Dissertação de Mestrado

INFLUÊNCIA DO PROCESSO SAZONAL DE FLUXO NA ZONA VADOSA NA ESTABILIDADE DE UMA PILHA DE ESTÉRIL

AUTOR: JULIANA APARECIDA PEDRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro (UFOP)

NUGEO

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - OUTUBRO DE 2010

P3718 Pedra, Juliana Aparecida.
Influência do processo sazonal de fluxo na zona vadosa na estabilidade de uma pilha de estéril [manuscrito] / Juliana Aparecida Pedra. - 2010.
xxii, 123f.: il.: color; grafs; tabs; mapas..

Orientador: Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Pilha de estéril. 2. Estabilidade. 3. Fluxo. I. Ribeiro, Saulo Gutemberg Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 624.13

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

INFLUÊNCIA DO PROCESSO SAZONAL DE FLUXO NA ZONA VADOSA NA ESTABILIDADE DE UMA PILHA DE ESTÉRIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 29 de outubro de 2010, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Prof. Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro (Orientador / UFOP)

Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar (UFOP)

Prof. Dr. Cláudio Henrique de Carvalho Silva (UFV)

"O que vale na vida não é o ponto de
partida e sim a caminhada, caminhando
e semeando, no fim terás o que colher."

(Cora Coralina)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José André e Marina.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo presente maior, a vida e por todas as bençãos que recebo todos os dias.

A minha família, que sempre me apóia nos caminhos que escolho. De forma especial a minha mãe e à minha irmã Andréa pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado, e a quem peço desculpas pelos momentos em que precisei estar ausente.

Agradeço ao Prof. Saulo, pelo exemplo de humildade, pela orientação incentivadora, pelos conhecimentos transmitidos que foram além dos assuntos do trabalho e pela compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço à Geoslope por ceder a licença do Sistema Computacional Geostudio 2007.

Aos colegas de mestrado agradeço por todas as experiências e momentos compartilhados.

Agradeço à VALE pela cessão de dados publicados neste trabalho e pelas oportunidades profissionais que tem me proporcionado. De forma especial gostaria de agradecer ao Paulo Franca, Germano Lopes, Cesar Grandchamp e Cesar Alves pelo apoio.

Aos colegas da Mina do Tamanduá pelos ótimos momentos que temos de convivência.

À Joice Milonas agradeço pelo incentivo, companheirismo e pelo exemplo de ser humano e de profissional.

Ao Xavier, pelo incentivo, apoio e pelos ensinamentos profissionais e pessoais transmitidos.

É difícil citar todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma e torceram por mim. A todas estas pessoas, muito obrigada!

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma análise do comportamento de uma pilha de estéril de minério de ferro considerando a influência das condições climáticas no período de um ano através da realização de análise de fluxo sazonal transiente e seus efeitos na estabilidade da pilha. O foco do estudo está em apresentar uma ferramenta de análise numérica do fluxo na zona vadosa visando otimizar e aumentar a confiabilidade dos estudos atuais, e ainda apresentar as oscilações de determinadas variáveis no decorrer do ano.

As análises realizadas mostraram que a proposta de inserir uma modelagem que realize a interação solo-atmosfera acoplada aos estudos de estabilidade de taludes mostrou-se satisfatória. A condição de inserção de dados climáticos no contexto de fluxos em meios porosos torna a análise de estabilidade mais realista.

Os estudos desenvolvidos mostraram que por meio de uma abordagem da variação sazonal das condições de estabilidade em que a sucção foi considerada com a inclusão do parâmetro $ø_b$ nas análises, o fator de segurança foi maximizado em até 7% para este caso quando comparadas com as análises convencionais em que o parâmetro $ø_b$ não é considerado. Similarmente, comparando-se as condições de estabilidade no período chuvoso em relação ao período de seca a implicação na estabilidade com sucção matricial incorporada proporcionou um maior valor do fator de segurança da ordem de 6%. Estes quantitativos ratificam a importância da aplicação desta metodologia no desenvolvimento de projetos de estruturas deste tipo e na avaliação operacional destas obras, seja no período construtivo, seja na condição de fechamento da pilha ou descomissionamento da mina.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the behavior of a pile of waste iron ore considering the influence of climatic conditions during the period of one year through seasonal transient flow analysis and its effects on stability of the pile. The focus of the study is to present a tool of numerical analysis of flow in the vadose zone to optimize and increase the reliability of current studies, and also submit the oscillations of certain variables during the year.

The analysis carried out showed that the proposal to insert a modeling that performs soil-atmosphere interaction coupled to hillside stability studies proved satisfactory. The condition of climatic data insertion in the context of flows in porous media makes the analysis of stability more realistic.

The studies showed that through an approach of seasonal variation of the conditions of stability on which the suction was considered with the inclusion of the analyses, the parameter øb safety factor was maximized by up to 7% for this case when compared with conventional analyses in which the parameter øb is not considered. Similarly, comparing the conditions of stability in the rainy period in relation to the period of drought the implication in stability with matrix suction incorporated provided a greater value of the safety factor of the order of 6%. These quantitative ratify the importance of applying this methodology in developing projects and operational assessment of such structures, whether in constructive period or on closing condition of the pile or decommissioning of the mine.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Influência da sucção no contato entre grãos de solo (Ibanez, 2008). 6

Figura 2.2 – Curva Característica do Solo – *Se* (valor de entrada de ar); *Sc* (valor crítico de entrada de ar); θ (teor de umidade volumétrico) - (Ibanez, 2008). 7

Figura 2.3 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço (τ, σ, *s*) modificado por Fredlund *et al.* (1978) citado em Ibanez (2008). 8

Figura 2.4 – Curva Característica Típica – Solo Siltoso (Fredlund e Xing, 1994). 13

Figura 2.5 – Aparelho de Richards (Bonder, 2008). 15

Figura 2.6 – Funil de Buckner (Vasconcelos, 2008). 16

Figura 2.7 – Princípio do Método do Papel Filtro: (a) técnica em contato; 17

Figura 2.8 – Apresentação da bomba de fluxo (Guimarães, 2008). 18

Figura 2.9 – Bomba de fluxo finalizada (Guimarães, 2008). 18

Figura 2.10 – Bomba de fluxo fixada à prensa (Guimarães, 2008). 19

Figura 2.11 - Variação da viscosidade e peso específico da água com a temperatura 23

Figura 2.12 – Permeâmetro de parede rígida (Daniel, 1994; citado em Alonso, 2005). 27

Figura 2.13 – Permeâmetro de parede flexível (Daniel *et al*. 1984; citado em 29

Figura 2.14 – Infiltrômetro de duplo anel. 34

Figura 2.15 – Modelo de atmômetro de Piché. 43

Figura 2.16 – Esquema de um tanque Classe A. 44

Figura 2.17 – Disposição em campo de um evaporímetro – Tanque. 44

Figura 2.18 – Representação do Ciclo Hidrológico (Teixeira *et al*. 2001). 49

Figura 2.19 – Apresentação do ciclo hidrológico através de uma visão da engenharia (Eagleson, 1978) citado em (Oliveira, 2003). 49

Figura 2.20 – Relação da taxa de evaporação *versus* tempo apresentando os três estágios de secagem (depois de Hillel, 1980 citado por Wilson, 1990). 56

Figura 3.1 – Pilha de Estéril Capão da Serra (Vale, 2007). 68

Figura 3.2 – Localização das minas da mineradora Vale no estado de Minas Gerais. ... 69

Figura 3.3 – Seção transversal da pilha de estéril Capão da Serra com indicação da localização dos intrumentos instalados. 71

Figura 3.4 – Malha de elementos finitos da seção de análise. 74

Figura 3.5 – Condições de Contorno 75

Figura 3.6 – Balanço hídrico acumulado (Estudo de caso). 75

Figura 3.7 – Precipitação acumulada (Estudo de caso). 76

Figura 3.8 – Evaporação superficial acumulada (Estudo de caso). 78

Figura 3.9 – Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (Estudo de caso). 79

Figura 3.10 – Seção analisada e nós considerados nas avaliações seguintes 79

Figura 3.11 – Variações de temperatura (Estudo de caso). 80

Figura 3.12 – Variações das poro pressões (Estudo de caso). 81

Figura 3.13 – Variações do fluxo total acumulado na superfície (Estudo de caso). 82

Figura 3.14 – Grau de saturação em relação a profundidade (Estudo de caso). 83

Figura 3.15 – Variação das poro pressões em relação à profundidade para quatro pontos específicos da malha (Estudo de caso). 84

Figura 3.16 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso). 85

Figura 3.17 - Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso). 85

Figura 3.18 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura para o 108º dia (Estudo de caso). 85

Figura 3.19 – Análise de estabilidade local para o 213º dia - Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso). 86

Figura 3.20 - Análise de estabilidade global para o 213º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso). 86

Figura 3.21 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura para o 213º dia (Estudo de caso). 87

Figura 3.22 - Análise de estabilidade global para o 348º dia - Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso). 87

Figura 3.23 – Poro pressões na superfície potencial de ruptura para os resultados do 348º dia (Estudo de caso). 88

Figura 3.24 - Fator de segurança x tempo – (Estudo de caso). 89

Figura 3.25 – Correlação do Fator de segurança x tempo para análise de estabilidade com sucção e sem sucção – (Estudo de caso). 90

Figura 3.26 – Seção de análise considerando reservatório de água. 91

Figura 3.27 – Linhas equipotenciais (análise com reservatório). 91

Figura 3.28 – Balanço hídrico acumulado (análise com reservatório). 92

Figura 3.29 – Precipitação acumulada (análise com reservatório). 93

Figura 3.30 – Evaporação superficial acumulada (análise com reservatório). 94

Figura 3.31 - Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (análise com reservatório). 95

Figura 3.32 - Distribuição das poro pressões na seção de análise e dos nós considerados na avaliação das poro pressões (análise com reservatório). 95

Figura 3.33 - Variações das poro pressões (análise com reservatório). 96

Figura 3.34 – Nós considerados para a avaliação da Figura 3.33 e Figura 3.34. 97

Figura 3.35 - Grau de saturação em relação a profundidade (análise com reservatório). 98

Figura 3.36 - Variação das poro pressões em relação à profundidade para quatro pontos específicos da malha (análise com reservatório). 98

Figura 3.37 – Análise de estabilidade local para o 8º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 99

Figura 3.38 – Análise de estabilidade global para o 8º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 100

Figura 3.39 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 8º dia da análise (análise com reservatório). 100

Figura 3.40 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 100

Figura 3.41 - Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 101

Figura 3.42 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 108º dia da análise (análise com reservatório). 101

Figura 3.43 - Análise de estabilidade local para o 208º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 101

Figura 3.44 - Análise de estabilidade global para o 208º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 102

Figura 3.45 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 208º dia da análise (análise com reservatório). 102

Figura 3.46 - Análise de estabilidade local para o 248º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 102

Figura 3.47 - Análise de estabilidade global para o 248º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório). 103

Figura 3.48 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 248º dia da análise (análise com reservatório). 103

Figura 3.49 – Correlação do Fator de segurança x tempo para análise de estabilidade com sucção e sem sucção (análise com reservatório). 104

Figura 3.50 – Balanço hídrico acumulado (aumento dos dados pluviográficos). 106

Figura 3.51 – Precipitação acumulada (aumento dos dados pluviográficos). 107

Figura 3.52 – Evaporação superficial acumulada (aumento dos dados pluviográficos). 107

Figura 3.53 – Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (aumento dos dados pluviográficos). 108

Figura 3.54 – Variações de temperatura (aumento dos dados pluviográficos). 109

Figura 3.55 – Variações das poro pressões (aumento dos dados pluviográficos). 110

