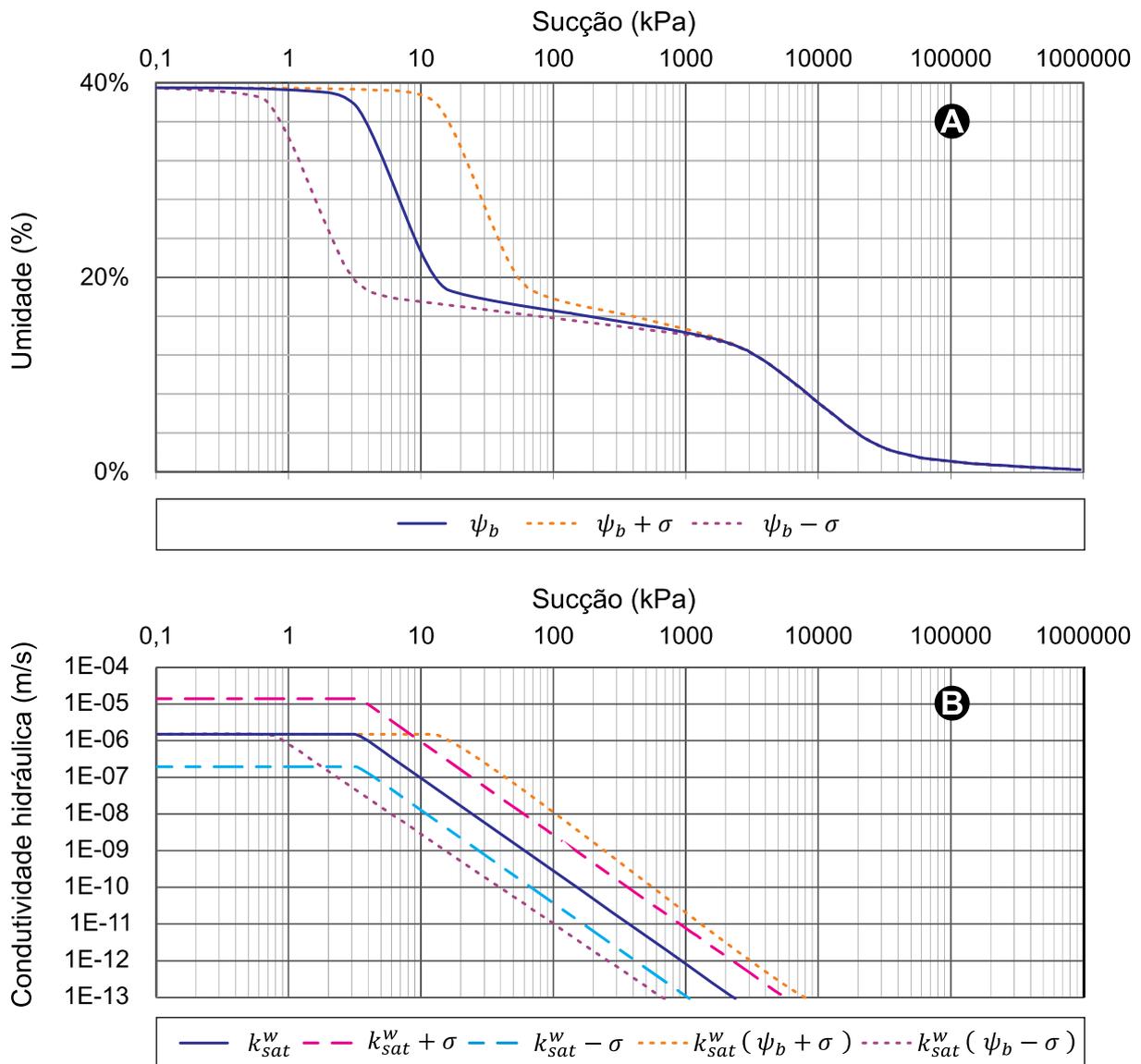


Figura 5.4: A) Cenários da curva característica solo-água; B) Cenários da função de condutividade hidráulica.

Na Figura 5.4 também são apresentados os cenários da CCSA e da função de permeabilidade pela consideração dos parâmetros incertos. Para a CCSA são adotados dois cenários, além da curva com os parâmetros médios, considerando a variação do valor de entrada de ar segundo o seu desvio padrão. Para a função de condutividade hidráulica são adotados quatro cenários, além da função com os parâmetros médios, considerando o desvio padrão da condutividade hidráulica saturada e a influência do valor de entrada de ar da CCSA na determinação da função de condutividade. Portanto, a variação do valor de entrada de ar será considerada na definição da CCSA e na função de condutividade hidráulica.

Tabela 5.1: Parâmetros do solo considerados incertos.

	$\ln(k_{sat}), \ln(m/s)$	$\ln(\psi_{b1}), \ln(kPa)$	$c' (kPa)$	$\phi' (^{\circ})$
$E(x)$	-13,41	1.253	5,0	25,0
$CV (%)$	15	115	30	10

## 5.2 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

A metodologia de análise de fluxo, validada na Seção 4.3.4, será aqui aplicada juntamente com as análises de tensões e estabilidade para a avaliação dos taludes hipotéticos. As equações diferenciais parciais desacopladas de análise de tensões serão resolvidas no programa FlexPDE e a determinação dos fatores de segurança e superfícies crítica para os taludes hipotéticos será realizada pelo programa Safe-DF, desenvolvido e verificado por Gitiriana Jr. (2005).

A Figura 5.5 apresenta as malhas de elementos finitos utilizados nas análises de fluxo e de tensões. Na região próxima à fronteira solo-atmosfera, a malha da análise de fluxo foi refinada por causa das grandes flutuações dos valores de poropressão que acontecem na região como consequência dos processos de infiltração e evapotranspiração. O modelo de avaliação de estabilidade de taludes proposto no presente trabalho é baseado na investigação da propagação do ritmo climático para a modelagem solo-atmosfera e, conseqüentemente, para os parâmetros de desempenho do solo. Como já discutido no Capítulo 3, três cenários fundamentam a abordagem rítmica probabilística aplicada na avaliação dos taludes: ano habitual, ano excepcional chuvoso e chuvas máximas. Para cada cenário, serão consideradas diferentes condições de precipitação nas análises transientes de fluxo dos taludes hipotéticos.

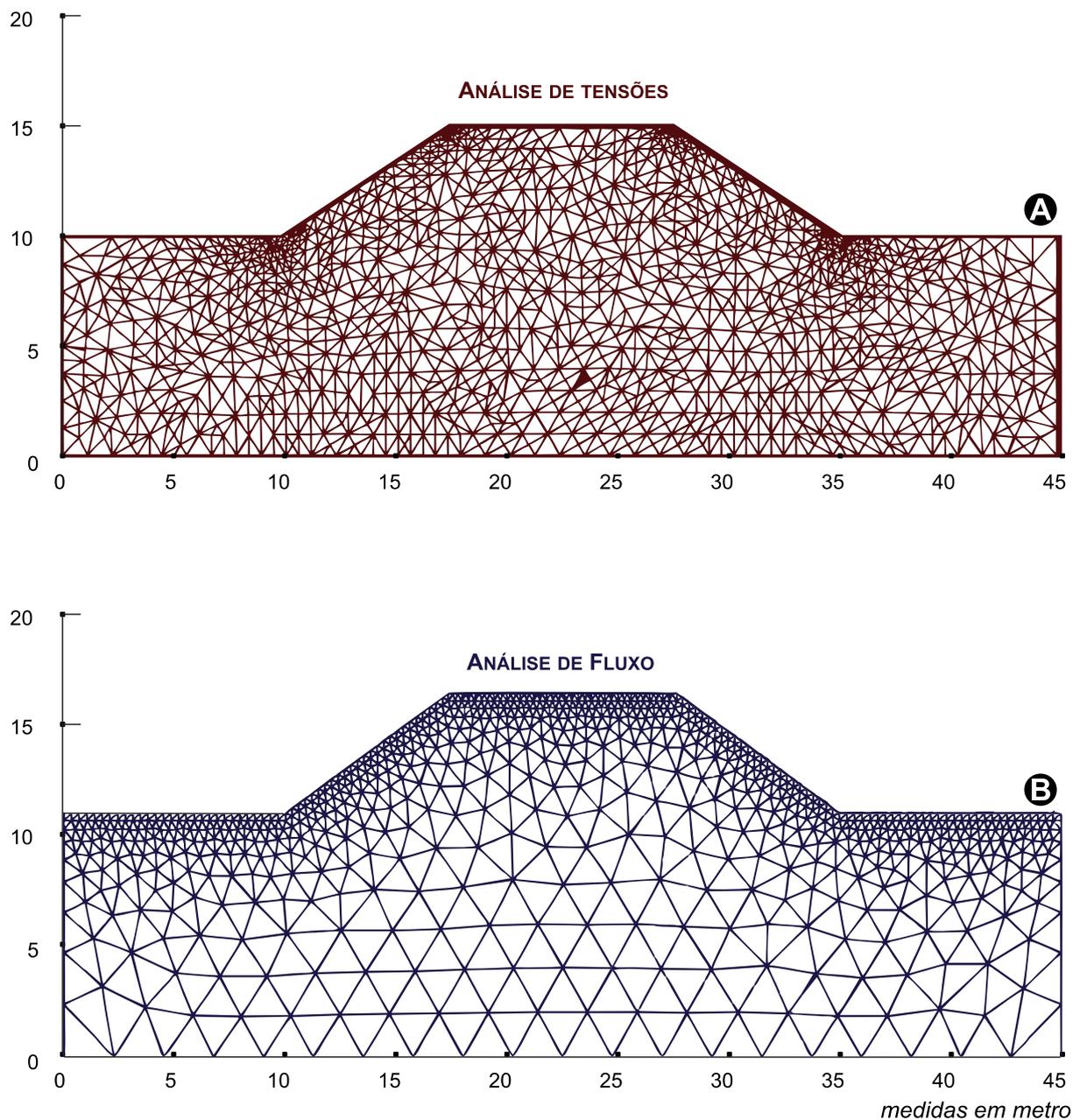


Figura 5.5: A) Malha dos elementos finitos para a análise de tensões; B) Malha dos elementos finitos para a análise de fluxo.

### 5.2.1 Cenário de ano habitual

No cenário de ano habitual será considerado, segundo a caracterização climática de anos chuvosos, a aplicação de um ano chuvoso habitual nos taludes hipotéticos. Na presente avaliação será considerado como ano habitual chuvoso o ano de 1994 (Figura 5.6) e os eventos de chuva serão consideradas em escala diária.

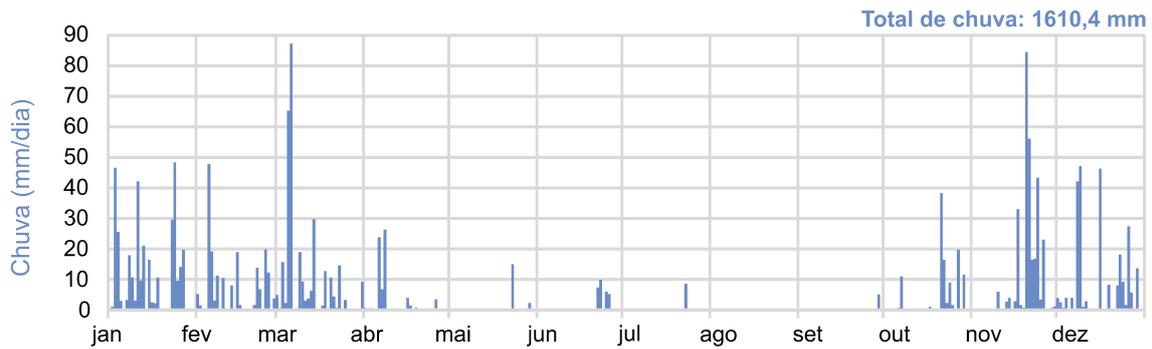


Figura 5.6: Chuva diária de um ano habitual (1994).

O ano habitual é aquele onde a quantidade total de chuva é próximo da mediana obtida na análise estatística de um conjunto de vários anos. Considerando a quantidade de chuva do ano habitual como uma referência para que a variação de água no interior do solo seja desconsiderada em uma avaliação anual, espera-se que ao final de um ano habitual a alteração na quantidade de água armazenada seja mínima em relação à condição inicial. Neste sentido, é possível calibrar a condição inicial de poropressão, os parâmetros hidráulicos e os dados de evapotranspiração investigando como eles podem influenciar o resultado final do balanço hídrico de água. O critério de calibração devem ser definidos para cada projeto específico.

### 5.2.2 Cenário de ano excepcional chuvoso

No cenário de ano excepcional chuvoso é aplicado nos taludes hipotético um ano excepcional chuvoso, segundo a caracterização anual climática apresentada no capítulo anterior. Será utilizado nesta avaliação os totais diários de chuva do ano de 2011 medidos pela estação meteorológica do campo experimental apresentado no Capítulo 4. O presente cenário de ano excepcional chuvoso utiliza como condição inicial a distribuição de poropressões de água final do cenário de ano habitual.