Figura 3.56 – Variações do fluxo total acumulado na superfície (aumento dos dados pluviográficos). 110

Figura 3.57 – Grau de saturação em relação a profundidade (aumento dos dados pluviográficos). 111

Figura 3.58 – Variação das poro pressões em relação à profundidade (aumento dos dados pluviográficos). 112

Figura 3.59 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos). 113

Figura 3.60 – Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos). 113

Figura 3.61 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 108º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos). 113

Figura 3.62 - Análise de estabilidade local para o 213º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos). 114

Figura 3.63 - Análise de estabilidade global para o 213º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos). 114

Figura 3.64 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 213º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos). 114

Figura 3.65 – Análise de estabilidade global para o 348º dia - Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos). 115

Figura 3.66 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 348º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos). 115

Figura 3.67 - Fator de segurança x tempo – Análise de estabilidade global - (aumento dos dados pluviográficos). 116

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Técnicas de Medida de Sucção (Bonder, 2008). 14

Tabela 2.2 – Propriedades físicas da água em estado líquido (Duarte, 2004). 24

Tabela 2.3 – Valores de condutividade térmica para vários materiais (Geo-slope, 2007). 63

Tabela 2.4 - Valores de capacidade de aquecimento volumétrico para vários materiais 65

Tabela 3.1 – Condutividade hidráulica e índices físicos. 71

Tabela 3.2 – Parâmetros de Resistência. 72

Tabela 3.3 – Parâmetros térmicos dos solos. 73

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

a	valor de entrada de ar do solo
A	inverso da umidade relativa do ar na superfície do solo
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	inverso da umidade relativa do ar ($1/h_a$)
c'	coesão efetiva do solo
C	calor específico volumétrico
cm	centímetros
c_{ap}	coesão aparente do solo
C_a	calor específico volumétrico do ar
C_r	constante da matriz de sucção, correspondente ao valor de teor de umidade volumétrico residual
C_s	calor específico volumétrico das partículas de solo
C_t	constante relacionada com a temperatura absoluta
C_w	calor específico volumétrico da água
CP	corpo de prova
$C(\psi)$	correção da função de condutividade hidráulica
dt	intervalo de tempo
e	índice de vazios
e_n	número natural (2,71828)
$e_T(t)$	taxa de evapotranspiração em função do tempo
E	taxa de evapotranspiração mensal
E_a	evaporatividade do ar à sombra
E_b	taxa de evaporação
E_m	evapotranspiração média anual
E_p	taxa de evaporação total
E_r	taxa de evaporação real
E_t	evaporação ou evapotranspiração na unidade de tempo
E_v	fluxo evaporativo vertical

El.	elevação
EP	evaporação potencial ou evapotranspiração potencial
f_0	taxa de infiltração máxima (inicial)
f_c	capacidade de infiltração do solo
f_v	função empírica envolvendo a velocidade do vento horizontal
g	aceleração da gravidade
h	carga hidráulica
h_a	umidade relativa do ar
h_c	altura de ascensão capilar
h_i	nível d'água
h_r	umidade relativa do ar na superfície do solo
i	gradiente hidráulico
I	infiltração cumulativa
i_c	índice mensal de calor
I_c	índice de calor
I_f	fluxo de entrada
i_i	taxa de infiltração inicial
i_t	taxa de infiltração com o tempo
i(t)	intensidade de precipitação em função do tempo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
j	menor sucção descrita na função final da curva de retenção de água do solo
k	condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade
kPa	quilopascal
k_s	condutividade hidráulica saturada ou coeficiente de permeabilidade saturada
k_ψ	condutividade hidráulica não saturada ou coeficiente de permeabilidade não saturada
L_v	calor latente de vaporização
m	metros
m_v	coeficiente de compressibilidade volumétrica
n	porosidade do solo
N	maior sucção descrita na função final da curva de retenção de água do solo
OCR	Over consolidation ratio

P	precipitação média anual
q	vazão de fluxo
Q	fluxo de saída
Q_a	escoamento médio anual
Q_b	energia perdida por radiação de ondas longas
Q_e	energia utilizada na evaporação
Q_{er}	rede de energia radiante (menos energia de transpiração) disponível na superfície
Q_h	energia conduzida para a atmosfera como calor sensível
Q_L	rede de radiação de ondas longas
Q_n	radiação líquida total na superfície do solo
Q_r	radiação solar refletida
q_s	relação da quantidade de quartzo com a fração total dos sólidos
Q_s	radiação solar incidente
q_v	fluxo vertical ascendente
Q_v	energia transferida para o corpo através de outros processos, como condensação, chuva, percolação
Q_θ	aumento de energia armazenada
R	constante universal dos gases
R_B	razão de Bowen
$r_g(t)$	taxa de escoamento subterrâneo em função do tempo
RH	umidade relativa do ar
R_s	raio de curvatura do menisco
$r_s(t)$	taxa de escoamento superficial em função do tempo
s	inclinação da linha tangente para a função que passa através do ponto de inflexão
S	grau de saturação do solo
S_r	grau de saturação residual da amostra
t	tempo (referente a equação de cálculo da taxa de infiltração pelo método empírico)
T	temperatura absoluta
T_a	temperatura do ar acima da superfície do solo

$\overline{\overline{T_a}}$	temperatura média mensal do ar
T_s	tensão superficial
T_t	temperatura na superfície do solo – Wilson 1990 – pág.20 – cap2
T_L	temperatura do solo
u_a	poro-pressão de ar
u_w	poro-pressão de água
u_v	pressão parcial do vapor de água no poro
$u_v{}^a$	pressão parcial de vapor no ar acima da superfície
$\overline{u}_v^a$	pressão de vapor do ar a uma altura suficiente para não ser afetada pela evaporação
u_{vo}	pressão de saturação de vapor de água sobre uma superfície plana de água pura na mesma temperatura do ar
u_{v0s}	pressão de saturação de vapor de água na temperatura do solo
u_{v0}^a	pressão de saturação de vapor de água na temperatura do ar
u_{vs}	pressão parcial de vapor na superfície de evaporação
u_2	velocidade do vento a 2 metros de altura em relação a superfície
V	volume total do corpo de prova
$V_{ss}(t)$	volume de armazenamento na superfície em função do tempo
$V_{sg}(t)$	volume de armazenamento subterrâneo em função do tempo
V_{w0}	volume específico da água
x_0, y_0	dimensões da área que evapora
w	umidade
y	variável simulada de integração
y_f	distância na direção do fluxo no cálculo da infiltração cumulativa
$y(t)$	taxa de escoamento em função do tempo
α	uma constante determinada empiricamente a partir de observações de *i* (taxa de infiltração) e *t* (tempo)
β_d	taxa de decréscimo da taxa de infiltração
γ	peso específico do permeante
γ_d	peso específico seco

γ_w peso específico da água

η constante psicrométrica

θ teor de umidade volumétrico

θ' primeira derivada de θ

θ_a teor volumétrico de ar

θ_i teor volumétrico de água inicial na equação da infiltração cumulativa

θ_l teor volumétrico de sólidos

θ_r teor de umidade volumétrico residual

θ_s teor de umidade volumétrico na saturação

θ_v teor volumétrico de água na equação da infiltração cumulativa

θ_w teor volumétrico de água

λ condutividade térmica do solo não saturado

λ_e condutividade térmica do solo normalizada (número de Karsten)

λ_o condutividade térmica dos outros minerais

λ_q condutividade térmica do quartzo

λ_s condutividade térmica das partículas do solo

λ_{sat} condutividade térmica do solo saturado

λ_{seco} condutividade térmica do solo seco

λ_w condutividade térmica da água

μ viscosidade do fluido permeante

v vazão específica ou velocidade aparente

ρ_w massa específica da água

σ tensão normal

τ resistência ao cisalhamento

υ constante fisicrométrica

$\varnothing$ ângulo de atrito do solo

$\varnothing'$ ângulo de atrito efetivo do solo

$\varnothing_b$ parâmetro adicional que serve como constante de proporcionalidade entre o valor da sucção (u_a - u_w) e o incremento na resistência do solo

ψ_{ad} sucção de adsorção

ψ_c sucção capilar

ψ_m sucção mátrica

ψ_{om} sucção osmótica

ψ_t sucção total

ω_v massa molecular do vapor de água

Δ inclinação da curva pressão de saturação de vapor x temperatura, na temperatura média do ar

ΔS variação no armazenamento nas várias formas de retenção no volume de controle

ΔS_G variação no armazenamento de reservatórios subterrâneos

ΔS_s variação no armazenamento de reservatórios superficiais

Δt intervalo de tempo

a_p, α, β, n, m constantes de ajustes

Lista de Anexos

Anexo I	Dados Meteorológicos
Anexo II	Dados de Instrumentação (INA's – Indicadores de Nível D'água)
Anexo III	Arranjo Geral da Pilha de Estéril Capão da Serra
Anexo IV	Dados Meteorológicos da Cidade de São Paulo Referentes aos Meses de Dezembro/2009 e Janeiro/2010

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO....1

2. PARÂMETROS E PROCESSOS RELACIONADOS ÀS ANÁLISES DE FLUXO NA ZONA VADOSA....4

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS....4

2.2. SUCÇÃO EM SOLOS....5

2.2.1. FENÔMENO DA CAPILARIDADE....11

2.3. CURVA CARACTERÍSTICA....12

2.3.1. MÉTODOS UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA (CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA)....14

2.3.2. PLACA DE PRESSÃO (TÉCNICA DA TRANSLAÇÃO DE EIXOS)....15

2.3.3. ENSAIO COM FUNIL DE BUCKNER....16

2.3.4. PAPEL FILTRO....16

2.3.5. BOMBA DE FLUXO....17

2.3.6. MODELO ANALÍTICO....20

2.4. TEMPERATURA....20

2.4.1. EFEITOS DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO....21

2.4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES SOLO-ÁGUA....23

2.4.3. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO TERRENO....25

2.5. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA....26

2.5.1. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA....26

2.5.2. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA....29

2.6. INFILTRAÇÃO....32

2.6.1. TAXA DE INFILTRAÇÃO....33

2.6.2. MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO NO SOLO....33

2.7. EVAPORAÇÃO....38

2.7.1. MÉTODOS CLIMATOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REGIONAL....39

2.7.2. MEDIDAS DIRETAS E MÉTODOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO....42

2.7.3. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA EVAPORAÇÃO....45

2.7.4. EVAPORAÇÃO REAL – FORMULAÇÃO DE PENMAN-WILSON (1990)....51

2.7.5. EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO....52

2.8. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS....60

2.8.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA....60

2.8.2. CALOR ESPECÍFICO VOLUMÉTRICO (CAPACIDADE DE AQUECIMENTO VOLUMÉTRICO).....64

3. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA, PARÂMETROS UTILIZADOS NAS ANÁLISES E ESTUDOS REALIZADOS.....66
3.1. HISTÓRICO DA PILHA DE ESTÉRIL ANALISADA.....66

3.2. QUANTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....68
3.2.1. DADOS METEOROLÓGICOS.....69
3.2.2. LINHA FREÁTICA.....70
3.2.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E ÍNDICES FÍSICOS.....71
3.2.4. COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA.....71
3.2.5. PESO ESPECÍFICO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....72
3.2.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS.....72

3.3. ANÁLISES NUMÉRICAS.....74
3.3.1. ANÁLISE DE FLUXO – ESTUDO DE CASO.....74

3.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE.....90
3.4.1. AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DA PILHA COMO BARRAMENTO PARA ARMAZENAMENTO DE ÁGUA.....90
3.4.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MAXIMIZAÇÃO DE DADOS PLUVIOGRÁFICOS NO PROCESSO SAZONAL DE FLUXO NA PILHA DE ESTÉRIL.....104

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....117
4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....117

4.2. CONCLUSÕES.....118

4.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....120

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 118

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Na mecânica de solos clássica, as análises das condições das estruturas estavam associadas, na maioria dos casos, a soluções que consideravam o meio como saturado. Ainda nos dias de hoje se pode verificar que a maioria dos textos trata o meio não saturado de forma superficial.

Na busca por implementar ferramentas de auxílio em análises de fluxo transiente, de forma a contribuir para o refinamento dos estudos e incrementar a confiabilidade nos resultados obtidos, tem se tornado crescente a busca por conhecer e utilizar métodos computacionais específicos. Estes métodos computacionais apresentam uma proposta de auxiliar no entendimento de como se estabelecem os fluxos na região não saturada das estruturas, região conhecida como zona vadosa.

Atualmente, problemas de fluxo em meio saturado, desde os mais simples até os mais complexos são resolvidos por meio de métodos numéricos. Para o caso do fluxo em meios não-saturados a tendência de usar métodos numéricos é ainda maior devido aos processos físicos não-lineares associados às condições não-saturadas e à complexidade das equações que regem o escoamento nesses meios.

Neste contexto, o foco deste trabalho é apresentar, por meio de implementação numérica, com o apoio do Sistema Computacional GeoStudio 2007, módulos Vadose e Slope, a maneira como se processam as infiltrações, evaporações e como o fluxo sazonal transiente se estabelece e interfere na estabilidade de uma pilha de estéril de minério de ferro.

A escolha por estudar uma pilha de estéril foi feita, principalmente, por se tratar de um tipo de estrutura que atualmente possui certa limitação de volume de trabalhos, estudos e discussões mais específicas. Com este trabalho há também a intenção de estimular a

continuidade dos estudos dos processos que ocorrem nas pilhas de estéril, suas implicações e com isso obter uma melhoria contínua dos projetos, da implantação e do acompanhamento das ocorrências de problemas geotécnicos.

Uma característica relevante deste trabalho é que sua elaboração abre uma nova linha de pesquisa no Nugeo (Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto) associada aos efeitos do equilíbrio hídrico na estabilidade de obras geotécnicas.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos parâmetros que são utilizados para a análise numérica proposta, as formas de obtenção destes parâmetros e os processos relacionados às análises de fluxo na zona vadosa. Esta apresentação tem por objetivo mostrar as diversas maneiras de obtenção dos parâmetros. Entre os dados de entrada para a análise de fluxo transiente utilizando a ferramenta numérica proposta podem ser citadas as propriedades hidráulicas, sendo definida a variação da sucção mátrica com a condutividade de acordo com o tipo de material.

Ainda no capítulo 2 é apresentada a influência da sucção no comportamento tensão-deformação-resistência e a influência do parâmetro ϕ_b no comportamento dos solos não saturados. É mostrada também a definição de curva característica dos solos e algumas formas de obtenção desta curva. Um fator que merece atenção é a influência da temperatura no comportamento hidráulico dos solos e também nas propriedades solo-água. A temperatura é uma propriedade ainda pouco utilizada em análises geotécnicas, porém muito importante na forma de análise proposta neste trabalho.

No decorrer do capítulo 2 são apresentados ainda conceitos de infiltração e evaporação e determinadas formas de obtenção destes parâmetros. Por último são apresentadas algumas definições das propriedades térmicas dos solos, sendo a condutividade térmica e o calor específico volumétrico ou capacidade de aquecimento volumétrico os parâmetros térmicos principais necessários em uma análise de fluxo de calor.

No Capítulo 3 estão desenvolvidas as análises numéricas e as considerações de cada uma delas. É apresentado um estudo de caso da pilha de estéril, uma análise de sensibilidade desta pilha considerando a existência de reservatório e ainda, uma análise de sensibilidade para avaliação da influência da maximização de dados pluviográficos nos estudos abordados.

A curva característica adotada para as análises foi obtida nas funcionalidades disponibilizadas ao usuário pela ferramenta numérica. Foi utilizada a curva característica com material semelhante a uma argila siltosa.

Por fim, no Capítulo 4 são relatadas algumas considerações finais, as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 2

2. PARÂMETROS E PROCESSOS RELACIONADOS ÀS ANÁLISES DE FLUXO NA ZONA VADOSA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de métodos computacionais para os mais diversos tipos de análises tem gerado grandes avanços nas interpretações do comportamento das estruturas. No entanto, ainda nos dias atuais, é possível identificar a necessidade de se obter dados por meio de ensaios específicos para que a caracterização das estruturas a serem analisadas seja mais precisa. Desta forma, muitas vezes é necessário estabelecer correlações com dados disponíveis para caracterizar os materiais de análise.

As correlações com dados disponíveis para caracterizar os materiais muitas vezes se fazem necessárias devido à dificuldade de obtenção direta dos parâmetros necessários. É importante esclarecer que na análise da influência das condições climáticas atuando no comportamento do fluxo sazonal transiente de uma pilha de estéril, proposta deste trabalho, a dificuldade de obtenção de determinados parâmetros se torna mais complexa. Como poderá ser visto neste capítulo, alguns parâmetros ainda não são familiares à engenharia geotécnica, aumentando assim as dificuldades de obtenção.

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros e as formas de obtenção associadas para que seja feita uma análise da zona vadosa utilizando o Sistema Computacional GeoStudio 2007 (GeoSlope, 2007), módulos Vadose e Slope. Desta forma, para uso do módulo Vadose alguns conceitos são de grande importância de serem conhecidos, como os métodos, as variáveis, os procedimentos e técnicas utilizadas em sua formulação, considerando as análises realizadas pelo módulo Vadose associado ao comportamento específico de pilhas de estéril de minério de ferro. Um entendimento destes conceitos será de grande benefício para a modelagem numérica, solucionando dificuldades e ainda na avaliação da aceitabilidade dos resultados.

2.2. SUCÇÃO EM SOLOS

A estabilidade de taludes está muito associada às condições da percolação de um fluido no solo. O problema da percolação de água através de barragens de terra ou pilhas de estéril é rotineiramente tratado através do traçado da rede de fluxo. Porém, este traçado trata apenas do fluxo em meios saturados. Para resolver problemas de fluxo em meios saturados, há diversos métodos numéricos existentes. Ao considerar especificamente o fluxo em meios não-saturados, onde são verificados processos físicos não-lineares e complexas equações que governam o escoamento, a necessidade de utilizar métodos numéricos é ainda maior.

Vários tipos de estruturas, como exemplo as pilhas de estéril de minério de ferro, estão submetidas a processos de fluxo sob condições não saturadas. Neste caso, a condutividade hidráulica do meio não é constante e decresce com a presença de ar nos vazios (Fredlund e Rahardjo, 1993). A água intersticial afeta a permeabilidade e condiciona a distribuição de poro pressões no meio.

De fato, de acordo com as condições do meio em que as análises de fluxo são realizadas, as poro pressões podem ser tanto positivas (zona saturada) como negativas (franja capilar e zonas não saturadas). Em ambos os casos, estas poro pressões são denominadas genericamente de sucção e pode ser definida como sendo a poro pressão de entrada de ar (u_a), a poro pressão correspondente à interface entre a franja capilar e a zona não saturada. Este comportamento pode ser melhor assimilado por meio da Figura 2.4.

A zona não saturada é chamada também de zona vadosa, e estende-se da linha freática à superfície do solo, incluindo a franja capilar onde os poros podem de fato estar saturados (Vasconcelos, 2008).

A zona vadosa funciona como uma ponte dinâmica entre a atmosfera e as camadas mais profundas de solo saturado, as quais são mais familiares à engenharia geotécnica

(Wilson, 1990). A característica principal da zona vadosa é que as poro pressões são negativas e sua condutividade hidráulica é menor que as encontradas em solos saturados.

Nesta zona, os poros são preenchidos por ar e água simultaneamente, e a água é mantida nos poros por forças de tensão superficial. O estudo da tensão superficial é de fundamental importância para o completo entendimento do fenômeno da retenção da água no solo. É conhecido que a superfície dos líquidos é contrátil, ou seja, ao ser distendida sua tendência é sempre voltar à posição original, mostrando que se encontra num estado de constante tensão. Portanto, por definição, tensão superficial de um líquido é o trabalho por unidade de área gasto para distender a superfície desse líquido (Libardi, 2005).

De acordo com Khogo *et al.* (1993) citado por Ibanez (2008), os mecanismos básicos pelos quais a sucção interfere no comportamento tensão–deformação–resistência podem ser entendidos a partir do estado de tensões nos contatos entre partículas de solos não saturados, Figura 2.1. Conforme relatado pelo autor, o menisco de água formado tem uma diferença de pressão com respeito à pressão no ar (sucção), que se equilibra com as tensões geradas na superfície do menisco funcionando como membrana à tração. Esta membrana toma como apoio as partículas de solo, e gera nelas uma força de reação que, pela axisimetria do menisco, dá lugar a uma força resultante normal ao plano do contato entre as partículas, denominada Ncapilar. Os efeitos produzidos por esta força normal são um incremento nas tensões efetivas do solo e uma rigidez adicional no esqueleto sólido contra a força *T*, que dificulta os deslocamentos relativos entre partículas.

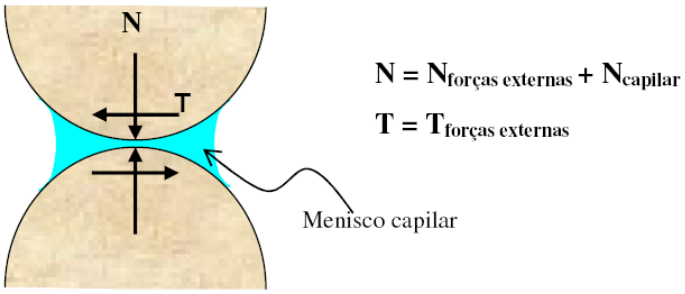


Figura 2.1 – Influência da sucção no contato entre grãos de solo (Ibanez, 2008).

Ainda em relação a este assunto, Khogo *et al.* (1993) distinguem três estados de não saturação, conforme citado por Ibanez (2008) e que podem ser descritos como:

(a) Fase água descontínua. Com baixo grau de saturação, o solo é afetado apenas pela presença das forças capilares.

(b) Fases água e ar contínuas. Condição transiente onde o solo, dada a sua distribuição irregular de poros, experimenta simultaneamente as três condições - *a*, *b* e *c* - em sua massa, em função do tamanho de poros.

(c) Fase ar descontínua. Com elevado grau de saturação, fase água contínua e contendo apenas bolhas de ar isoladas, o solo pode ser descrito em termos de tensões efetivas, semelhante ao caso saturado.

Na Figura 2.2, Ibanez (2008), considerando os estudos realizados por Khogo *et al.* (1993), é mostrado o efeito da sucção no solo para cada condição que foi apresentada acima.

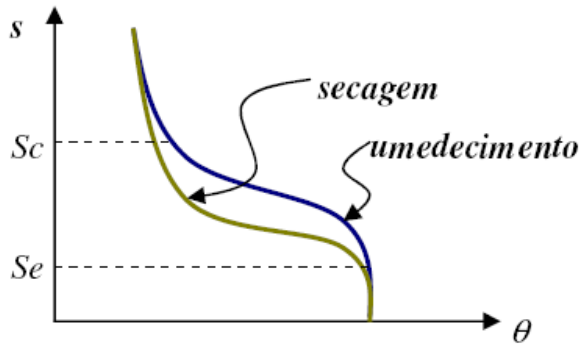


Figura 2.2 – Curva Característica do Solo – *Se* (valor de entrada de ar); *Sc* (valor crítico de entrada de ar); θ (teor de umidade volumétrico) - (Ibanez, 2008).