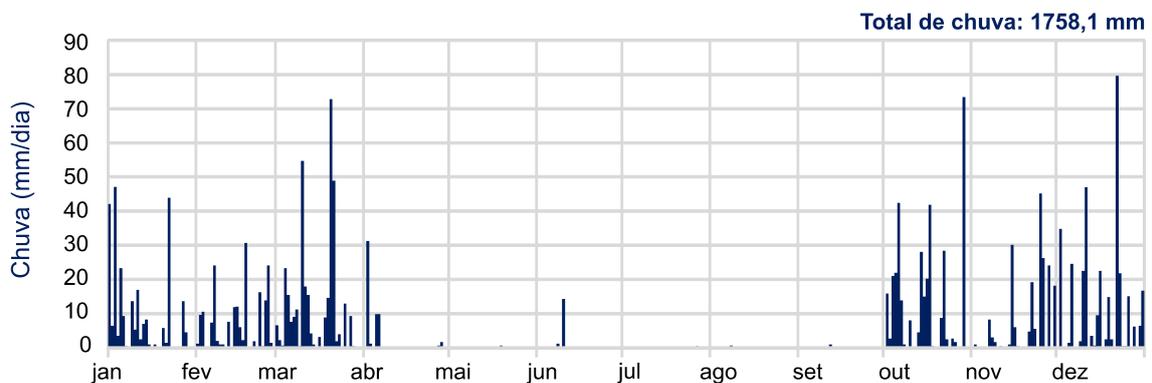


Figura 5.7: Chuva diária de um ano excepcional chuvoso (2011).

### 5.2.3 Cenários de chuvas máximas

Os cenários de chuvas máximas serão aplicados segundo a relação entre a intensidade, duração e frequência de eventos de chuvas máximas definidas na construção de curvas IDF. Dois cenários serão considerados: um cenário com chuva de curta duração e outro com chuva de longa duração.

No cenário de chuva com curta duração serão utilizadas como referência as curvas IDF clássicas da Hidrologia desenvolvidas para um único evento de chuva, comumente apresentando a duração do evento em minutos.

A Figura 5.8 apresenta as curvas IDF para chuvas de curta duração que serão utilizadas na presente avaliação. As curvas foram construídas utilizando como base os 21 anos de dados de precipitação apresentados na Figura 4.15 e as considerações de Oliveira *et al.* (2005). As curvas IDF de curta duração correspondem a altas intensidades de chuva que, para os solos com valores de condutividade hidráulica menores que  $10^{-6}$  m/s, indicam a ocorrência do processo de escoamento superficial para todas as durações consideradas.

A Figura 5.8 também apresenta as chuvas medidas no ano de 2011 no campo experimental apresentado no Capítulo 4, em termos de duração e intensidade do evento.

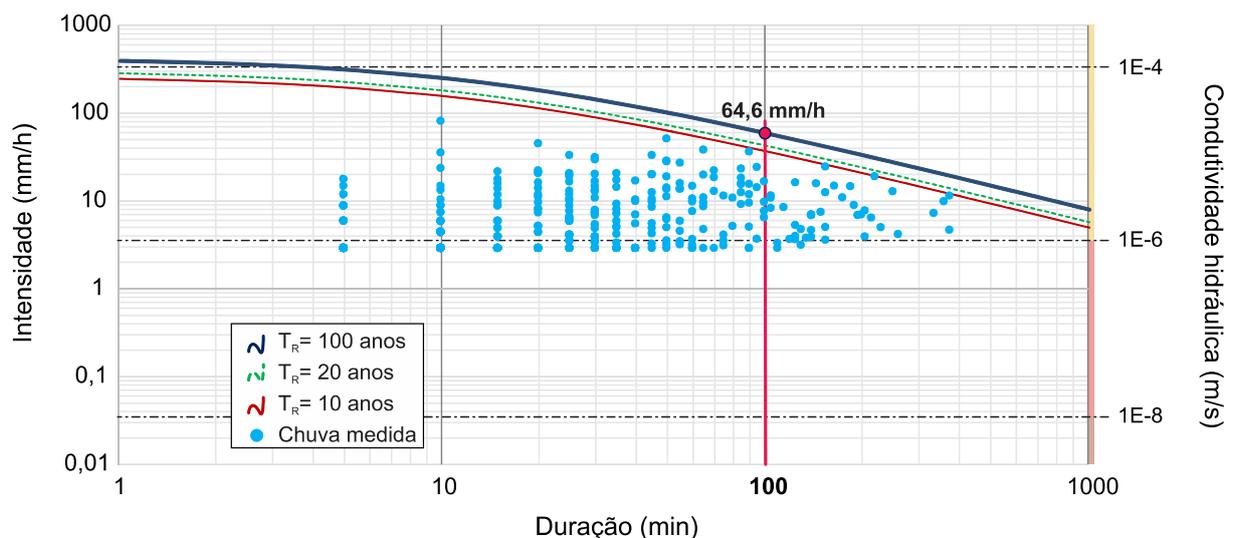


Figura 5.8: Chuva máxima para eventos de chuva contínua (alta intensidade e curta duração).

É importante também citar que quando as chuvas são distribuídas em durações maiores que a duração do evento (chuva acumulada do dia, por exemplo), a intensidade da chuva diminui favorecendo para a redução do escoamento superficial. Ou seja, utilizar a chuva acumulada do dia facilita a infiltração do volume de água das chuvas, diminui a ocorrência do escoamento superficial e favorece para que os valores de poropressão no interior do maciço de solo aumentem.

As curvas IDF de baixa duração são comuns na prática da Hidrologia, pois correspondem aos maiores valores de escoamento superficial que, potencialmente, interferem no volume de água disponível na superfície e na definição de projetos hidrológicos. Já na avaliação do desempenho de obras geotécnicas é importante considerar as hipóteses de distribuição de chuva que mais podem contribuir com a infiltração de água no solo e, conseqüentemente, com o aumento das poropressões de água no interior do mesmo. Neste sentido, são apresentadas na Figura 5.9, curvas IDF de chuvas de baixa intensidade e longa duração, construídas utilizando como referência as chuvas máximas do banco de dados de 21 anos de dados, considerando diferentes números de dias acumulados de chuva.

A Figura 5.10 apresenta o volume de água correspondente às chuvas máximas de longa duração e ao evento de evapotranspiração, e os valores de referência da condutividade hidráulica do solo.

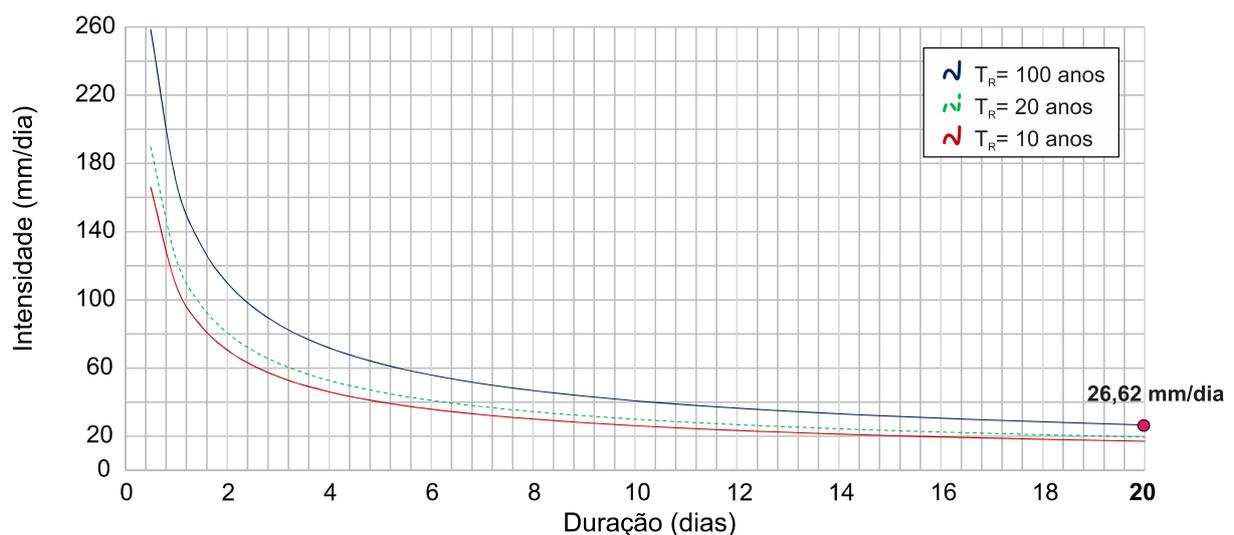


Figura 5.9: Chuva máxima para eventos de chuva acumulada diária (baixa intensidade e longa duração).

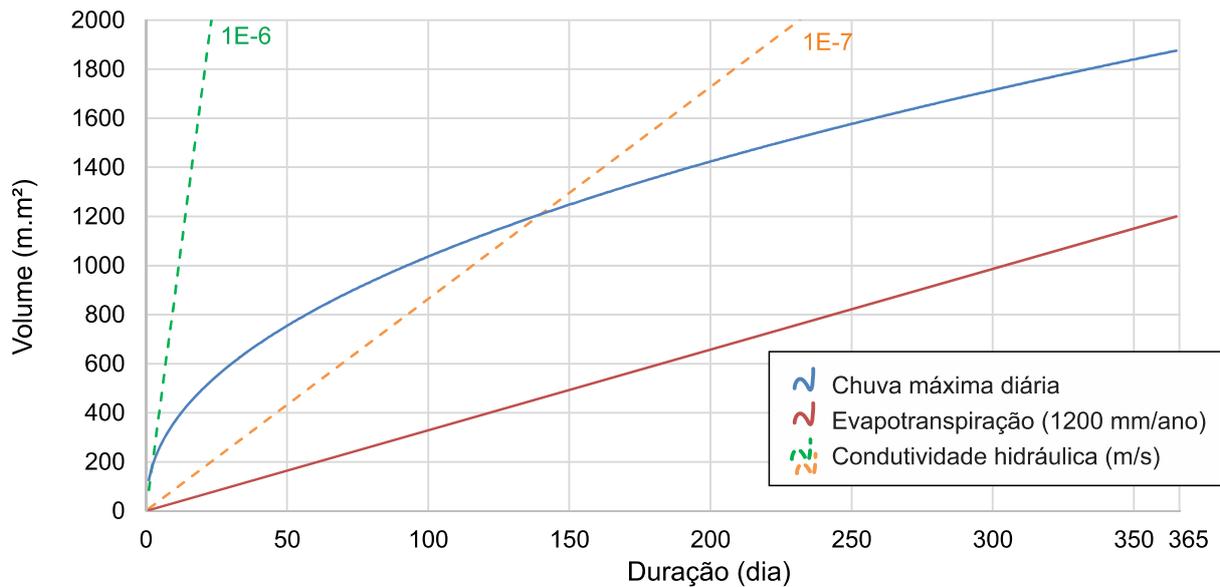


Figura 5.10: Volume de água da chuva máxima de longa duração.

O acréscimo de volume de água para as chuvas máximas, observado na Figura 5.10, é maior do que o volume de água para a evapotranspiração nos primeiros dias, e a partir do dia 50 as curvas tendem à uma inclinação próxima. Isto significa que, a partir do dia 50 o volume de água que se ganha com a aplicação de mais um dia de chuva máxima é perdido pela aplicação da evapotranspiração.

Nota-se, ainda, que para solos com condutividade hidráulica igual  $10^{-6}$  m/s o volume de água correspondente indica que praticamente toda água da chuva máxima será infiltrada, enquanto que nos solos com condutividade igual a  $10^{-7}$  m/s possivelmente ocorrerá o escoamento superficial.

Na aplicação dos cenários de chuvas máximas, dois eventos de chuva serão consideradas: 1) chuva com intensidade de 64,6 mm/h e 100 minutos de duração (Figura 5.8), e 2) chuva com intensidade de 26,62 mm/dia e 20 dias de duração (Figura 5.9). Os dois eventos correspondem ao tempo de retorno de 100 anos.

### 5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA

Serão apresentados aqui os principais resultados da aplicação da abordagem rítmica probabilística para os taludes hipotéticos. Primeiramente, será discutido o cenário de ano habitual e apresentadas as condições de poropressão inicial e final do cenário. Em seguida, será analisado a variação ao longo do tempo da poropressão para pontos

específicos no talude. E por fim, será apresentado e discutido a evolução dos parâmetros de desempenho do talude ao longo do tempo.

### 5.3.1 Cenário de ano habitual

O principal objetivo do cenário de ano habitual é fornecer, a partir de sua condição final de poropressão de água, uma condição inicial para o cenário de ano excepcional chuvoso. A condição de poropressão é considerada válida quando, no final da aplicação do ano habitual, a variação da quantidade de água no interior do talude é mínima em relação à condição inicial.

A Figura 5.12 apresenta a variação do volume de água para o talude hipotético “A” considerando como condição inicial uma distribuição hidrostática de poropressão e adotando -20 kPa como poropressão mínima no início da análise (Figura 5.11). Como o volume de água final foi próximo do valor inicial, este cenário foi considerado válido e a condição final de poropressão de água, apresentado na Figura 5.11, foi adotada como condição inicial para o cenário de ano excepcional chuvoso. Para o talude hipotético “B” também foi adotada como condição inicial a distribuição de poropressão mostrada na Figura 5.11 B).