O conceito da envoltória de resistência não saturada está associado aos estudos e tentativas de modelar matematicamente o aumento na resistência ao cisalhamento com a sucção, como apresentado por Fredlund *et al.* (1978) e citado em Ibanez (2008). De acordo com o critério de ruptura Mohr-Coulomb, sem utilizar tensões efetivas, mas variáveis de estado, é apresentada a Equação 2.1.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) tan\,\phi' + (u_a - u_w) tan\,\phi_b \quad (2.1)$$

em que u_a representa a poro pressão de ar; u_w é a poro pressão da água e $ø_b$ um parâmetro adicional que serve como constante de proporcionalidade entre o valor da sucção (u_a - u_w) e o incremento na resistência do solo, conforme apresentado na Figura 2.3.

De acordo com (Geo-slope, 2007) o limite superior do $ø_b$ é $ø'$. A entrada de um valor dessa magnitude em uma análise afirma que as poro pressões de água negativas serão tão eficazes em aumentar a resistência ao cisalhamento de um solo quanto as poro pressões positivas de água são em reduzir a resistência ao cisalhamento.

Ainda conforme (Geo-slope, 2007) geralmente $ø_b$ é maior que zero, mas menor que $ø'$. Pesquisas publicadas na literatura demonstraram que este é o caso em ensaios de laboratório. A variação de valores mais comuns para $ø_b$ está entre 15º a 20º. O uso de $ø_b$ é simples e estabelece uma estimativa para o aumento de resistência ao cisalhamento como uma função de sucção do solo. A desvantagem do uso de $ø_b$ é que a resistência não saturada envolvida é assumida para aumentar linearmente com sucção do solo o qual tende a superestimar a resistência ao cisalhamento não saturado particularmente quando a sucção do solo é muito alta.

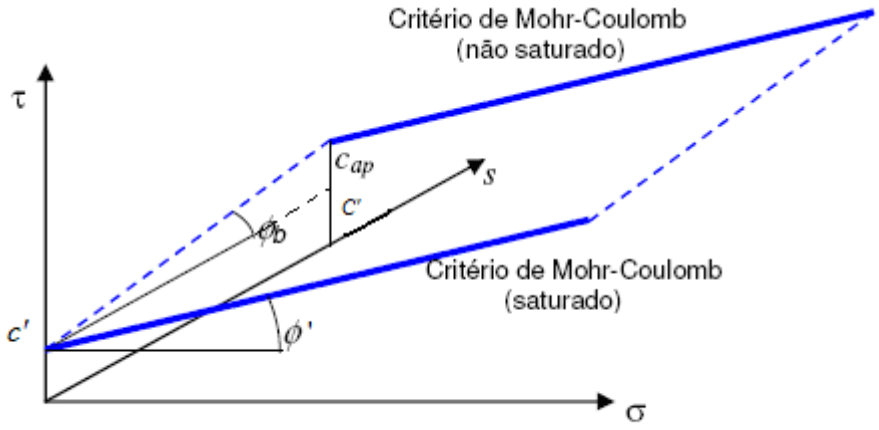


Figura 2.3 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço (τ, σ, *s*) modificado por Fredlund *et al.* (1978) citado em Ibanez (2008).

Os efeitos da sucção se contabilizam no aumento da coesão, agora chamada de aparente, composta pela segunda parcela das Equações 2.2 e 2.3.

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.2)$$

ou

$$\tau = c' + c_{ap} + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.3)$$

Nos estudos realizados por Escario e Sáez (1986) de acordo com Ibanez (2008), foi mostrado que a linearidade entre sucção e resistência, admitida nas relações citadas, não é verificada em alguns solos, especialmente para baixas sucções.

Ainda de acordo com Ibanez (2008), Escario e Sáez (1986), há uma variação do ângulo de atrito com a sucção. O que foi observado pelos autores é que esta variação é desprezada nos diversos modelos de resistência para solos não saturados. A sucção tem também influência sobre a compressibilidade do solo, tornando a massa de solo mais rígida frente às forças externas, em virtude da atração entre partículas produzida pelos meniscos. Por outro lado, variações na sucção também induzirão deformações plásticas, e para alguns solos, a saturação instantânea poderá provocar colapso e/ou inchamento do solo.

A sucção total ψ_t pode ser subdividida em duas componentes: a sucção mátrica ψ_m (relacionada à estrutura do material) e a sucção osmótica ψ_{om} (relacionada a diferenças de concentração de solutos presentes no meio). A sucção mátrica, por sua vez, é composta por duas parcelas: a sucção capilar ψ_c (relacionada às tensões capilares desenvolvidas na água presente nos poros) e a sucção de adsorção ψ_{ad} (relacionada aos efeitos da água adsorvida na superfície dos grãos), tal que $\psi_m = \psi_c + \psi_{ad}$ (Gomes, 2007).

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a sucção total do solo é geralmente referida como o estado de energia livre da água no solo. De acordo com esses autores, a energia livre da água intersticial pode ser medida em termos de pressão parcial de vapor de água no

solo. A Equação 2.4 apresentada em Vasconcelos (2008) representa a relação termodinâmica entre a sucção total e a pressão parcial de vapor de água.

$$\psi_t = \frac{-RT}{V_{wo}\,\omega_v} ln\left(\frac{u_v}{u_{vo}}\right) \tag{2.4}$$

em que ψ_t é a sucção total do solo (kPa); *R é a* constante universal dos gases (molar) [isto é, 8,31432 J/(mol K)]; *T* é a temperatura absoluta [isto é, T=(273,16 + t°)] (K); V_{w0} é o volume específico da água [(l/ρ_w) (m³/kg)]; ω_v é a massa molecular do vapor de água (18,016 kg/kmol); u_v é a pressão parcial do vapor de água no poro (kPa); u_{vo} é a pressão de saturação do vapor de água sobre uma superfície plana de água pura na mesma temperatura (kPa).

A quantidade de vapor de água que pode existir na atmosfera é limitada para cada temperatura. Temperaturas mais elevadas dão condições para a existência de maior quantidade de vapor que temperaturas mais baixas. Quando o ar contém o máximo de vapor de água possível a uma dada temperatura, diz-se que ele se encontra saturado, e a pressão de vapor nessa circunstância é dita máxima ou de saturação e será representada por u_{vo}. Se a quantidade de vapor não for suficiente para saturar o ar, sua pressão é chamada de pressão parcial de vapor, sendo representada por u_v. O termo u_v./ u_{vo} é conhecido como umidade relativa *RH* (%) e representa a concentração de vapor de água no ar. É possível observar que quando a umidade relativa tem um valor de 100%, a sucção no solo é zero (Vasconcelos, 2008).

De acordo com vários estudos realizados determinadas conclusões em relação à influência da sucção no comportamento de solos podem ser apresentadas. Ibanez (2008) cita os seguintes itens:

- A sucção contribui para um aumento na rigidez do solo.
- Em solos com uma estrutura porosa, uma redução na sucção (umedecimento) para uma dada tensão de confinamento poderá induzir uma compressão volumétrica irreversível (colapso).

- A resposta volumétrica depende não somente dos valores de tensão e sucção inicial e final, como também da trajetória de tensão seguida.
- Solos como areias, siltes, areias argilosas, argilas arenosas ou argilas de baixa plasticidade, quando submetidos a processos de umedecimento, tendem a expandir se a tensão de confinamento for baixa, ou a colapsar, se esta for suficientemente elevada.
- Variações nos valores da sucção, como no caso de ciclos de umedecimento e secagem, induzem deformações volumétricas irreversíveis.
- Um incremento na sucção resulta num incremento na coesão, mas não afeta de forma significante o ângulo de atrito efetivo no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Este incremento na resistência do solo é não linear, com tendência a alcançar um valor máximo estável para valores elevados de sucção.

2.2.1. FENÔMENO DA CAPILARIDADE

A sucção mátrica é geralmente associada ao fenômeno capilar e à sucção de adsorção ψ_{ad} que surge devido à tensão superficial, conforme mencionado anteriormente. De acordo com Vasconcelos (2008), a ascensão de água em um tubo capilar normalmente ilustra o fenômeno da capilaridade. A superfície da água no tubo capilar possui uma curvatura côncava para a pressão maior, chamada de menisco. A curvatura deste menisco reflete a diferença entre a pressão existente entre o ar e a água. Esta curvatura possui um raio R_s, que está intimamente ligado à altura capilar h_c, como pode ser observado pela Equação 2.5, em que γ_w é o peso específico da água e T_s é a tensão superficial.

$$h_c = \left(\frac{2T_s}{\gamma_w R_s} \right) \tag{2.5}$$

Solos finos, que apresentam poros com pequenos raios, agem como os tubos capilares. É observado que nestes solos há uma ascensão da água acima do nível freático, sendo esta região conhecida como franja capilar. A pressão da água na região da franja capilar

é negativa em relação à pressão do ar ($u_w=-\gamma_w h$), que geralmente é considerada atmosférica ($u_a=0$) em situações de campo.

Quanto menor o raio do menisco formado entre os grãos e a água intersticial em um solo, maior é a sucção mátrica (maior altura de ascensão da água). A sucção depende fundamentalmente da quantidade de água no solo. Portanto, o teor de umidade volumétrico, θ, e a condutividade hidráulica, k, são funções da sucção. Assim, um aumento do efeito da capilaridade implica geralmente numa diminuição desses parâmetros hidráulicos do solo (Vasconcelos, 2008).

2.3. CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica de um solo (também chamada curva de retenção de água) representa a relação entre o grau de saturação (ou o teor de umidade volumétrico, definido pela relação $\theta=S\ n$, sendo n a porosidade do material) e a sucção mátrica, conforme Fredlund e Rahardjo (1993). Esta curva é uma propriedade do solo que determina a quantidade de água que ele pode perder ou ganhar, por meio do parâmetro de sucção. A Figura 2.4 ilustra esta definição, em que θ_r é o teor de umidade volumétrico residual e θ_s é o teor de umidade volumétrico na saturação. O teor de umidade volumétrico residual representa a quantidade mínima de água que permanece no solo, podendo ser obtido graficamente conforme apresentado pela Figura 2.4. A estrutura do solo tem enorme influência sobre a distribuição e o tamanho dos poros e, assim, sobre a forma da curva característica. A sucção pode ser estabelecida em termos de sucção mátrica ou sucção total.

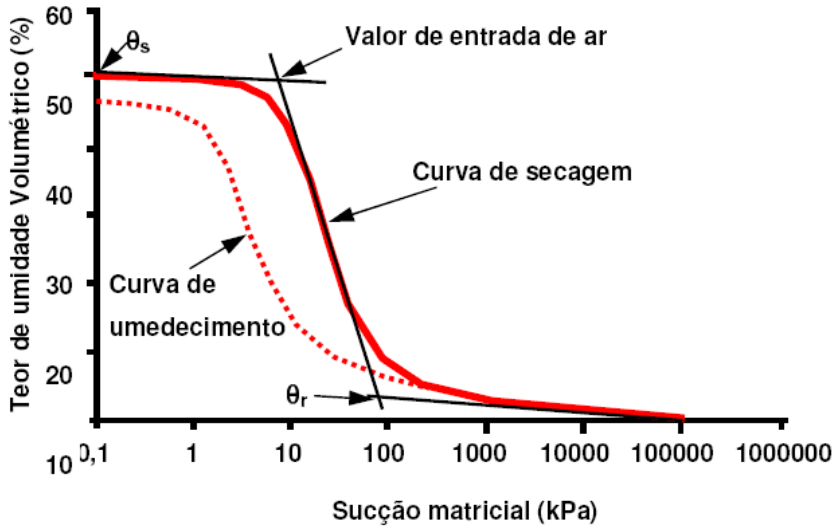


Figura 2.4 – Curva Característica Típica – Solo Siltoso (Fredlund e Xing, 1994).

A relação entre a sucção mátrica e o teor de umidade volumétrico não é unívoca. As curvas que descrevem os processos de drenagem (retirada de água) são chamadas de curvas de drenagem ou de secagem e aquelas que descrevem os processos de saturação (colocação de água) são chamadas de curvas de saturação ou de umedecimento, as quais não são concordantes, como pode ser visto na Figura 2.4.

A histerese pode ser entendida como o fenômeno que diferencia as curvas de retenção obtidas do processo de umedecimento do solo daquelas obtidas do processo de secagem. Conforme relatado por Vasconcelos (2008), Hillel (1980) pondera que a histerese pode ser atribuída a causas diferentes. As formas geométricas individuais dos poros são uma das causas no comportamento diferenciado da curva de retenção de água do solo. O ângulo de contato entre a água e a superfície mineral é outro fator que influencia no fenômeno da histerese. O menisco durante o processo de umedecimento terá um raio de curvatura maior e consequentemente uma sucção mátrica menor, do que quando comparado com o menisco formado no processo de drenagem do solo. Pode ser acrescentado que durante o umedecimento de um solo o ar pode se apresentar de forma oclusa diminuindo o teor de umidade do solo (Vasconcelos, 2008). A histerese ocorre porque a estrutura do solo é distinta em função da natureza dos ciclos de drenagem e saturação, sendo tanto maior quanto maior a quantidade de ar ocluso nos poros e em função de fenômenos de expansão e/ou contração do material.

A forma da curva característica está associada à natureza e granulometria do solo. Para os materiais granulares, que possuem poros relativamente grandes e uniformes, uma pequena sucção é suficiente para reduzir a saturação em grande parte dos poros de maior diâmetro, provocando acentuada redução nos teores de umidade. Nos materiais mais argilosos, além de forças capilares, apresentam que as forças de adsorção são parcelas significativas da sucção mátrica em função da natureza das partículas. Logo, quanto maior a atividade dos minerais presentes, maior tende a ser o volume de água retida por adsorção para um determinado nível de sucção. Outros fatores que afetam significativamente a forma da curva são a temperatura e a quantidade de ar ocluso no meio (Romero, 2006, citado em Vasconcelos, 2008).

2.3.1. MÉTODOS UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA (CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA)

A determinação experimental da curva de retenção de água de um solo específico está associada à determinação dos parâmetros, grau de saturação ou teor de umidade volumétrico e a sucção, individualmente ou a determinação simultânea dos mesmos em ensaios de laboratório específicos. Diversos são os ensaios de laboratório que podem ser usados para a obtenção da curva característica de um solo. A seguir serão descritas algumas das técnicas mais usuais para a determinação da curva de retenção de água (Tabela 2.1). O termo matricial apresentado nesta tabela representa a denominação mátrica atribuída por outros autores.

Tabela 2.1 – Técnicas de Medida de Sucção (Bonder, 2008).

Técnica	**Tipo de Sucção Medida**	**Faixa de Media (kPa)**
Tensiômetro	Matricial	0 - 90
Translação de Eixos	Matricial	0 – 1500
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 - 8000
Condutividade Elétrica	Matricial e Osmótica	20 - 1500
Condutividade Térmica	Matricial	0 - 400
Papel Filtro	Matricial e Total	0 - 29000

2.3.2. PLACA DE PRESSÃO (TÉCNICA DA TRANSLAÇÃO DE EIXOS)

Esta técnica consiste em se elevar as pressões negativas da água contida nos poros do solo a valores positivos, de maneira a se estabelecer a relação saturação (ou teor de umidade x sucção) sem ocorrer a cavitação da água. O desenvolvimento desta técnica foi possível devido à fabricação de pedras cerâmicas e membranas impermeáveis ao ar para um determinado nível de pressão. Este limite de pressão é conhecido como pressão de cavitação ou de borbulhamento destes materiais. A sucção máxima a ser aplicada depende da pressão de entrada de ar nas placas porosas, que podem atingir até 1500 kPa, de acordo com Soto (2004).

A Figura 2.5 mostra o aparelho de Richards, utilizado na técnica de translação de eixos.

Figura 2.5 – Aparelho de Richards (Bonder, 2008).

Em laboratório, a técnica de translação de eixos é utilizada através de diversos equipamentos para induzir a sucção (Botelho, 2001). Os ensaios são realizados em estágios, aplicando-se pressões conhecidas de ar (u_a) e de água (u_w), respectivamente em extremidades opostas da amostra (com u_a maior que u_w). Com a aplicação da sucção (u_a - u_w), a água entra ou sai da amostra até atingir a condição de equilíbrio que é verificada por meio do monitoramento contínuo das variações de volume de água ou através de pesagens sucessivas da amostra até se estabelecer o equilíbrio do peso.

2.3.3. ENSAIO COM FUNIL DE BUCKNER

Para determinação da curva de retenção de água, na escala de -0,01m a -3,00m de carga de pressão, geralmente é utilizado o ensaio com funil de Buckner. Uma amostra saturada com teor de umidade volumétrico conhecido é colocada sobre uma pedra cerâmica posicionada no funil como mostrado na Figura 2.6.

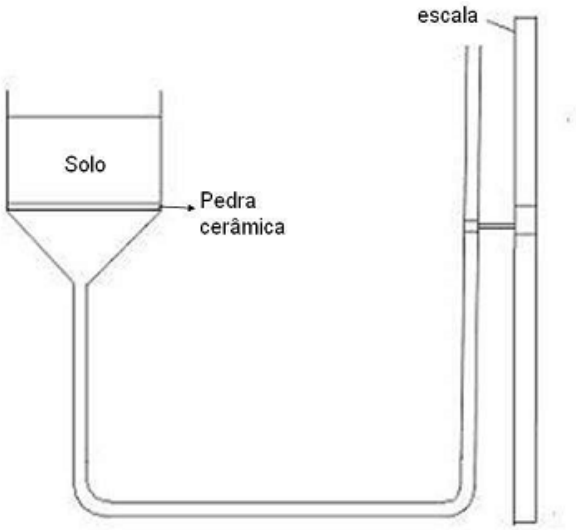


Figura 2.6 – Funil de Buckner (Vasconcelos, 2008).

Essa pedra é saturada e conectada a uma coluna de água que termina em uma bureta. A posição da bureta pode ser alterada para diminuir a carga de pressão. Assim que a carga de pressão negativa ficar menor (mais próxima de zero), a água é drenada da amostra de solo e a quantidade é medida na bureta até que o sistema atinja o equilíbrio.

2.3.4. PAPEL FILTRO

A técnica do papel filtro é baseada no princípio da absorção e do equilíbrio resultante da troca de umidades entre dois materiais porosos, colocados em contato direto ou não em um ambiente fechado, (Gerscovich, 1994). O valor da sucção no solo é então determinado por meio da medida da umidade final do papel filtro e com base em sua

curva de calibração. A medida da umidade final é realizada quando o equilíbrio de umidades é estabelecido, o que pode demandar alguns dias.

Este é um método indireto, onde a sucção é obtida por meio de uma curva de calibração, que relaciona a sucção com a umidade do papel filtro, estabelecida para cada papel filtro em particular. A curva de retenção do papel filtro é usada para inferir a relação sucção x umidade da amostra.

Conforme citado por Vivian (2008 segundo Leong *et al.* 2002), entre as principais vantagens desta técnica, podem ser citadas a simplicidade, o baixo custo e a possibilidade de medir um grande intervalo de sucção. A seguir é apresentada a Figura 2.7 sobre o princípio do Método do Papel Filtro.

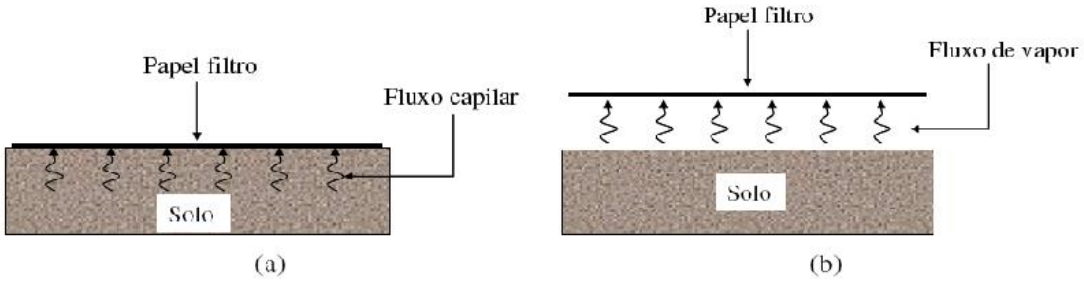


Figura 2.7 – Princípio do Método do Papel Filtro: (a) técnica em contato;
(b) técnica sem contato (baseado em Marinho, 1994 e citado em Vivian, 2008).

2.3.5. BOMBA DE FLUXO

Este método de obtenção experimental da relação entre a sucção e a saturação utiliza a bomba de fluxo para o controle do fluxo de água na amostra de solo e um transdutor diferencial de pressão para medir a sucção no solo. Esta técnica permite a determinação da curva de retenção de água essencialmente para materiais granulares.

Guimarães (2008) relata que para o desenvolvimento de seus estudos, em que seria necessário um sistema de aplicação de vazão constante, promoveu o desenvolvimento de uma bomba que é acoplada a uma prensa triaxial. A bomba de fluxo consiste de um

tubo de vidro PIREX ($ø_{int}$ = 0,4866 cm) e um embolo feito a partir de uma barra de latão de diâmetro um pouco menor, no qual se colocam dois anéis de vedação para evitar vazamentos. A vazão desejada é então obtida em função da velocidade selecionada na prensa. Para proteger o tubo de vidro, este foi colocado dentro de um tubo de alumínio de maior diâmetro, preenchendo-se o intervalo entre os dois com poliacetal, que é um material que possui absorção de umidade extremamente baixa, estabilidade dimensional e boa resistência mecânica, confinando o tubo de vidro e evitando sua fratura, (Figura 2.8). O conjunto de tubos é preso a uma base que possui entrada e saída de água necessária para o bombeamento, e é fechado no topo por meio de uma peça de alumínio e quatro hastes de aço inox, Figura 2.9.

Figura 2.8 – Apresentação da bomba de fluxo (Guimarães, 2008).

Figura 2.9 – Bomba de fluxo finalizada (Guimarães, 2008).

A Figura 2.10 mostra como a bomba é presa na prensa triaxial. É observado que o corpo da bomba é fixado por meio de uma barra de alumínio aos dois montantes da prensa e permanece parado, enquanto que o embolo é preso, com duas barras de latão, ao prato da prensa e se desloca junto com ele.