A grande importância do cenário de ano habitual é justamente fornecer uma condição inicial para o cenário de ano excepcional chuvoso que represente, segundo a análise numérica, uma condição possível e produto de uma avaliação transiente.

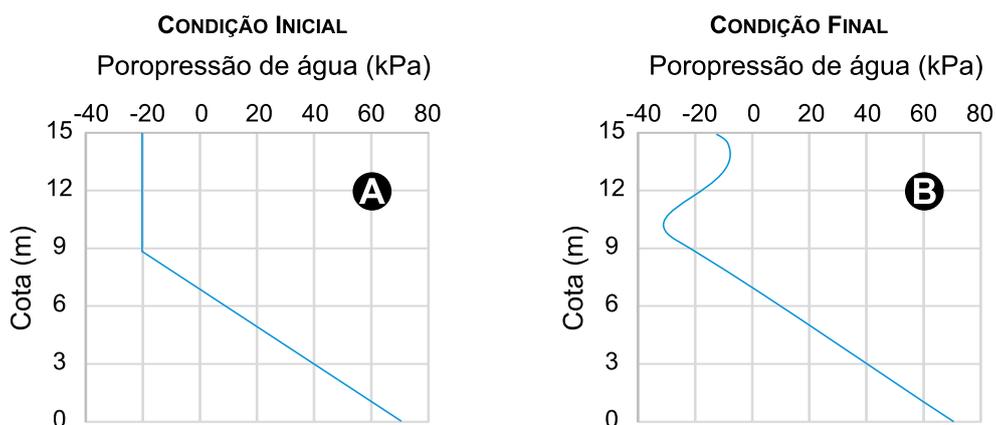


Figura 5.11: A) Condição de poropressão inicial segundo o eixo vertical central do talude hipotético; B) Condição de poropressão inicial segundo o eixo vertical central do talude hipotético.

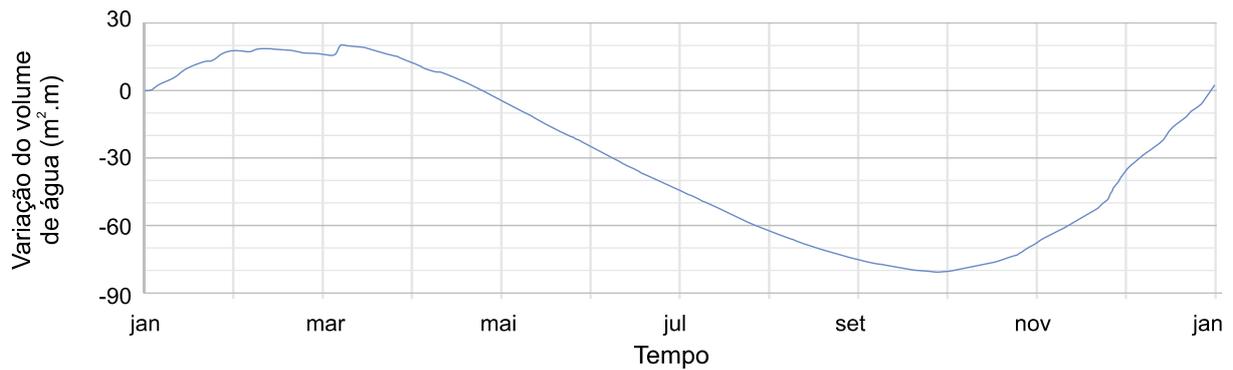


Figura 5.12: Variação do volume de água no cenário de ano habitual.

### 5.3.2 Variação rítmica da sucção para pontos específicos nos taludes

A variação rítmica da sucção foi avaliada para pontos específicos no talude hipotético “A” considerando os parâmetros médios e as variações dos parâmetros considerados incertos segundo o valor do desvio padrão. A Figura 5.13 mostra os três pontos selecionados: “topo”, “centro”, e “pé”. Os resultados de sucção obtidos na análise de fluxo são apresentados na Figura 5.14.

No “topo” ocorrem as maiores variações de sucção, que vão de valores próximos de 1 kPa até quase 100000 kPa. A consideração de um solo mais permeável ( $uw[k_{sat} + \sigma]$ ) aumenta a sucção no período chuvoso e diminui a sucção no período seco. A consideração de um solo menos permeável ( $uw[k_{sat} - \sigma]$ ) tem efeito contrário na variação de sucção em relação ao solo com os parâmetros médios ( $uw[E(x)]$ ): ela diminui no período chuvoso e aumenta no período seco.

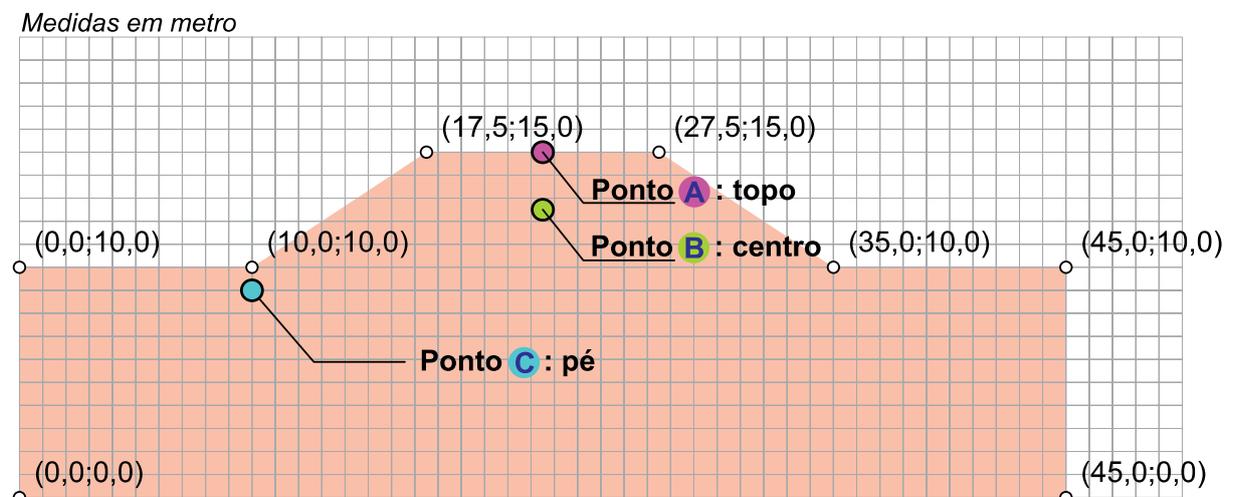


Figura 5.13: Pontos no talude para avaliação de sucção.

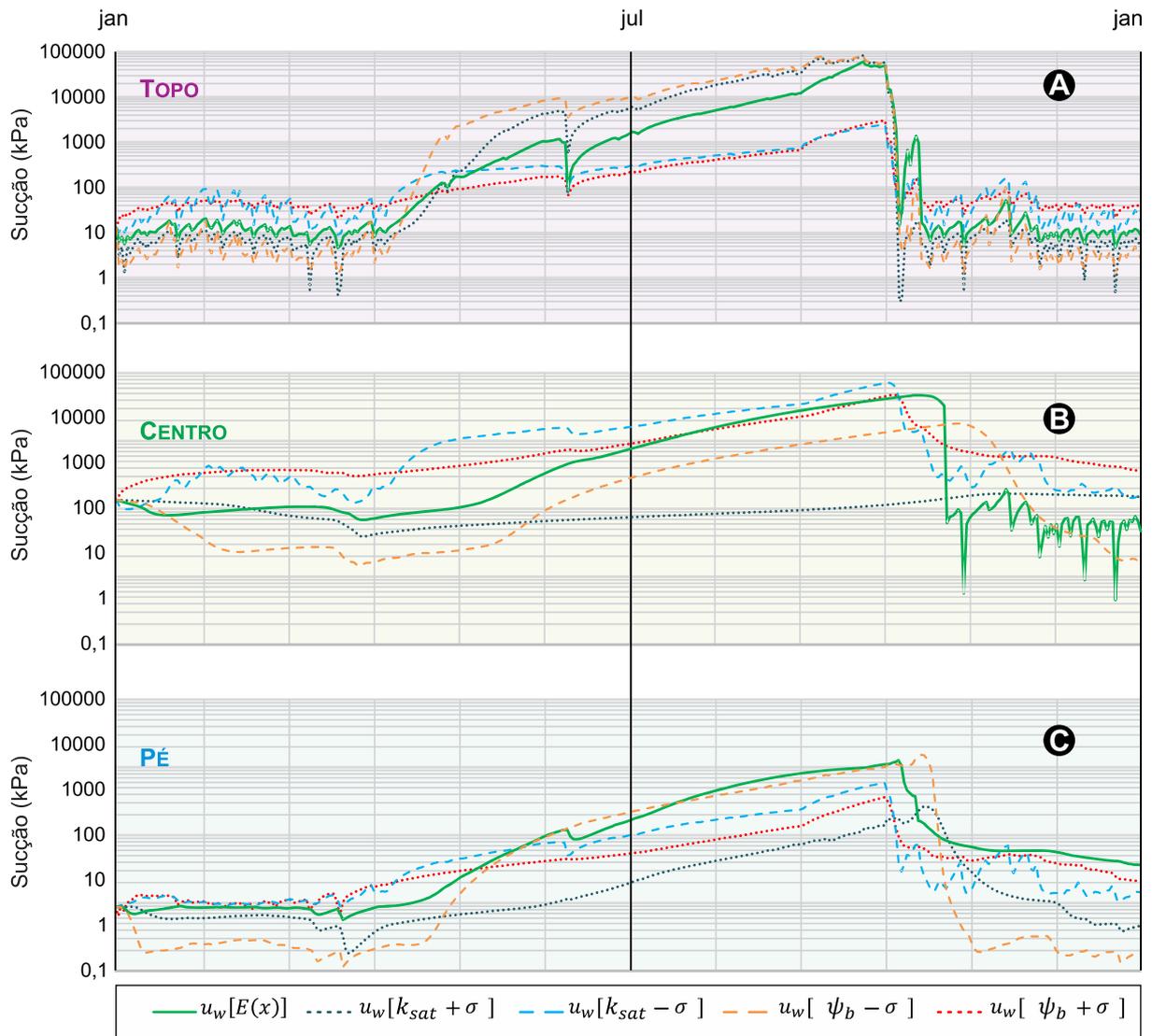


Figura 5.14: A) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “topo” do talude hipotético “A”; B) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “centro” do talude hipotético “A”, C) Variação rítmica da poropressão ao longo do tempo no “pé” do talude hipotético “A”.

Ou seja, quanto menor for o valor da condutividade hidráulica, menor será a quantidade de água que vai infiltrar e menor a quantidade que irá sair do solo pelo processo da evapotranspiração; e a amplitude da variação de água será menor para os solos menos permeáveis. Esta maior rigidez da variação de sucção pela diminuição da condutividade hidráulica pode ser também observada no “centro” onde a adoção de um solo menos permeável minimizou a variação de sucção, que ficou durante todo ano com um valor quase constante, próximo de 100 kPa. No “topo”, a variação do primeiro valor de entrada de ar tem efeito semelhante à variação da permeabilidade. Considerando um menor primeiro valor de entrada de ar ( $u_w[\psi_{b_1} - \sigma]$ ), a sucção

diminui no período chuvoso e aumenta no período seco. Um maior valor de entrada de ar ( $uw[\psi_{b_1} + \sigma]$ ), aumenta a sucção no período chuvoso e diminui no seco.

### 5.3.3 Evolução dos parâmetros de desempenho e da superfície crítica

A seguir são apresentadas as evoluções dos parâmetros e da superfície crítica ao longo do tempo considerando os cenários de ano excepcional chuvoso e de chuva máxima. O método probabilístico FOSM será considerado no cálculo da probabilidade de ruptura e do fator de contribuição que cada variável considerada incerta tem para o resultado do fator de segurança. Este último corresponde ao quanto cada variável contribui para o desvio padrão da distribuição probabilística do fator de segurança.

#### 5.3.3.1 Cenários de ano excepcional chuvoso

No cenário de ano excepcional chuvoso é investigado o ritmo dos parâmetros de desempenho ao longo do tempo. Será inicialmente discutido a influência dos parâmetros considerados incertos no cálculo do fator de segurança dos taludes e, por fim, serão apresentados o ritmo, ao longo do tempo, da probabilidade de ruptura e do fator de contribuição com lições para a prática geotécnica.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 apresentam a evolução dos fatores de segurança considerando as variações dos parâmetros do solo adotados como incertos, para os taludes “A” e “B”, respectivamente. De forma geral, a contribuição dos parâmetros de resistência no fator de segurança é óbvia, sendo que quanto maior a coesão ou o ângulo de atrito, maior será o fator de segurança. Para os dois taludes, os resultados apresentados mostram ainda que os valores dos fatores de segurança são mais sensíveis à variação do ângulo de atrito do que à variação da coesão.

A contribuição dos parâmetros hidráulicos, avaliada segundo a variação dos parâmetros para mais ou menos um desvio padrão, é mais complexa do que a dos parâmetros de resistência e estão diretamente relacionadas com as variações de poropressão de água observadas na Figura 5.14. A consideração de um solo menos permeável ( $F_S[k_{sat} - \sigma]$ ) dificulta a infiltração de água no período chuvoso e permite que maiores valores de fator de segurança sejam alcançados. Porém, no período seco a baixa permeabilidade dificulta a saída de água pela evapotranspiração e, conseqüentemente, dificulta a mobilização da resistência ao cisalhamento pelo ganho

de sucção do solo, impedindo que o fator de segurança alcance os valores observados pela consideração dos parâmetros médios ( $F_S[E(x)]$ ).

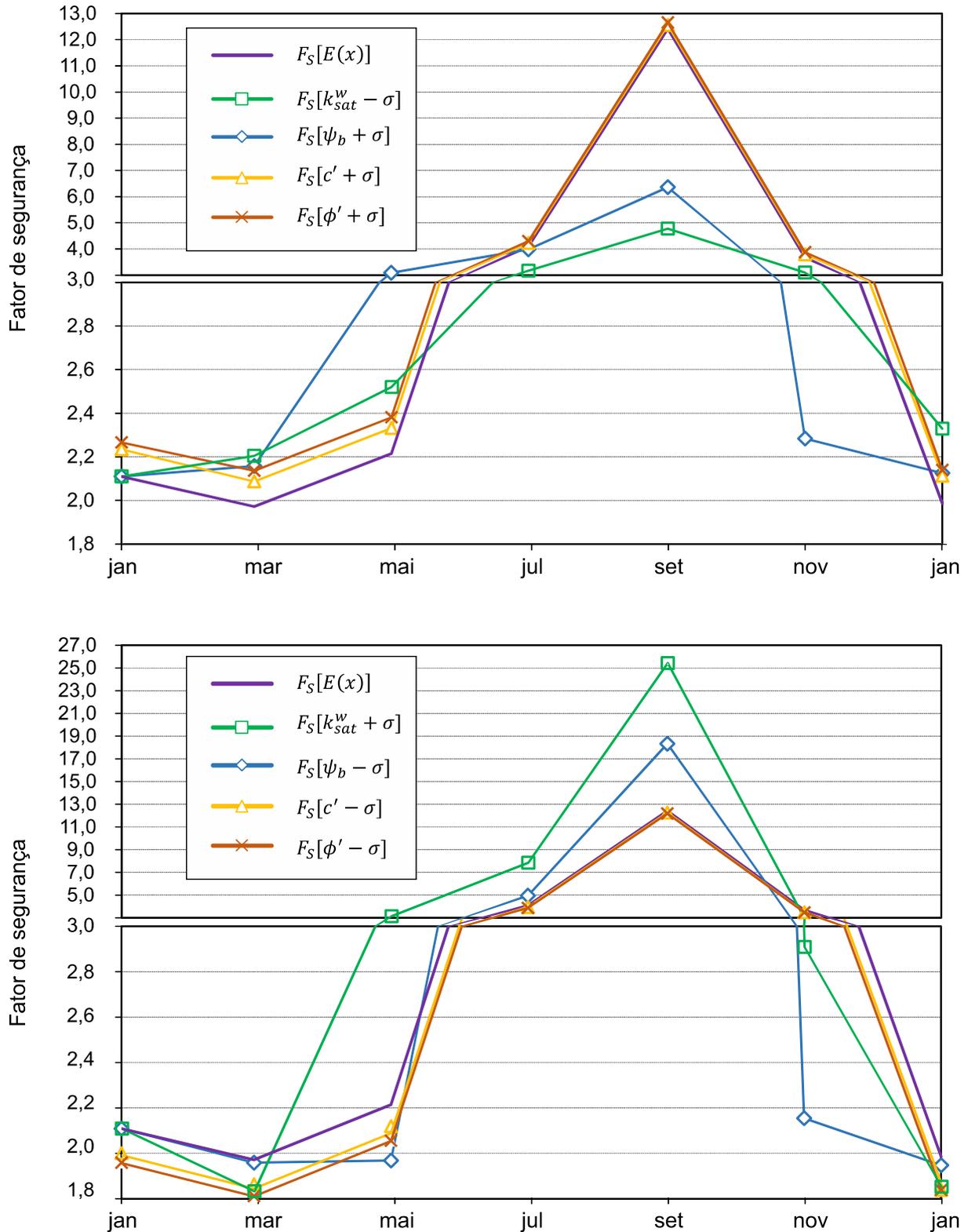


Figura 5.15: Fatores de segurança para diversas configurações do solo - talude hipotético "A"

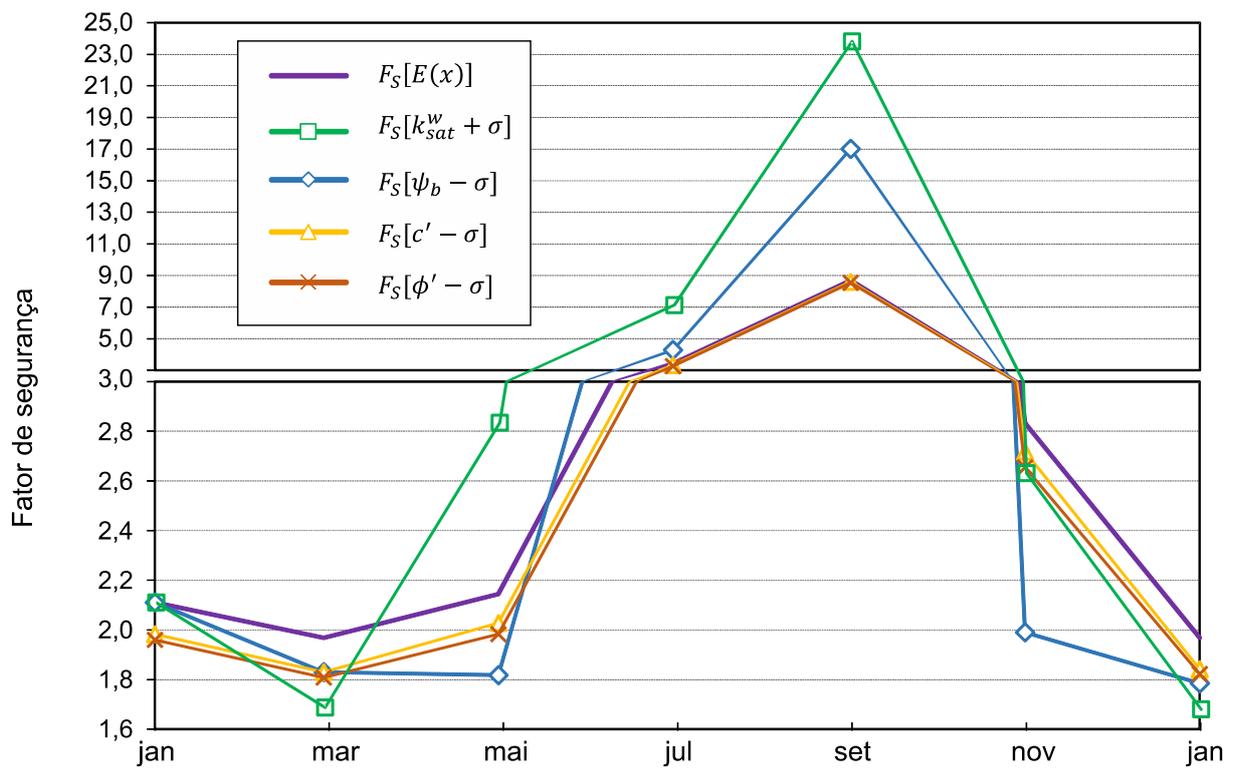
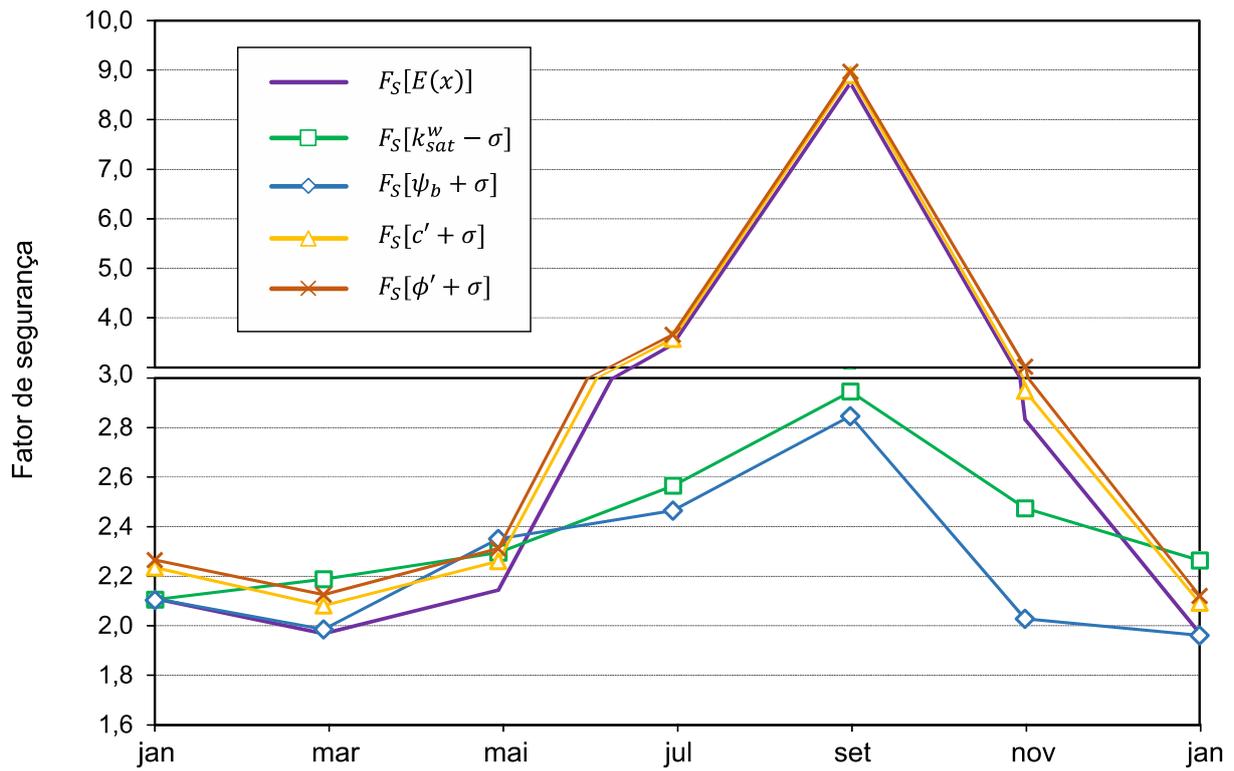


Figura 5.16: Fatores de segurança para diversas configurações do solo - talude hipotético "B"

O acréscimo no primeiro valor de entrada de ar ( $F_S[\psi_{b_1} + \sigma]$ ) tem resultados semelhantes ao decréscimo de condutividade hidráulica ( $F_S[k_{sat} - \sigma]$ ): aumenta os valores de fator de segurança no período chuvoso e diminui os valores no período seco, em relação à média ( $F_S[E(x)]$ ).

Comparando os resultados do talude hipotético “A” (Figura 5.15) e os resultados do talude hipotético “B” (Figura 5.16), observa-se que a maior variação do nível do lençol freático no “A” permite que na média ( $F_S[E(x)]$ ) maiores valores de fator de segurança sejam alcançados. Porém, quando se compara as contribuições dos parâmetros hidráulicos, verifica-se que a porcentagem de variação do fator de contribuição no período seco, especialmente em setembro, é maior no talude hipotético “B”. O máximo valor do fator de segurança do talude hipotético “B” passa de 9,0 para mais de 23,0 considerando, por exemplo, um solo menos permeável.

A Figura 5.17 e a Figura 5.18 apresentam a evolução dos parâmetros de desempenho ao longo do tempo para os taludes hipotéticos “A” e “B”, respectivamente. Na formatação da evolução do fator de segurança são também apresentados os valores de 10º e 90º percentil, correspondentes à uma curva de ajuste de distribuição probabilística log-normal. São ainda mostrados nas figuras a probabilidade de ruptura (calculada como sendo, percentualmente, a área da distribuição probabilística abaixo do valor de fator de segurança igual a 1,0) e o fator de contribuição dos parâmetros considerados incertos na distribuição probabilística do valor do fator de segurança. Para os dois taludes hipotéticos, o valor do fator de segurança, inicialmente, diminui com a imposição do período chuvoso e, em seguida, aumenta de forma considerável devido ao aumento da resistência ao cisalhamento do solo pelo ganho de sucção no período seco. Finalmente, com a volta da estação chuvosa, o fator de segurança diminui, de forma mais intensa entre setembro e novembro, se aproximando dos valores iniciais.