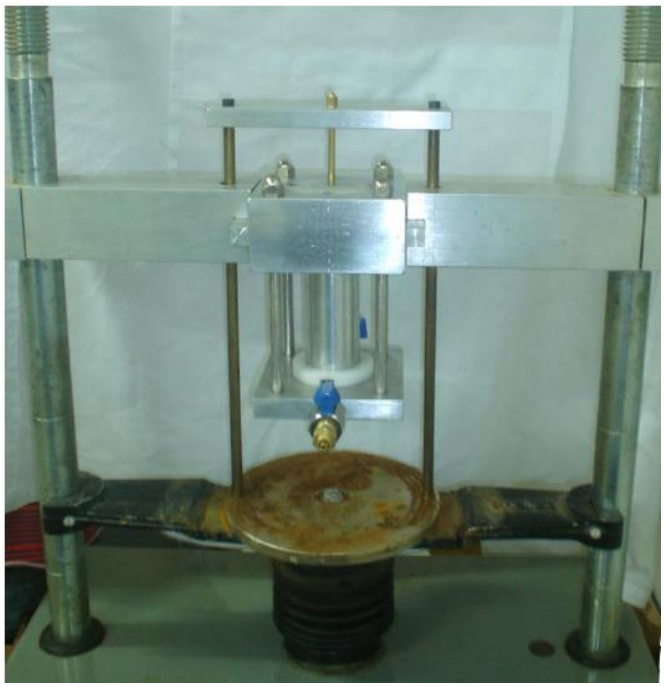


Figura 2.10 – Bomba de fluxo fixada à prensa (Guimarães, 2008).

O ensaio para determinação da curva de retenção de água pode ser realizado utilizando a bomba de fluxo em dois ciclos: o primeiro retirando água a partir de um corpo de prova inicialmente saturado (ciclo de drenagem ou de secagem) e o segundo usando o processo inverso que seria injetando água (ciclo de saturação ou de umedecimento) a partir do corpo de prova quase seco inicialmente. Com esses dois procedimentos, é possível prover parâmetros de fluxo para análises de drenagem e saturação e as curvas de histerese.

Os valores de saturação para qualquer tempo são obtidos dos dados de sucção x tempo por meio do ensaio. Conhecendo-se a velocidade de fluxo aplicada no corpo de prova, o tempo de duração do ensaio e as propriedades do material, o grau de saturação da

amostra em qualquer estágio do ensaio pode ser calculado de acordo com a Equação 2.6.

$$S = 1 - \left(\frac{q \, \Delta t}{n V} \right) \tag{2.6}$$

em que q é a vazão de fluxo aplicada; Δt o intervalo de tempo; n a porosidade do corpo de prova; V o volume total do corpo de prova.

2.3.6. MODELO ANALÍTICO

Alternativamente, a curva característica pode ser obtida por meio da adoção de um modelo analítico para a determinação da relação constitutiva $S=S(\psi)$ ou $\theta=\theta(\psi)$. Um dos modelos mais comumente utilizados com este objetivo é o modelo proposto por (Van Genuchten, 1980), que apresenta a seguinte forma geral (em função de S ou θ) conforme Equação 2.7.

$$S = S_r + \left(\frac{1 - S_r}{1 + (\alpha \psi_t)^{\beta}} \right)^m \tag{2.7}$$

$$m = 1 - \left(\frac{1}{\beta} \right) \tag{2.8}$$

em que S é o grau de saturação da amostra; S_r é o grau de saturação residual da amostra; ψ_t a sucção total e α, β e m, parâmetros do modelo, que podem ser obtidos por um algoritmo de ajuste da curva.

2.4. TEMPERATURA

Conforme citado por (Duarte 2004, De Campos 1979 e Rabe 1998) apresentam uma revisão detalhada sobre como os parâmetros de um solo são afetados pela variação de temperatura. Estes dois autores relataram sobre a influência da temperatura nos

parâmetros de permeabilidade, variação de compressibilidade do solo, mudança de poro pressão e variação nos parâmetros de resistência.

De acordo com (Duarte 2004, De Campos 1979) concluiu que o coeficiente de permeabilidade cresce com o aumento de temperatura. Correções para o coeficiente de permeabilidade baseados nos efeitos de variação da viscosidade da água pura com a temperatura deram bons resultados. O autor pondera que se as mudanças no índice de vazios com a temperatura são significantes, então tais alterações no índice de vazios precisam ser consideradas na correção da permeabilidade.

Foi verificado por Hopmans e Dane (1986) que ocorre variação nas curvas características de sucção com a temperatura, concluindo que os efeitos combinados das variações de volume de ar ocluso e da tensão superficial com a temperatura podem minimizar a variação com a temperatura.

Towhata *et al.* (1993) verificaram que o aquecimento induz a uma contração instantânea do volume de solo, e que, a contração volumétrica é independente dos níveis de tensões aplicados e do OCR.

2.4.1. EFEITOS DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

Há poucos dados na literatura que correlacionam a variação de permeabilidade de solos com temperatura. Porém, de acordo com estudos realizados por alguns estudiosos e ainda com observações de campo sabe-se que a temperatura influencia o comportamento hidráulico dos solos. Assim, neste item serão abordadas determinadas considerações de acordo com a pesquisa realizada por Duarte (2004) para a elaboração de sua tese.

Conforme citado por Duarte (2004), Romero *et al.* (2001) estudaram os efeitos da temperatura no comportamento hidráulico de uma argila não-saturada. Os ensaios foram realizados em células edométricas de temperatura e sucção, controladas com aplicação de altas temperaturas. Curvas características a diferentes temperaturas mostraram que a

sucção total apresentou uma redução com acréscimo de temperatura à umidade constante. A temperatura também influenciou a permeabilidade, sendo mais relevante para elevados graus de saturação. Para graus de saturação inferiores a 75% o efeito da temperatura deixa de ser notado. Os autores ainda concluíram que não somente a variação da viscosidade com a temperatura influencia a permeabilidade. Foram observados que os efeitos termo-químicos, de distribuição de porosidade, e ainda, que a química do fluído permeante, são relevantes para a permeabilidade.

Taylor (1948), de acordo com Duarte (2004), desenvolveu uma equação para determinação do coeficiente de permeabilidade (*k*) onde foi assimilado o fluxo através do solo com a percolação de água por um conjunto de tubos capilares. Seus estudos conduziram a percepção de que a permeabilidade é afetada pelas características do permeante e do solo, sendo que estas conclusões e a referida equação seriam adequadas para representar o comportamento de solos granulares. Porém, quando se trata de solos muito finos, é necessário levar em conta as forças físico-químicas deste solo e a iteração argila-água.

Considerando-se as variações de permeabilidade de um solo com a temperatura, sendo a água o fluido permeante, pode ser usada a Equação 2.9.

$$k_1 \frac{\mu_1}{\gamma_1} = k_2 \frac{\mu_2}{\gamma_2} \tag{2.9}$$

em que os índices *1* e *2* representam diferentes temperaturas no solo; *k* é o coeficiente de permeabilidade de Darcy; μ é a viscosidade do permeante; γ é o peso específico do permeante.

Ainda conforme apresentado por Duarte (2004) a Figura 2.11 mostra a variação de μ e γ com a temperatura.

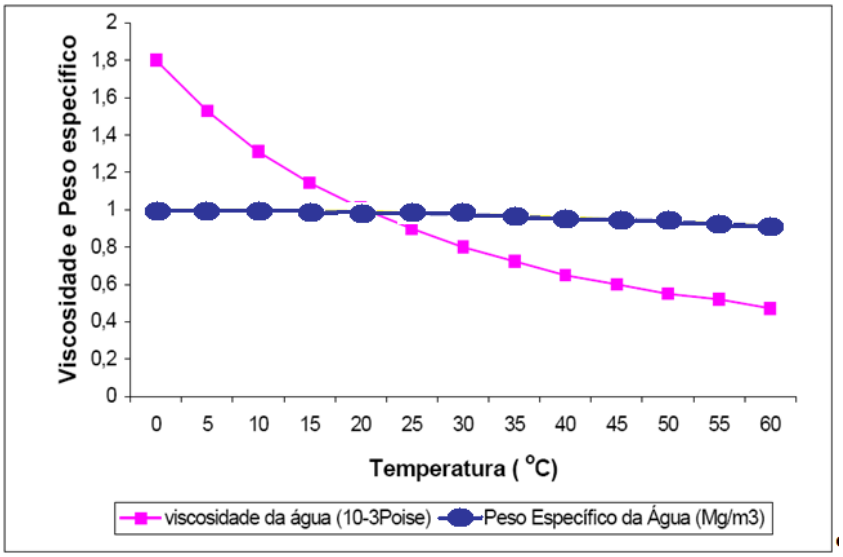


Figura 2.11 - Variação da viscosidade e peso específico da água com a temperatura (Duarte, 2004).

Com base na Figura 2.11 e analisando a Equação 2.9 é possível observar que os valores de *k* serão tanto maiores quanto maior for a temperatura. O peso específico da água sofre pouca alteração com o aumento da temperatura. Porém é observado que os valores para a viscosidade decrescem com o aumento da temperatura. Portanto, para manter a relação de igualdade estabelecida na Equação 2.9 será necessário aumento nos valores de *k*.

O coeficiente de variação de volume solo-temperatura pode ser obtido através de ensaios edométricos convencionais ou ensaios triaxiais por medição de variação de volume de vazios com o aumento de temperatura aplicada com a amostra previamente consolidada nas tensões efetivas de campo.

2.4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES SOLO-ÁGUA

O gradiente de temperatura do solo afeta as propriedades intrínsecas da água contida nos vazios do mesmo, como também a razão da água em movimento e outras propriedades solo-água. Na natureza sempre existe algum movimento de água dentro de um meio poroso (solo) como líquido ou vapor. Além disso, na transferência de calor, o movimento da água causa variações nas propriedades do solo devido a variações na

quantidade e tipo de água numa posição particular. Gradientes de temperatura induzem diretamente a migração de água. Estes também podem causar movimentos de água indiretos por se aumentar sucções potenciais e pressões osmóticas.

A temperatura tem um efeito significante, não somente na determinação da distribuição de fases (sólida, líquida ou gasosa), mas também por afetar as propriedades da água, seu movimento e o grau de interação com os minerais do solo. Na Tabela 2.2 estão apresentadas as propriedades físicas da água no estado líquido.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas da água em estado líquido (Duarte, 2004).

Temperatura (ºC)	**Densidade (g / cm³)**	**Tensão superficial (g/s²)**	**Calor de evaporação (cal / g)**	**Calor específico (cal/ gºC)**	**Condutividade térmica (W / m K)**
0	0,99987	75,6	597,3	1,0074	0,561
4	1,00000	-	-	-	-
5	0,99999	74,8	594,5	1,0037	0,573
10	0,99973	74,2	591,7	1,0013	0,586
15	0,99913	73,4	588,9	0,9998	0,594
20	0,99823	72,7	586,0	0,9988	0,603
25	0,99708	71,9	583,2	0,9983	0,611
30	0,99568	71,1	580,4	0,9980	0,619
35	0,99406	70,3	577,6	0,9979	0,628
40	0,99225	69,5	574,7	0,9980	0,632
45	0,99024	68,7	571,9	0,9982	0,640
50	0,98807	67,9	569,0	0,9985	0,645

A presença do vapor de água nos vazios do solo provoca um aumento da condutividade térmica aparente devido ao calor latente.

O efeito da temperatura na água do solo é importante, pois um aumento na temperatura provoca um aumento na energia cinética das moléculas de água e conduz à dispersão. Um pouco da água adsorvida pode se transformar em água livre e vice-versa. O equilíbrio da camada adsorvida é dinâmico e varia constantemente.

2.4.3. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO TERRENO

A temperatura em um perfil do solo é necessária para a solução das equações de umidade e fluxo de calor. A temperatura da superfície deve ser estimada, para condições onde não haja presença de neve, como mostrado na Equação 2.10 de acordo com Wilson (1990):

$$T_t = T_a + \left(\frac{1}{\upsilon \, f(u)_t} \right) (Q_{er} - E_v) \qquad (2.10)$$

em que T_t é a temperatura na superfície do solo (ºC); T_a é a temperatura do ar acima da superfície do solo (ºC); υ é uma Constante Fisicrométrica; Q_{er} é a rede de energia radiante (menos energia de transpiração) disponível na superfície (mm/dia); E_v é o fluxo evaporativo vertical (mm/dia).

A $T_t = T_a + \left(\frac{1}{\upsilon \, f(u)_t} \right) (Q_{er} - E_v)$ (2.10)

mostra basicamente que a temperatura do terreno é aumentada pela energia que não for consumida no processo de evaporação ou transpiração.

Uma fração do saldo de radiação é absorvida pela superfície do solo, consequentemente, ocorre elevação da temperatura da superfície do solo (aquecimento). Este aumento da temperatura dá origem a um gradiente térmico no interior do solo, isto é, a temperatura na superfície é maior do que nas camadas abaixo da superfície do solo. Em função disto, haverá a transferência de energia da superfície para o interior do solo. Esta transferência de energia é realizada pelo processo de condução térmica. A condução térmica é um processo de transferência de energia no qual a energia é transferida de molécula para molécula, sem que haja deslocamento das moléculas de sua posição original. Por esta razão, normalmente os corpos mais densos apresentam mais facilidade para conduzir a energia. Quando o solo é umedecido ocorre uma melhora na sua capacidade de conduzir energia, pois o ar (quase um isolante) é substituído pela água, que conduz melhor a energia.

2.5. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica é definida como a capacidade de um meio poroso em transmitir o fluido.

Como já mencionado, no meio saturado a condutividade hidráulica é função das propriedades do fluido e do meio poroso, enquanto que no meio não saturado a condutividade hidráulica está associada também ao grau de saturação (Freeze e Cherry, 1979). Quando o solo está saturado, todos os poros estão preenchidos e são condutores, onde nesta condição a condutividade hidráulica é máxima. Quando o solo se encontra em um estado não saturado, alguns poros se tornam preenchidos de ar e a porção condutora da área transversal do solo decresce de forma correspondente.

Para a situação de saturação, os solos que apresentam permeabilidade mais alta são aqueles em que os poros grandes e contínuos representam a maioria do volume dos poros, enquanto os menos permeáveis são os solos em que o volume de poros consiste de numerosos microporos. Assim, solos arenosos conduzem água mais rapidamente que um solo argiloso. Nos solos com poros grandes, esses poros esvaziam rapidamente e se tornam não condutores, a medida que a carga de pressão se torna mais negativa, então a alta condutividade hidráulica inicial decresce abruptamente. Por outro lado, em solos com poros pequenos, vários poros permanecem preenchidos e condutores mesmo a uma carga de pressão muito negativa. Assim, a condutividade hidráulica decresce suavemente e pode ser maior que a de solo com poros grandes, mesmo submetidos à mesma carga de pressão.

2.5.1. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A função de condutividade hidráulica pode ser determinada a partir de resultados de ensaios experimentais, sejam estes realizados em campo ou em laboratório, ou a partir de modelos matemáticos, fazendo uso das propriedades de volume/massa do solo, de

sua curva de retenção e condutividade hidráulica saturada, sendo este último o mais usual tendo em vista as dificuldades na obtenção experimental (Marinho, 2005).

A medição da condutividade hidráulica pode ser realizada em laboratório pela imposição de fluxo sobre uma amostra de solo. A célula que comporta a amostra é denominada permeâmetro, que pode ser de paredes rígidas e ou flexíveis.

Os permeâmetros de parede rígida são constituídos por um tubo rígido que contém o corpo de prova a ser ensaiado, fixado entre duas placas, conforme mostrado na Figura 2.12.

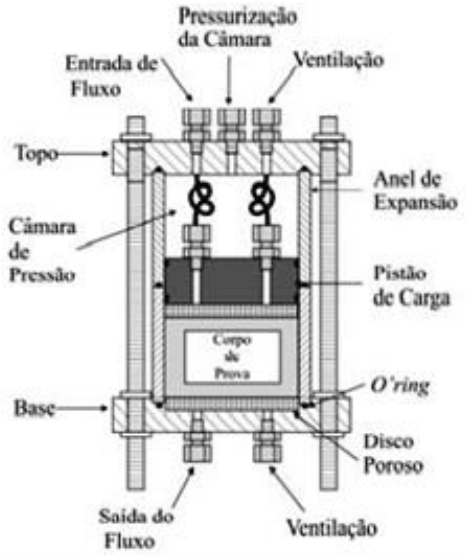


Figura 2.12 – Permeâmetro de parede rígida (Daniel, 1994; citado em Alonso, 2005).

Os permeâmetros de parede rígida permitem ensaiar amostras de grandes dimensões. Porém, não é possível ter controle sobre as tensões que estão agindo na amostra, além de existir a possibilidade de fluxo do fluido no contato com a parede rígida. O fluxo ao longo do contorno rígido pode ser de particular importância quando se ensaiam amostras com líquidos que possam acarretar contração do corpo de prova. Nesses casos, é criado um canal de fluxo preferencial entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro, gerando um fluxo não uniforme. O permeâmetro mostrado na Figura 2.12 é do tipo cilindro de compactação. Este instrumento tem como característica o fato do

solo a ser ensaiado ser compactado no próprio tubo em que se realizará a percolação. Assim, o fluxo preferencial entre a parede do permeâmetro e o *CP* (corpo de prova) é minimizado devido à compactação do material no próprio corpo do permeâmetro. A vedação entre os encaixes é garantida por anéis.

Os permeâmetros de parede flexível, de acordo com a ASTM D5084 – 90 (1990) são equipamentos utilizados para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos, cujo valor seja menor ou igual a 10^{-3} cm/s. Há três procedimentos distintos para este método de ensaio: carga constante, carga variável ou fluxo constante. Por meio destes sistemas é possível medir parâmetros necessários para o cálculo da condutividade hidráulica. Com este método de ensaio, o fluxo preferencial nas paredes do permeâmetro, como é o caso dos permeâmetros de parede rígida, é eliminado, diminui o tempo de saturação da amostra e a saturação é mantida durante todo o ensaio.

Os ensaios de permeabilidade com permeâmetro de parede flexível possuem algumas limitações, como: (a) a amostra ensaiada nem sempre representa a real situação de campo (o efeito escala); (b) durante o ensaio, alguns erros podem ser introduzidos, entre eles: introduzir ar na amostra saturada, adensamento do corpo de prova, e ainda, o crescimento de microorganismos em ensaios de longa duração, entre outros, de acordo com Alonso (2005).

Este tipo de permeâmetro é constituído por uma câmara em que no interior é posicionado o *CP* entre duas pedras porosas envolto em uma membrana flexível, como apresentado na Figura 2.13.

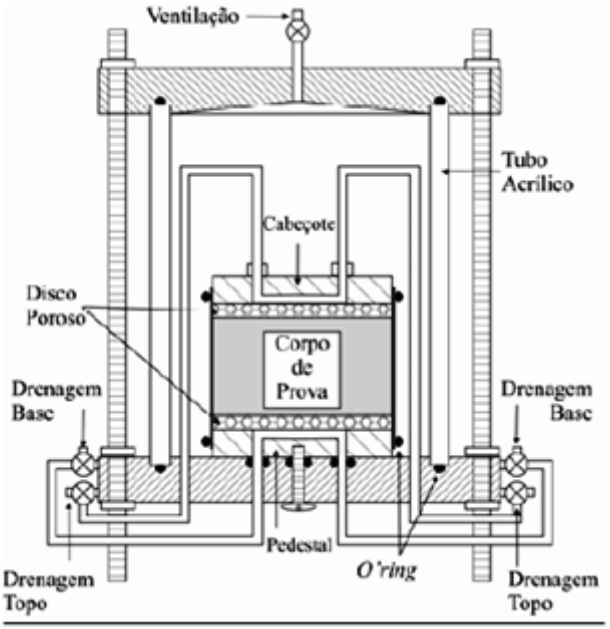


Figura 2.13 – Permeâmetro de parede flexível (Daniel *et al*. 1984; citado em Alonso, 2005).

A dupla drenagem no cabeçote e no pedestal tem como finalidade facilitar a saturação das pedras porosas e das linhas condutoras de fluxo. Após a montagem descrita acima, é realizado o enchimento da câmara e a aplicação de pressão confinante no seu interior, que pressiona a membrana flexível contra o *CP*, de forma que durante o ensaio não ocorra fluxo entre a membrana e o *CP*. Ao mesmo tempo em que se aumenta a pressão na câmara, uma pressão interna é aplicada no *CP*, denominada contra pressão, sendo que a diferença entre a pressão interna e externa do *CP* constitui a tensão efetiva durante o ensaio. O procedimento descrito de aumento da pressão confinante e contra pressão tem como objetivo a saturação da amostra e é conhecido como saturação por contra pressão. Assim, o ar ocluso nos poros da amostra ensaiada é dissolvido na fase líquida, em um processo que pode gastar poucas horas ou vários dias, dependendo principalmente da matriz do solo.

2.5.2. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Devido às dificuldades existentes na determinação experimental, numerosas tentativas têm sido realizadas para obter a função de condutividade hidráulica para solos não

saturados a partir da condutividade hidráulica do solo saturado e da curva de retenção de água do solo. Esta abordagem é baseada no fato de que, tanto a função de condutividade hidráulica quanto a curva característica de sucção, são função da distribuição do tamanho dos poros, de acordo com Fredlund *et al*. (1994).

A seguir serão descritos dois métodos para obtenção da função de condutividade hidráulica. Estes métodos são utilizados pelo módulo Vadose que serão realizadas as análises numéricas deste trabalho.

2.5.2.1. Método de Fredlund, Xing e Huang (1994)

O método estudado por Fredlund *et al*. (1994) desenvolve a função de condutividade hidráulica não saturada a partir da condutividade hidráulica saturada e da integração ao longo de toda a curva de retenção de água do solo. O método utiliza a faixa de poro pressões negativas compreendida entre 0 a 10^6 kPa, que elimina a necessidade de determinar o teor de umidade residual, normalmente exigido em outros métodos. Os autores afirmam que o método é mais preciso para solos arenosos do que para solos argilosos. A Equação 2.11 apresenta o método mencionado.

$$k_{\psi} = k_s \left(\frac{\sum_{i=j}^{N} \frac{\theta\left(e_n^{\,y}\right) - \theta(\psi)}{\left(e^{yi}\right)} \theta'\left(e_n^{\,yi}\right)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{\theta\left(e_n^{\,y}\right) - \theta_s}{\left(e_n^{\,yi}\right)} \theta'\left(e_n^{\,yi}\right)} \right) \tag{2.11}$$

em que k_s é a condutividade hidráulica saturada obtida em laboratório; θ é o teor de umidade volumétrico; y é a variável de integração, representada pelo logaritmo da sucção; j a menor sucção descrita na função final; N é a maior sucção descrita na função final; ψ a sucção correspondente; e_n é o número natural (2,71828); s é a inclinação da linha tangente para a função que passa através do ponto de inflexão; θ' a primeira derivada da Equação 2.12:

$$\theta = C(\psi)\ \frac{\theta_s}{\left\{ln\left[e+(\psi/a)n\right]\right\}^m} \tag{2.12}$$

em que *a* é o valor de entrada de ar do solo; *n*, *m* são parâmetros de ajuste à curva sucção x teor de umidade volumétrico; *C(ψ)* é a correção da função definida como mostrado na Equação 2.13.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1+\frac{\psi}{C_r}\right)}{\ln(1+1000000/C_r)} \tag{2.13}$$

em que C_r é uma constante da matriz de sucção, correspondente ao valor de teor de umidade volumétrico residual (valor normalmente usado de 1500 kPa).

O método exposto por Fredlund *et al.* (1994) só é funcional se forem conhecidos os valores de *a*, *n* e *m*. Em geral, os valores de *a*, *n* e *m* podem ser determinados usando um algoritmo de ajuste, sendo aplicados aos dados de pontos medidos. O programa de análise numérica utilizado neste trabalho possui esta habilidade.