É importante também observar a evolução da dispersão da distribuição probabilística do fator de segurança, indicada na figura pela diferença entre o 90º e 10º percentil. Ao longo do tempo o desvio padrão aumenta, alcançando o valor máximo em setembro e, em seguida, diminui com o início das chuvas. Em relação aos dois taludes, inicialmente, o talude “A” possui menores valores de dispersão da distribuição

probabilística do fator de segurança, mas, com a evolução da estação seca, o talude “B” passa a apresentar maiores valores.

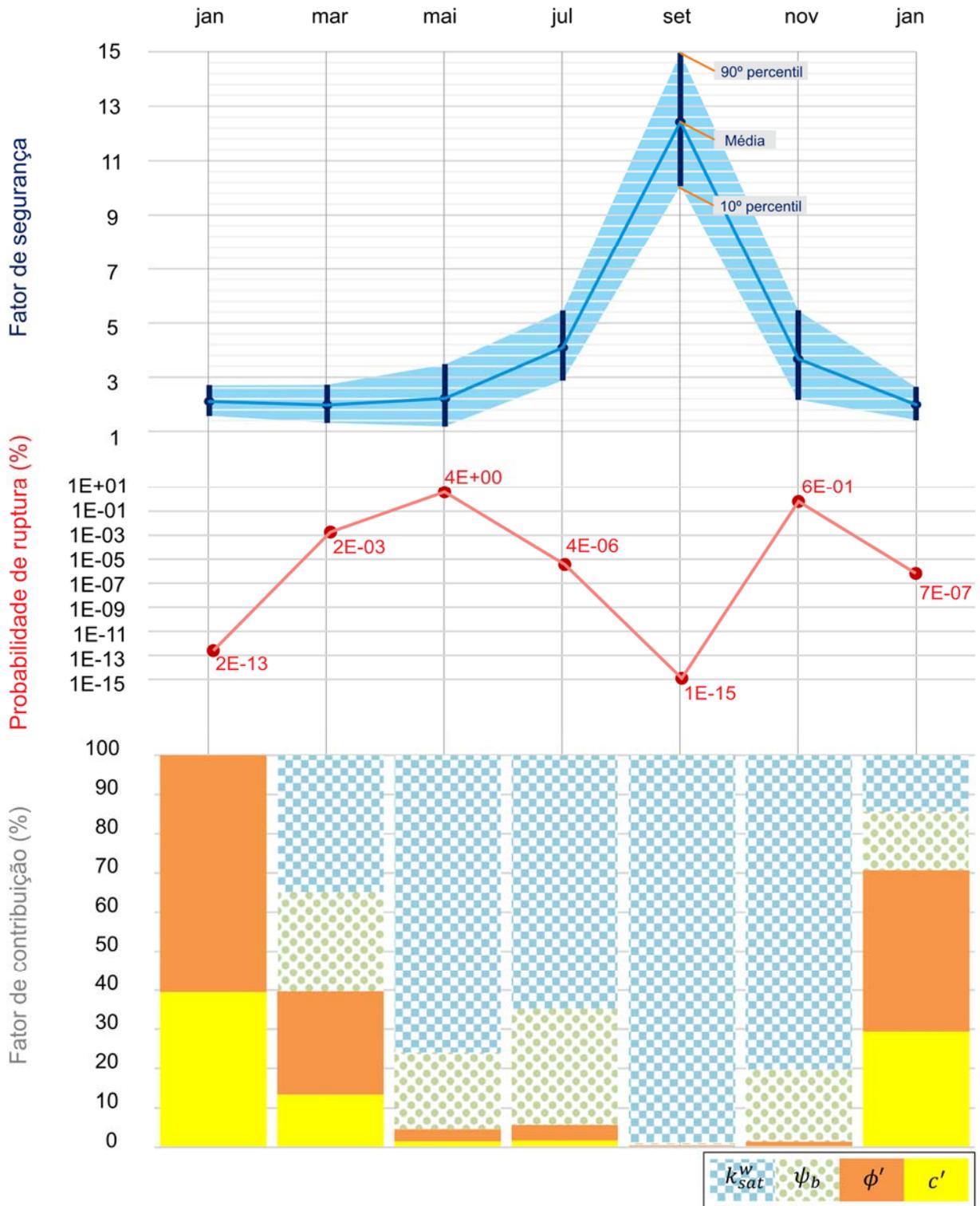


Figura 5.17: Fatores de desempenho ao longo de um ano para o talude hipotético “A”.

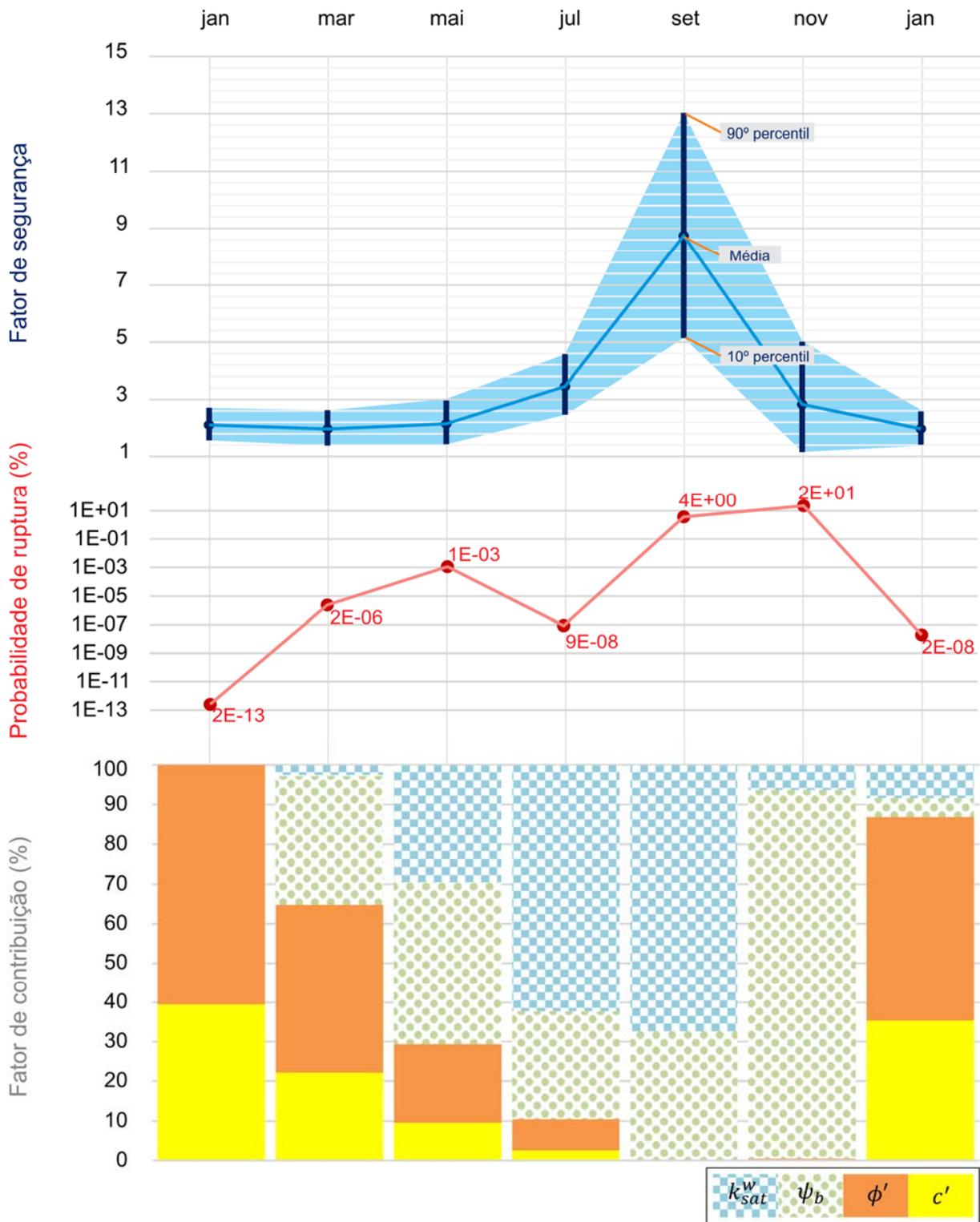


Figura 5.18: Fatores de desempenho ao longo de um ano para o talude hipotético “B”.

A evolução da probabilidade de ruptura depende, diretamente, da distribuição probabilística do fator de segurança. A probabilidade inicial dos dois taludes analisados é de  $2 \times 10^{-13}\%$  e tende a aumentar com o passar do tempo. Porém, no talude hipotético “A” o alto valor do fator de segurança médio diminui bastante a sua

correspondente probabilidade de ruptura; fato que não é observado no talude hipotético “B”, que devido ao menor fator de segurança e maior desvio padrão alcançados, tem como resultado um alto valor de probabilidade de ruptura. Em novembro, a volta da estação chuvosa e o nível d’água mais superficial para o talude hipotético “B” favorecem para o aumento da sua probabilidade de ruptura que, inclusive, é a máxima probabilidade de ruptura observada para os dois taludes (20%).

Os resultados de fator de contribuição mostram que entre os parâmetros de resistência, o ângulo de atrito é o que mais contribui para o fator de segurança. A contribuição dos parâmetros de resistência tende a ser mais baixa no período seco, quando a contribuição dos parâmetros hidráulicos aumenta, e a distribuição de poropressão de água se distancia da condição inicial. No período final, quando a distribuição de poropressão de água se aproxima da condição inicial, pela aplicação da abordagem rítmica, a contribuição dos parâmetros de resistência volta a aumentar. Observa-se, ainda, que a contribuição da condutividade hidráulica é maior (e a contribuição do valor de entrada de ar é menor) no talude “A” do que no talude “B” o que pode ser sugerido pelo maior caminho percorrido pela água até o nível do lençol freático no talude “A”.

O aumento dos fatores de contribuição dos parâmetros hidráulicos colaboram, diretamente, com o aumento dos desvios padrão das distribuições probabilísticas dos fatores de segurança observados. Os aumentos citados estão, por sua vez, relacionados com a variação do conteúdo de água no interior do solo em relação ao conteúdo inicial. Na análise numérica, quanto mais o conteúdo de água se distancia do conteúdo de água inicial, maior a imprevisibilidade da distribuição de umidade ao longo do perfil de solo (pela incerteza dos parâmetros hidráulicos) e maior a incerteza do fator de segurança. Em casos práticos, para evitar o aumento exagerado do desvio padrão pela contribuição dos parâmetros hidráulicos, recomenda-se que seja inserido na análise uma condição inicial atualizada segundo o monitoramento de umidade (ou sucção) em campo, quando for conveniente. Desta forma a contribuição dos parâmetros hidráulicos será zerada.

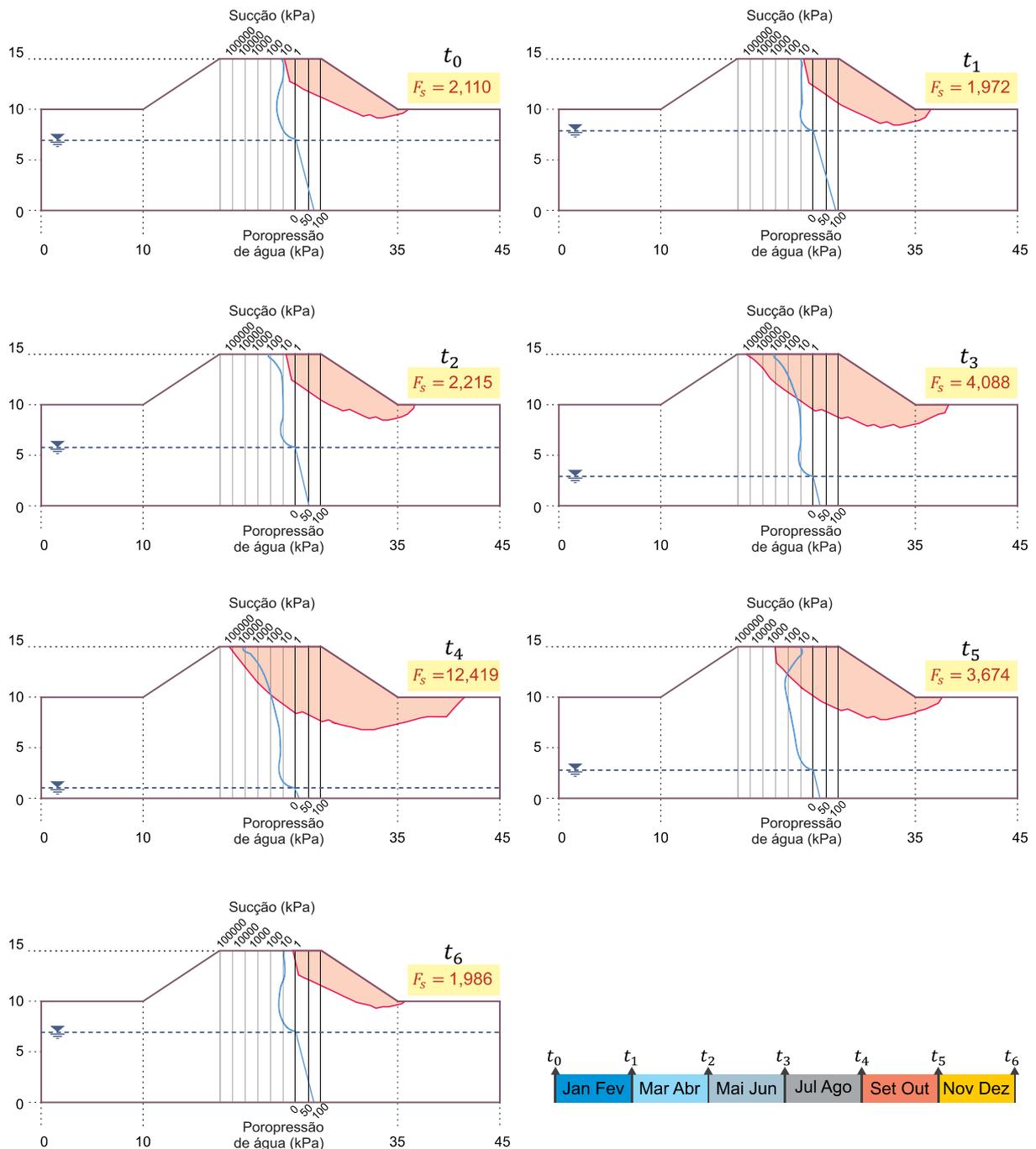


Figura 5.19: Evolução da superfície crítica e da distribuição de poropressão para o talude hipotético “A”.

A Figura 5.19 apresenta a evolução das superfícies críticas para o talude hipotético “A” fornecidos pelo programa Safe-DP e seus respectivos fatores de segurança médios. Na figura são também mostradas a evolução da distribuição de poropressão de água utilizando como referência o eixo vertical no centro do talude. Os resultados são apresentados para sete tempos ao longo do ano:  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$  e  $t_6$ . Para o tempo inicial ( $t_0$ ) o valor do fator de segurança é de 2,110 e a distribuição de

poropressão é proveniente do cenário de ano habitual. A superfície crítica (e, conseqüente, a profundidade que ela alcança) aumenta até  $t_4$  (entre os meses de agosto e setembro) e depois diminui, sendo coerente com a evolução da distribuição de poropressão de água. No tempo  $t_4$  é observado o maior valor do fator de segurança (12,419) e os maiores valores de sucção ao longo da profundidade. Neste tempo, a profundidade do nível do lençol freático é próximo do máximo valor imposto pela função do nível d'água. Ainda no tempo  $t_4$ , a superfície crítica pode ser considerada fictícia pois corresponde a um baixíssimo valor de probabilidade de 1E-15% (Figura 5.17) e a ruptura, se acontecer, provavelmente será mais superficial visto que para as maiores a profundidade a variação de sucção é menor e mais lenta. A aplicação de uma chuva intensa, por exemplo, pode rapidamente variar a distribuição de poropressão de água no trecho mais superficial do talude diminuindo o valor do fator de segurança e a profundidade da superfície crítica.

Na Figura 5.19 é interessante também observar a manutenção de valores próximos de 10 kPa de sucção, logo acima do lençol freático, no período de estiagem. Valores próximos de 10 kPa também são notados próximos da fronteira solo-atmosfera nos tempos  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_5$  e  $t_6$ , que correspondem aos tempos característicos de molhagem.

### 5.3.3.2 Cenários de chuvas máximas

A evolução dos parâmetros de desempenho foi também avaliada segundo os cenários de chuvas máximas de curta e de longa duração considerando as curvas IDF apresentadas na Seção 5.2.3. A Figura 5.20 apresenta os resultados para o talude hipotético "A" considerando como condição inicial o tempo  $t_1$  (Figura 5.19) que possui o menor fator de segurança para os tempos analisados no cenário de ano excepcional chuvoso. Foram considerados quatro tempos para as análises.

Considerando a chuva de curta duração, poucas alterações são observadas nos parâmetros de desempenho. Mesmo com o alto volume de água correspondente à chuva máxima, o volume ainda é baixo quando se compara com o volume total de solo do talude. O valor de condutividade hidráulica adotado para os taludes hipotéticos (1,5E-6 m/s) também colabora para que a variação da distribuição de poropressão seja lenta, e para que parte da chuva seja considerada como escoamento superficial.

No cenário de chuva máxima de longa duração, as mudanças foram mais acentuadas. O valor médio do fator de segurança passa de 1,972 para 1,535 com a aplicação da chuva máxima (de  $t_0$  a  $t_2$ ) e continua caindo mesmo com o fim da aplicação da chuva. No tempo  $t_3$  o valor do fator de segurança é de 1,040. A probabilidade de ruptura do talude aumenta com o decréscimo do valor médio do fator de segurança e com o aumento do desvio padrão da distribuição probabilística do mesmo, alcançado um valor final próximo de 50%. Este aumento do desvio padrão está diretamente relacionado com o aumento do fator de contribuição dos parâmetros hidráulicos.

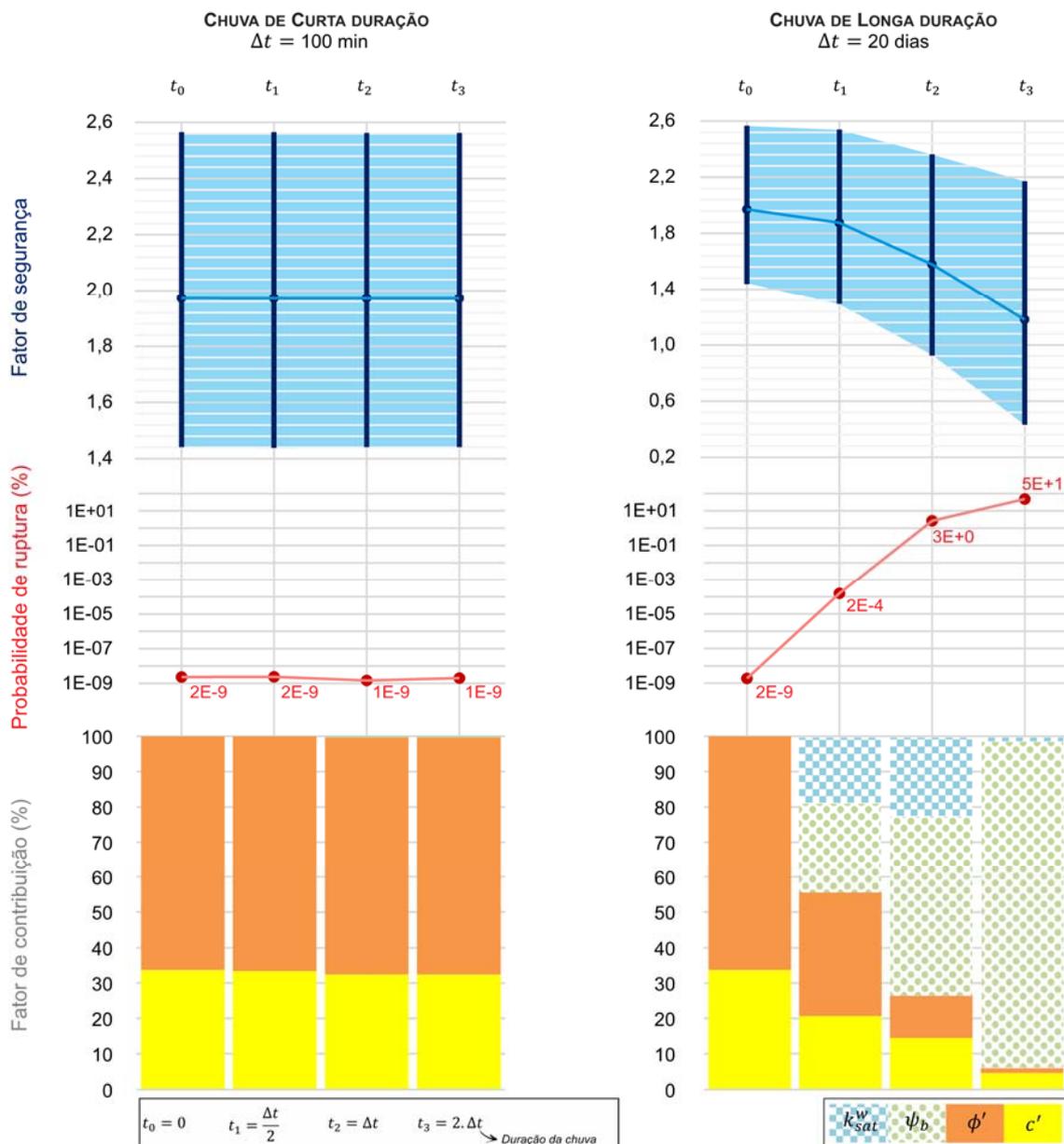


Figura 5.20: Fatores de desempenho ao longo dos cenários de chuvas máximas (talude hipotético "A").

No tempo  $t_3$ , o parâmetro que possui o maior fator de contribuição é o primeiro valor de entrada de ar. Os fatores de contribuição para os parâmetros de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ) diminuem ao longo do tempo e somados variam de 100% para menos que 10%. Observa-se também que após o tempo  $t_2$ , mesmo com o fim da aplicação da chuva e com o volume de água no interior do solo permanecendo inalterado, o decréscimo do valor do fator de segurança médio é significativo. Tal observação mostra que, além da quantidade de água total no interior do talude ser determinante para a definição dos parâmetros de desempenho, a forma como a essa água se distribui nos vazios do solo é também muito importante na análise de desempenho.

Como fundamento para a construção das curvas IDF, cada curva apresenta um cenário de chuvas máximas com alta probabilidade de acontecer segundo o tempo de retorno adotado. Na presente aplicação, a chuva máxima foi considerada como um evento certo (i.e. com a probabilidade de 100% de acontecer). Para considerar a probabilidade do talude romper no primeiro ano com a aplicação de uma chuva máxima com tempo de retorno de 100 anos, o valor da probabilidade de ruptura deve ser multiplicado pela frequência anual do evento ( $1/TR = 0,01$ ), conforme discutido na apresentação da Equação 2.4. Obviamente a mesma metodologia pode ser adotada na consideração do cenário de ano excepcional chuvoso que possui 25% de chances de acontecer segundo a caracterização climática apresentada na Seção 3.4.2.

## **5.4 ABORDAGEM RÍTMICA PROBABILÍSTICA NA PRÁTICA GEOTÉCNICA**

No presente capítulo foram analisados dois taludes hipotéticos possuindo diferentes condições de variação de nível d'água, porém, com fatores de segurança críticos (mínimos) semelhantes. A análise dos taludes foi focada na avaliação rítmica da distribuição probabilística do fator de segurança e da probabilidade de ruptura e a síntese de sua aplicação na prática geotécnica é apresentado na Figura 5.21. O presente trabalho focou nas definições dos perfis tropicais climático e do solo para uma região de Aparecida de Goiânia (GO) e na sua aplicação em análises de fluxo e estabilidade de taludes. A metodologia desenvolvida se relaciona diretamente com a análise de projetos e gerenciamento de riscos de obras geotécnicas.

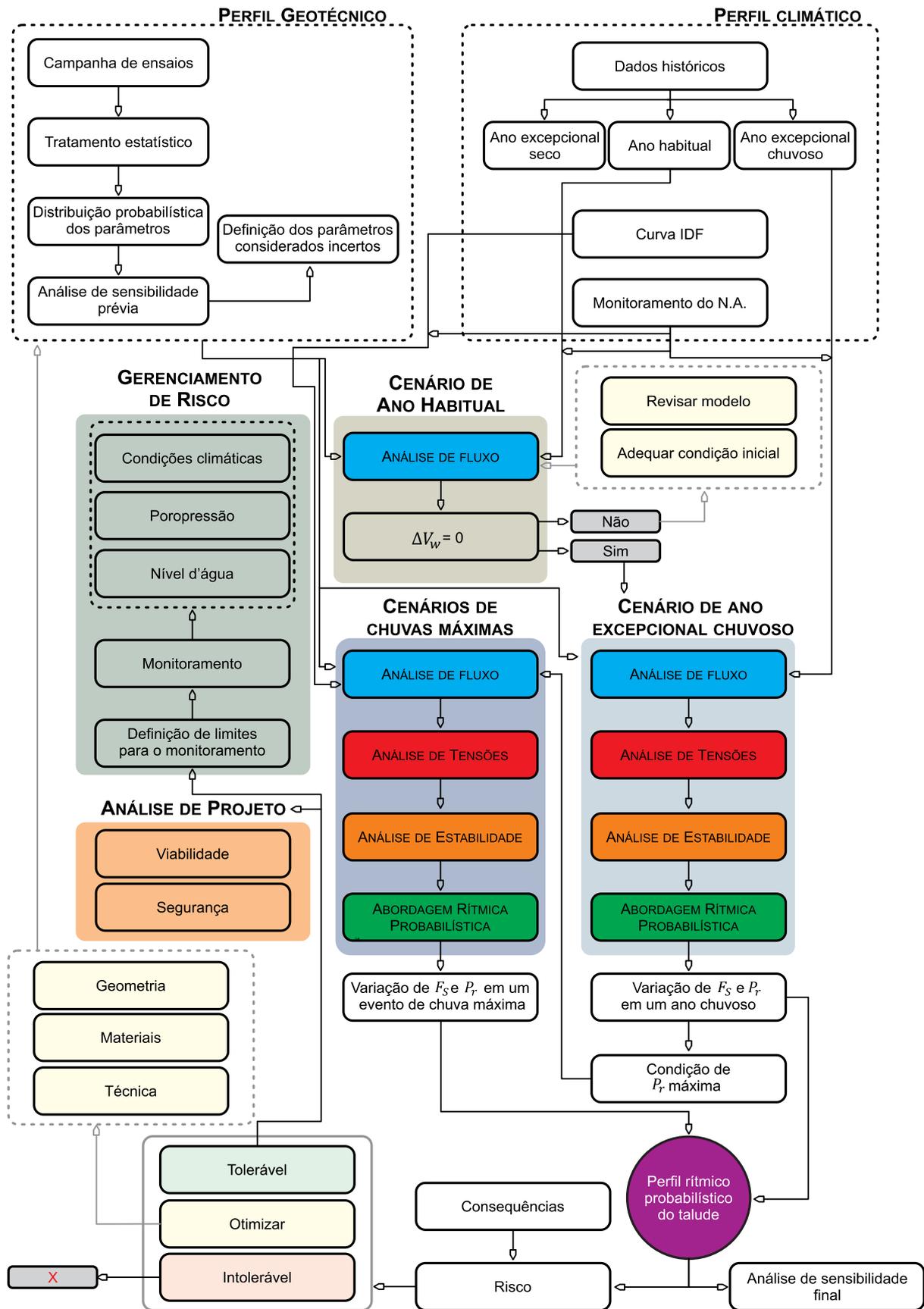


Figura 5.21: Abordagem rítmica probabilística na prática de avaliação de taludes de terra.

É importante frisar que na avaliação realizada neste capítulo a diferença entre os taludes (variação do nível d'água) foi responsável pelas diferentes evoluções dos parâmetros de desempenho, mas que, na prática, as evoluções podem ser muito mais complexas pelas considerações de diferentes condições de contorno, condições de bacia hidrográfica, geometria e parâmetros do solo.

No entanto, também para os casos práticos, o modelo proposto pode ser desenvolvido e resultar em um conjunto de informações que são de interesse para os tomadores de decisão. De fato, os tomadores de decisão que atuam na Geotecnia devem priorizar a análise de informações sólidas, probabilísticas e evolutivas evitando, assim, que a utilização de um único valor limite entre o que é seguro e o que não é seguro, norteie as decisões.

É relevante também expor a possibilidade de perda da eficiência do modelo de previsão ao longo do tempo. Por exemplo, um fator que interfere minimamente na previsão de uma variável, pode, ao longo do tempo ter uma grande importância no resultado final. No entanto, o maior foco aqui não é a precisão da abordagem rítmica na previsão da distribuição probabilística do fator de segurança ao longo de um ano, mas como esta mesma distribuição evolui ao longo do tempo considerando um conjunto de parâmetros como incertezas.

Diante de tudo que foi apresentado e discutido, a grande lição do modelo proposto e aplicado é indicar um caminho para que, considerando uma abordagem que prioriza não somente os eventos extremos (i.e. eventos relacionados à saturação do solo), os conceitos de Probabilidade e Mecânica dos Solos não Saturados sejam ainda mais incorporados na prática geotécnica.

## 6 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais do trabalho. As principais conclusões sobre o desenvolvimento e aplicação do modelo proposto, de avaliação de fluxo de água no solo e estabilidade de taludes serão expostas e, por fim, serão oferecidas recomendações para trabalhos futuros.

A partir do monitoramento e interpretação das condições atmosféricas do campo experimental, conclui-se que:

- A metodologia proposta para o monitoramento das condições do campo experimental se mostrou adequada, com os métodos sendo em parte complementares;
- A medição de sucção pelo método do papel filtro se mostrou mais eficiente para as maiores profundidades visto que, o tempo de equilíbrio necessário para sua aplicação, não foi suficiente para acompanhar os processos transientes ocorridos no interior dos trechos de solo relativamente mais rasos, resultantes das condições atmosféricas;
- A utilização de um papel de contraprova na aplicação do método do papel filtro foi importante como controle de qualidade das medições de sucção;
- As variações temporais das condições de umidade e sucção do solo foram coerentes entre si e em relação às condições atmosféricas monitoradas;
- Na variação interanual do nível d'água foi observado um comportamento rítmico semelhante e níveis d'água máximo e mínimo interanuais próximos;
- Foi observado que o conceito de "zona ativa" se torna de mais difícil aplicação quando se tem um perfil como o estudado, caracterizado por elevada flutuação do nível d'água. Tem-se uma zona superficial, considerada ativa, sendo influenciada pelas condições atmosféricas. Além disso, tem-se uma zona mais profunda que também apresenta significativa variação de umidade e sucção, neste caso como resultado direto das variações de nível d'água;

Sobre a aplicação de dados climatológicos na prática geotécnica, conclui-se que:

- Com base nos resultados das análises dos taludes hipotéticos, a classificação dos anos chuvosos em ano habitual, ano excepcional chuvoso e ano excepcional seco se mostrou relevante na tentativa de compreender a relação

entre o solo e o clima, e na definição de uma metodologia de avaliação de taludes ao longo do tempo;

- Considerando as chuvas com duração real, distribuição acumulada diária, e distribuição acumulada mensal nas análises de fluxo, quanto maior o tempo da distribuição de chuva (duração real, diário, mensal), maior o atraso em relação à mobilização de sucções.

Sobre a análise de fluxo considerando o perfil de solo tropical monitorado, conclui-se que:

- O modelo desenvolvido com o auxílio do programa FlexPDE se mostrou robusto e estável, mesmo para complexas condições de contorno atmosféricas, ao longo de extensos períodos de análise;
- O programa FlexPDE se mostrou eficiente para a solução de problemas de fluxo principalmente pelos recursos oferecidos que evitam as descontinuidades observadas nos dados experimentais;
- A equação de ajuste bimodal da curva característica solo-água proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) foi eficiente tanto para os ajustes de curvas bimodais como unimodais;
- Os resultados da comparação do desenvolvimento de sucção e volume de água previstos com os dados experimentais foram bem satisfatórios visto a grande dificuldade de uma análise transiente de longa duração;
- A consideração do fluxo basal na análise numérica do perfil é fundamental para a correta previsão das flutuações de sucção e umidade, particularmente para as camadas mais profundas;
- As análises de fluxo forneceram balanços de água coerentes com os fundamentos hidrológicos, e variações de umidade e sucção bem definidas para os períodos interanuais;
- A importância das incertezas das variáveis de fluxo na previsão de sucção tendem a crescer para quanto mais a análise se distancia da condição inicial.

Sobre a aplicação da abordagem rítmica probabilística na análise de estabilidade de taludes, conclui-se que:

- Considerando a dificuldade relacionada com a escolha de uma condição inicial para análises de fluxo, o cenário de ano habitual se mostrou importante por fornecer uma condição inicial matematicamente válida para o cenário de ano excepcional chuvoso e investigar a variação do conteúdo de água ao longo de um ano;
- A amplitude de variação de umidade é menor para solos menos permeáveis e, conseqüentemente, a variação de sucção também é menor;
- Os fatores de contribuição dos parâmetros hidráulicos tendem a ser maiores quanto mais o volume de água no interior do talude se distancia da condição inicial;
- A chuva de curta duração pouco alterou os parâmetros de desempenho dos taludes hipotéticos;
- O cenário de chuva máxima de longa duração resultou em acentuadas mudanças nos parâmetros de desempenho favorecendo para o aumento expressivo da probabilidade de ruptura do talude.

## **6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

São recomendações para trabalhos futuros:

- Aplicar o método do papel filtro para o monitoramento de outros perfis de solo e otimizar a sua metodologia.
- Considerar a influência dos perfis probabilísticos de poropressão na avaliação de outras práticas geotécnicas como fundações, contenções e barragens.
- Utilizar a abordagem rítmica probabilística proposta na avaliação de taludes com diferentes materiais e geometrias.
- Investigar a relação entre a duração das chuvas longas e a probabilidade de ruptura.
- Desenvolver um programa de monitoramento baseado nos limites indicados pela aplicação do modelo proposto e acompanhamento do nível d'água e dados atmosféricos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M.G. & KEMP, M.J. (1998). Application of soil water finite difference models to slope stability problems. **V International Symposium on Landslides**, Balkema, Roterdã, Holanda, 1: 525-531.
- AHRENS, D.C. (2009). **Meteorology Today: An introduction to Weather, Climate, and the Environment**. 9ª ed. Brooks/Cole, Belmont, USA, 549 p.
- ALMEIDA, M.C.J., NAKAZAWA, V.A., & TATIZANA, C. (1993). Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos no Município de Petrópolis, RJ. **VII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. Poços de Caldas, MG. 129-137.
- APPLIED DECISION ANALYSIS LLC. (1998). **DPL 4.0 – Professional Decision Analysis Software – Academic Edition**. Price Water House Coopers. Pacific Grove, EUA, 682p.
- ARAKI, R. (2007). **Vulnerabilidade associada a precipitações e fatores antropogênicos no município de Guarujá (SP) - Período de 1965 a 2001**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 201 p.
- ARISTIZÁBAL, E., GAMBOA, M.Y. & LEOZ, F. (2010). **Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá**, Revista EIA, Colômbia. 13: 155-169.
- ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G., SILVA, P.D.E.A. & MAIA, J. A. (2012). **Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia**. Publicação G.AP-002/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 278 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. São Paulo, SP, 13 p.
- AZEVEDO, G.F. (2011). **Análise da relação chuva-escorregamentos em regiões tropicais montanhosas urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 120 p.
- AZEVEDO, G.F., CARVAJAL, H. E.M. & SOUZA, N. M. (2013). Uso do Método FOSM para Quantificação do Perigo Associado a Deslizamentos Deflagrados por Chuvas no Distrito Federal. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 490-497.
- BAECHER, G.B. & CHRISTIAN, J.T. (2003). **Reliability and statistics in geotechnical engineering**. John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA, 605 p.
- BAKER, R. (1980). Determination of the critical slip surface in slope stability computations. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 4: 333-359.
- BARALHO, F.D., FORMIGA, K.T.M. & TEIXEIRA, M.M. Comparação entre três técnicas de interpolação no cálculo da chuva média de eventos extremos. (2011). **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió, AL, 1: 1-18.

- BENSON, C.H., DANIEL, D.E., & BOUTWELL, G.P. (1999). **Field performance of compacted clay liners**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125(5): 390-403.
- BISHOP, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Geotechnique**, 5: 7-17.
- BOGAARD, T.A. & ASCH T.W.J. (2002). The role of the soil moisture balance in the unsaturated zone on movement and stability of the Beline landslide, France. **Earth Surface Processes and Landforms**, 27: 1177-1188.
- BORGES, C.R. (2010). **Comportamento hidro-mecânico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia-GO**. Dissertação de Mestrado, GECON, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 257 p.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. **Hydrology**. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA, (3): 1-27.
- BUCKINGHAM, E. (1907). Studies of the movement of soil moisture. **U.S.D.A. Bur. Soils Bull**, (38).
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2013). Aspectos peculiares susceptíveis de instabilizarem as encostas. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 21-29.
- CARDENAS, J.C.R., CUNHA, R.P & MASÍN, D. (2013). Influência da chuva nos deslocamentos de cortinas tipo estacas justapostas assentes em solos metaestáveis. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 59-65.
- CARDOSO, R. (2014). Influência das ações atmosféricas na funcionalidade de Estruturas Geotécnicas. **Geotecnia**, (30) 3-32.
- CARVALHO, C.S., GALVÃO, T. & PARANHOS, R. C. (2013). Política de Prevenção de Desastres Associados a Deslizamentos de Encostas no Brasil. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, p. 97-103.
- CLEMEN, R. T. (1996). **Making Hard Decision**. Duxbury Press, EUA, 664p.
- CHANDLER, R.J., CRILLY, M.S. & MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A Low-cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low rise Buildings. **Institute of Civil Engineering**, 92(2): 82-89.
- COSTA, Y.D. (1999). **Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 131 p.
- CASTRO, J.M.G. (2006). **Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 138p.
- DELMONACO, G., IPPOLITO, F., MARGOTTINI, C. (1995). The CEC Project. Meteorological Factors influencing slope stability and slope movement type: evaluation of hazard prone areas. Proc. **I Review Meeting of Hydrological and Hidrogeological**

**Risks. Brussels**, Official Publications of European Communities. Bruxelas, Bélgica. 259-283.

DUNCAN, M. (2000). **Factors of safety and reliability in geotechnical engineering**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(4): 307-316.

EBRAHIMI, N.B., GITIRANA JR., G.F.N., FREDLUND, D.G., FREDLUND, M.D. & SAMARASEKERA, L. (2004). **A lower limit for the water permeability coefficient**. 57<sup>o</sup> Canadian Geotechnical Conference, Quebec, Canadá. 1: 12-19.

ELBACHÁ, A.T., CAMPOS, L.E.P., BAHIA, R.F.C. (1992). **Tentativa de correlação entre precipitação e deslizamentos na cidade de Salvador**. I Conferência Brasileira sobre estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, RJ, 647-655.

EL-RAMLAY, H. (2001). **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice**. PhD Thesis, Universidade de Alberta, Canadá, 391 p.

FARIAS, M.M. & ASSIS, A.P. (1998). Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes. **XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**. ABMS, Brasília, DF, 2: 1305-1313.

FORMIGA, K.T. M., SEIBT, A.C., DE CASTRO, T.Q. & BERNARDES, R. S. (2012). **A infiltração e o escoamento superficial**. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 101-116.

FREDLUND, D.G. & DAHLMAN, A.E. (1971). Statistical geotechnical properties of glacial lake Edmonton sediments. **I International Conference on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering**, Hong Kong, 204-228.

FREDLUND, D.G. & GITIRANA JR., G.F.N (2005). Unsaturated Soil Mechanics as a Series of Partial Differential Equations. **International Conference on Problematic Soils**, Famagusta, N. Cyprus, 27 p.

FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R. (1978). The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, 15(3): 313-321.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO & H. FREDLUND, M. D. (2012). **Unsaturated soil mechanics**. John Wiley & Sons, Nova Jersey, EUA, 926 p.

FUTAI, M.M., MELO, D.F.M. CARDOSO JR., C.R. & DUENAS, V.Z. (2011). Estabilidade de encostas em condições não-saturadas. **VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Pirenópolis, GO, 2: 77-98.

GEO. (1996). Criteria for issuing an alarm, Internal document. **Geotechnical Engineering Office**, The Hong Kong Government, Hong Kong.

GITIRANA JR., G.F.N. (1999). **Modelagem numérica do comportamento de solos não saturados considerando modelos elásticos e de estados críticos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 126 p.

- GITIRANA JR., G.F.N. (2005). **Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability**. Ph.D. Thesis, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 316 p.
- GITIRANA JR., G.F.N. & FREDLUND, D.G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 130 (2): 209-212.
- GRIFFITHS, D.V. & FENTON, G. A. (2007). **Probabilistic methods in geotechnical engineering**. Springer Wien New York, Itália, 346 p.
- GUIDICINI, G. & IWASA, O.Y. (1976). **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamento em meio tropical úmido**. IPT, São Paulo, SP, 48 p.
- GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M. & STARK, C. P. (2000). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. **Meteorol. Atmos. Phys.**, 98: 239-267.
- HAMDHAN, I.N. & SCHWEIGER H. F. (2011). **Slope Stability analysis of unsaturated soil with fully coupled flow-deformation analysis**. **Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice**. Universidade de Salzburg, Austria, 1133-1150.
- HAMMITT, G.M. (1966). **Statistical analysis of data from a comparative laboratory test program sponsored by ACIL**. U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. 4-785.
- HARR M.E. (1987). **Reliability based design in civil engineering**. McGraw Hill Book Company, Nova Iorque, EUA, 291 p.
- HOUSER, P.R. (2003). Infiltration and soil moisture processes. **Handbook of weather, climate, and water, atmospheric chemistry, hydrology, and societal impacts**. John Wiley e Sons. 493-506.
- HOYO, E.M. (2014). **Influência dos Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 102 p.
- IVERSON, R.M. (2007). Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, 1: 1897-1910.
- KORMANN, A.C.M., SESTREM, L.P. & PRETTO, J.H.F. (2013). Instrumentação de encostas: estudos de caso e técnicas de análise de séries históricas. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 25-40.
- KO, C.K., FLENTJE, P. & CHOWDHURY, R. (2004). Interpretation of probability of landsliding triggered by rainfall. **Landslides**, 1(4): 263-275.
- KRAHN, J. & FREDLUND, D.G. (1983). **Variability in the engineering properties of natural soil deposits**. IV International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, University of Firenze, Itália. 1017-1029.

- KULHAWY, F.H. (1992). **On the evaluation of soil properties**. ASCE Geotech. Special Publication, 31: 95-115.
- LACASSE, S. NADIM, F. (1997). **Uncertainties in characterizing soil properties**. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Noruega, 201: 49-75.
- LIMA, M.C.; SOUZA, N.M.; CAMAPUM de CARVALHO, J. & SANTOS, P.M.J. (2002) Obtenção da curva granulométrica utilizando o granulômetro a laser. **XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, São Paulo, SP, 1: 457-465.
- LUMB, P. (1966). **The variability of natural soils**. Canadian Geotechnical Journal. 3(2): 74-97.
- MALET, J.P.; DURAND Y., REMAÎTRE, A., MAQUAIRE, O., ETCHEVERS, P., GUYOMARCH, G., DÉQUÉ, M., & BEEK; L.P.H. (2007). Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley. **International Conference on Landslides and Climate Change – Challenges and Solutions**, Londres, Inglaterra, 1: 195–205.
- MENDONÇA, M.B. & LUCENA, R. (2013). Atividades socioeducativas para redução de desastres associados a deslizamentos. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 470-476.
- MONTEIRO, C.A.F. (1971). Análise rítmica em climatologia: Problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. **Série Teses e Monografias**. Universidade de São Paulo, SP, 1: 21 p.
- MONTOYA, C.A.H. (2013). **Incertezas, Vulnerabilidade e Avaliação de Risco devido a deslizamentos em estradas**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 250 p.
- MORGENSTERN, N.R. (1995). Managing risk in geotechnical engineering. **X Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos**. Guadalajara, México, 4: 102-126.
- MORGENSTERN, N.R. & PRICE, V.E. (1965). The analysis of the stability of generalised slip surfaces. **Géotechnique**, 15: 79-93.
- NELSON, J.D. & MCWHORTER, D.B. (1985). **Water movement in Design of non-impounding mine waste dumps**. M.K. Carter Ed. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., Nova Iorque, EUA.
- NEWMAN, L.L., HERASYMUIK, G.M., BARBOUR, S.L., FREDLUND, D.G. & SMITH, T. (1997). **The hydrogeology of waste rock dumps and a mechanism for unsaturated preferential flow**. IV International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, Canadá, 2: 553-565.
- NIELSEN, D.R., BIGGAR, J.W., & ERH, K.T. (1973). **Spatial variability of field-measured soil-water properties**. Hilgardia, 42(7): 215-260.
- NUNES, A. L.L.S., SAYÃO, A.S.F.J; RIOS FILHO, M.G. & DIAS, P.H.V. (2013). Desastres e Ações nas Encostas do Rio de Janeiro. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 74-96.

- ORSI, R. N. (2013). Sistema de Alerta de Chuvas Intensas e de Acidentes Geotécnicos em Encostas: a Experiência do Município do Rio de Janeiro. **VI Conferência Brasileira de Encostas**, Angra dos Reis, RJ, 1: 160-176.
- OLIVEIRA, L.F.C., CORTES, F.C., WEHR, T.R., BORGES, L.B., SARMENTO, P.H.L. & GRIEBELER, N.P. (2005). Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 35(1): 13-18.
- PEDROSA, M.G.A. (1994). **Análise de correlações entre pluviometria e escorregamentos de taludes**. Tese de doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 343 p.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A. & SEDIYAMA, G.C. (1997). **Evapo(transpi)ração**. FEALQ, Piracicaba, SP, 183 p.
- PEREIRA, J.H.F. (1996). **Numerical analysis of mechanical behavior of collapsing earth dams during first reservoir filling**. Ph.D. Thesis, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 449 p.
- PHOON, K.K. & KULHAWY, F.H. (1999). **Characterization of geotechnical variability**. Canadian Geotechnical Journal, 36: 612-624.
- PHOON, K.K. (2008). **Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications**. Taylor & Francis, Nova Iorque, USA, 530 p.
- RAHARDJO, H. HONG, T.H., REZAUR, R.B., & LEONG, E. C. (2007). **Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(12): 1532-1543.
- RICHARDS, L.A. (1928). The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. **J. Agriculture**, 37: 719-742.
- RICHARDS, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, 1: 318-333.
- ROCHA, M.F. (2013). **Influência do Perfil de Sucção em Obras de Contenção em Solos Não Saturados**. Dissertação de Mestrado. GECON, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 270 p.
- ROSENBLUETH, E. (1975). Point estimates for probability moments. **Proc. National Academy of Sciences**. 72 (10): 3812-3814.
- ROSENBLUETH, E. (1981). Two-point estimates in probabilities. **Applied Mathematical Modelling**, 5: 329-335.
- ROSENO, J.L. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2007) Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. **Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste**, Cuiabá, MT, 1: 137-147.
- SALAROLI, I.S. (2003). **Movimentos de Massa no Município de Vitória – ES: Inventário, caracterização e indicativos de um modelo comportamental**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 143p.

SAMDAL, U.N, KORTNER, H & GRAMMELTVEDT, J.A. (1992). A user's view on quantification of human reliability. **International Conference on Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process safety**. Orlando, EUA, 281-292.

SANDRONI, S.S. & SAYÃO, A.S.F. (1993). The use of relative probability of failure in the design of open pit mine slopes. **Innovative Mine Design for the 21<sup>st</sup> Century**. Balkema, Rotterdam, Holanda, 1: 21-24.

SCHULTZE, E. (1971). **Frequency distributions and correlations of soil properties**. I International Conference on Applications of Statistics and Probabilistic in Soil and Structure Engineering, Hong Kong. 371-387.

SCOULAR, R.E.G. (1997). **Limit equilibrium slope stability analysis using a stress analysis**. M.Sc. thesis, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.

SILVA JÚNIOR, A.C. (2008). **Avaliação de Sistemas de Cobertura para Disposição de Rejeitos de Mineração**. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 51 p.

SILVA JÚNIOR, A.C. (2011). **Avaliação das flutuações sazonais de umidade e sucção em um perfil de solo tropical**. Dissertação de Mestrado. GECON, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 137 p.

SILVA JÚNIOR, A.C. (2011). Avaliação da medição de sucção de um solo tropical pelo método do papel filtro. **VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Pirenópolis, GO, 1: 15-19.

SOARES, E.P. (2006). **Caracterização da precipitação na região ne Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 145 p.

SPENCER, E. (1967). A method for analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. **Géotechnique**, 17(1): 11-26.

SRIKANTHAN, R & MCMAHON, T. A. (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. **Hidrology and Earth System Sciences**, 1: 653-670.

TAN, C.P., DONALD, I.B. & MELCHERS, R.E. (1993). **Probabilistic slip circle analysis of earth and rockfill dams**. Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Camberra, Australia. 281-288.

TAN, E., FREDLUND, D.G., & GITIRANA JR., G.F.N. (2004). **Comparison of correction method for factors influencing thermal conductivity suction sensors**. V Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, São Carlos, SP, 1: 127-132.

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. & ROCHA, M.C.M. (1987a). Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos – Serra do Mar – Município de Cubatão **V Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia**, São Paulo, SP, 2: 225-236.

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S., ROCHA, M.C.M. (1987b). Modelamento Numérico da Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos aplicados à

Encosta da Serra do Mar. **V Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia**, São Paulo, SP, 2: 237-248.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. **Geophysical Review**, 38: 55-94.

TOLL, D.G., TSAPARAS, I. & RAHARDJO, H. (2001). The influence of rainfall sequences on negative pore water pressures within slopes. **XV International Conference Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Istambul, Turquia. 1269-1272.

TUCCI, C.E.M. (2004). **Hidrologia: ciência e aplicação**. ABRH/Editora da UFRGS, Porto Alegre, 943p.

VIANNA, A.P.F. (2005). **Influência da dimensão e da sucção matricial no comportamento de fundações superficiais assentes em solo arenoso não-saturado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 169 p.

VIEIRA, R. (2004). **Um olhar sobre a paisagem e o lugar como expressão do comportamento frente ao risco de deslizamento**. Tese de doutorado. Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 197p.

WILSON, G.W. (1990). **Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems**. Ph.D. Thesis, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 464 p.

WILSON, R.C. (2005). The Rise and Fall of a Debris-flow Warning System for the San Francisco Bay Region, California. **Landslide Hazard and Risk**, Glade, 1: 493-516.

WOLLE, C.M. (1988). **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 243 p.

WU, X.Z. (2013). Trivariate analysis of soil ranking-correlated characteristics and its application to probabilistic stability assessments in geotechnical engineering problems. **Soils and Foundations**. 53(4): 540-556.

TEIXEIRA, E.K.C. AZEVEDO, R.F.A, CÂNDIDO, E.S., RIBEIRO, A.G.C.R. & SOUZA, T.S.C. (2014). Efeito da infiltração de águas pluviais na estabilidade de taludes. **XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**. ABMS, Goiânia, GO.

YAMAGAMI, T. & UETA, Y. (1988). Search for critical slip lines in finite element stress field by dynamic programming. **VI International Conference on Numerical Methods in Geomechanics**, Innsbruck, Áustria, 1347-1352.

ZAVATTINI, J.A. & BOIN, M.N. (2013). **Climatologia Geográfica: Teoria e Prática de Pesquisa**. Alínea, Campinas, SP, 150 p.