2.5.2.2. Método de van Genuchten (1994)

Em 1980, van Genuchten propôs uma equação analítica para determinar a condutividade hidráulica não saturada k_ψ de um solo em função da sucção mátrica ψ, como apresentado pela Equação 2.14.

$$k_\psi = k_s \frac{\left[1-\left(a_p\psi^{(n-1)}\right)x\left(1+\left(a_p\psi\right)^n\right)^{-m}\right]^2}{\left[1+\left(a_p\psi\right)^n\right]^{m/2}} \tag{2.14}$$

em que k_s é a condutividade hidráulica na condição saturada; a_p, *n e m* são parâmetros para ajuste da curva de retenção.

Os parâmetros a_p, n e m podem ser estimados da função de teor de umidade volumétrico considerando-se um ponto P eqüidistante do teor de umidade volumétrico nas condições saturada e residual.

Embora a terminologia dos parâmetros a_p, n e m seja semelhante às de Fredlund e Xing (1994), as definições são ligeiramente diferentes. O parâmetro a_p, em particular, não pode ser estimado pelo valor de entrada de ar, mas em vez disso, é um ponto central sobre o qual o parâmetro n altera a inclinação da função. O parâmetro m afeta a forma da porção inclinada da curva quando ela atinge o patamar mais baixo. O método de van Genuchten só pode ser usado quando os parâmetros de ajuste da curva são conhecidos, mas há algumas referências para estes valores na literatura que podem ser aplicados no modelo.

2.6. INFILTRAÇÃO

A teoria clássica de infiltração usada em engenharia descreve fluxo de líquido isotérmico em meios porosos como uma função de energia mecânica (carga) e propriedades dos materiais (permeabilidade e coeficiente de armazenamento). Balanço de energia e transferência de vapor no solo e na superfície são ignorados.

Freeze (1969), citado por Wilson (1990), define infiltração como a entrada de água no solo disponibilizada na superfície do terreno, juntamente com o fluxo descendente associado.

A disponibilidade de água para a superfície do terreno é uma função da precipitação e a perda por interceptação, ou seja, água que é capturada, armazenada e que retorna para a atmosfera sem atingir a superfície do terreno.

O coeficiente máximo de infiltração em qualquer ponto no tempo é definido como “a capacidade de infiltração”. No tempo igual a zero, a capacidade de infiltração inicial do solo é alta. Com o passar do tempo, a capacidade de infiltração diminui quando o solo se torna mais úmido. Assim, a capacidade de infiltração diminui a um coeficiente

mínimo se a duração e intensidade de chuva forem suficientes para estabelecer esta condição.

2.6.1. TAXA DE INFILTRAÇÃO

A taxa de infiltração máxima pelo tempo é definida por uma curva limitante para cada solo. A força que governa a entrada de água no solo é a soma do gradiente piezométrico e do gradiente gravimétrico (ou seja, o gradiente hidráulico) entre a frente de umedecimento e a superfície do solo.

De acordo com Oliveira (2003), Koorevaar *et al*. (1983) definiram que a infiltração cumulativa, *I*, é o volume de água que infiltrou no solo por unidade de área de infiltração, como apresentado na Equação 2.15.

$$I = \int_{y_f=0}^{\infty} (\theta_v - \theta_i) dy \tag{2.15}$$

em que y_f é a distância na direção do fluxo; θ_v é o teor volumétrico de água; θ_i é o teor volumétrico de água inicial.

Se a taxa de precipitação menos a água que é interceptada ultrapassar a capacidade de infiltração, ocorre a produção de escoamento superficial (*runoff*).

2.6.2. MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO NO SOLO

Há uma variedade de métodos disponíveis para a medida da taxa de infiltração no solo, como:

- Medidas diretas;
- Métodos empíricos;
- Teoria de fluxo em solos não saturados.

2.6.2.1. Medidas Diretas

Medida direta da taxa de infiltração pela superfície do solo é obtida através do uso de infiltrômetros, como mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Infiltrômetro de duplo anel.

A infiltração vertical da água no solo é classicamente estudada utilizando-se o infiltrômetro de duplo anel, onde se inunda uma superfície de solo com cilindros concêntricos de 20 e 40 cm, encravados no solo cerca de 5 cm. Mantendo-se uma lâmina d'água de 2 a 15 cm de altura dentro dos anéis, confere-se um potencial ligeiramente positivo, mas que na prática é considerado nulo. As medidas de infiltração são feitas no cilindro interno, sendo o externo apenas para diminuir os chamados efeitos de bordadura e infiltração lateral. Um preciso dispositivo com bóia e indicador de nível com 0,2 mm de precisão, indica o nível d'água "h_i" dentro do cilindro interno.

2.6.2.2. Métodos Empíricos

Métodos empíricos para medida da taxa de infiltração têm sido desenvolvidos por diversos estudiosos ao longo do tempo. Oliveira (2003) cita que de acordo com Rawls *et al*. (1993) alguns dos modelos mais comuns são o de Kostiakov (1932), o modelo de Horton (1940) e o modelo de Holtan (1961).

De acordo com Oliveira (2003), Kostiakov (1932), citado por Libardi (1995), propôs uma equação simples e que relaciona a taxa de infiltração com o tempo através de uma equação exponencial de decaimento, como mostrado na Equação 2.16.

$$i_t = i_i \, t^{-\alpha} \tag{2.16}$$

em que i_i é a taxa de infiltração inicial; α é uma constante de ajuste, determinada empiricamente a partir de observações de i e t.

Horton (1940), citado por Wilson (1990), propôs uma equação baseada em três parâmetros. Nesta equação, a taxa de infiltração pode ser relacionada ao tempo de acordo com a Equação 2.17.

$$i_t = f_c + \left(f_0 - f_c \right) e^{-\beta_d t} \tag{2.17}$$

em que f_c é a capacidade de infiltração (taxa de infiltração quando $t = \infty$); f_0 é a taxa de infiltração máxima (inicial); β_d é a taxa de decréscimo da taxa de infiltração.

Os métodos diretos e empíricos de avaliação das taxas de infiltração apresentados anteriormente são empregados a uma variação limitada de aplicação. Estes métodos estabelecem o coeficiente de entrada de água no solo, mas não descrevem alterações subseqüentes nas pressões de água ou coeficientes de fluxo no solo abaixo da superfície do terreno. Portanto, é possível afirmar que métodos como estes são utilizados para tratar de problemas em hidrologia de superfície e irrigação. No entanto, não se apresentam de forma satisfatória às necessidades para aplicações geotécnicas. Assim, será apresentada no próximo item uma forma mais geral e rigorosa de calcular a taxa de infiltração em que é possível atender às condições de geotecnia de maneira mais apropriada.

2.6.2.3. Teoria de Fluxo em Solos Não Saturados

Freeze & Cherry (1979) afirmam que o tipo de abordagem que exerce a combinação do fluxo interno de água com a taxa de precipitação aplicada na superfície é a única forma de representar adequadamente a complexidade do fluxo em sistemas reais. Solucionando um problema real em que foi utilizado o método das diferenças finitas, por meio do emprego da equação do fluxo interno desenvolvida por Richards (1931), os resultados obtidos mostraram o caráter transiente do teor de umidade, do potencial piezométrico e da carga hidráulica em um perfil de solo de 100 cm.

A seguir serão apresentadas as equações diferenciais parciais que regem os fluxos internos no solo mostrando as teorias existentes que descrevem o fluxo interno de massa e calor nestes meios.

Conforme citado por Oliveira (2003), em 1856, Henry Darcy determinou experimentalmente uma relação entre fluxo através de areias e os gradientes hidráulicos associados, ficando então esta relação conhecida como *Lei de Darcy*, conforme mostrado pela Equação 2.18. O estudo desenvolvido por Darcy é comumente utilizado para descrever o fluxo em solos saturados, no entanto, é utilizado também na análise do fluxo em solos não saturados. Assim, como mostrado na Equação 2.19 é apresentada a condição da *Lei de Darcy* para a situação não saturada, sendo conhecida como Lei de Darcy-Buckingham.

$$v = - k_s \frac{\partial h}{\partial z} \tag{2.18}$$

$$v = - k_\psi \frac{\partial h}{\partial z} \tag{2.19}$$

em que v é a vazão específica (velocidade aparente); h é a carga hidráulica; k_s é o coeficiente de permeabilidade de solos saturados; k_ψ é o coeficiente de permeabilidade de solos não saturados.

Richards (1931) utilizou o conceito apresentado por (Buckingham, 1907) e aplicou o princípio de continuidade para derivar a equação governante de fluxo transiente de água líquida em solo não saturado e cuja variável independente é a carga hidráulica, conforme apresentado pela Equação 2.20, que é chamada de Equação de Richards.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{\psi} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \tag{2.20}$$

Considerando o fluxo em um solo saturado, o coeficiente de permeabilidade da Equação 2.20 se torna constante e então esta equação pode ser expressa como mostrado pela Equação 2.21.

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s \frac{\partial h}{\partial z} \right) \tag{2.21}$$

Considerando o caso de fluxo estacionário em solos saturados, a equação anterior fica como apresentado pela Equação 2.22, conhecida como Equação de Laplace.

$$k_s \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{2.22}$$

Ainda de acordo com Oliveira (2003), Philip (1957), citado por Wilson (1990), apresenta uma equação cuja amplitude de valores de θ varia entre 0 e aproximadamente 0,5. Como desvantagem desta equação é o fato de ser considerado que a matriz do solo é rígida, ou seja, o volume de vazios permanece constante, o que a torna de difícil utilização em certos problemas de engenharia geotécnica, onde há a necessidade de prever variações de volume.

Oliveira (2003) cita que uma aplicação da equação de fluxo transiente saturado, na qual é levada em consideração a variação de volume do solo, é estabelecida na teoria de adensamento unidimensional de Terzaghi (1943), como mostrado na Equação 2.23.

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = \frac{k_s}{m_v \, \gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} \tag{2.23}$$

em que u_w é a poro pressão de água; m_v é o coeficiente de variação volumétrica; γ_w é o peso específico da água.

2.7. EVAPORAÇÃO

Evaporação é o processo físico no qual um líquido ou sólido passa ao estado gasoso, devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Além da radiação solar, outras variáveis como: temperatura do ar, vento e pressão de vapor, também interferem na evaporação principalmente em superfícies de água livre. A evaporação pode ocorrer a partir de superfícies de água livre ou de solos não vegetados.

De acordo com Oliveira (2003), a evapotranspiração é definida por Veihmeyer (1964) como o processo pelo qual a água, seja evaporando de superfícies úmidas ou transpirando de plantas, é transformada para o estado de vapor, através da transferência de calor. A transpiração ocorre através das plantas. O processo de transpiração não será relatado e também não será incluído nas análises numéricas que serão desenvolvidas, em que será adotado solo sem cobertura vegetal.
O Sistema Computacional Geostudio 2007, módulo Vadose, que será utilizado neste estudo, determina o valor da evaporação real por meio de uma conexão entre a umidade e o estado de tensão de calor na superfície do terreno com as condições climáticas presentes acima da superfície do terreno.

Tradicionalmente, a modelagem de fluxo evaporativo tem se limitado a métodos que determinam o coeficiente de fluxo unitário de evaporação baseado em um valor de Evaporação Potencial (*EP*). (*EP*) é função de uma complexa mistura de parâmetros multiplicada pela diferença entre a pressão de vapor de saturação na superfície do terreno e aquela no ar acima do terreno. Esta forma aproximada se baseia no método amplamente utilizado de Penman (1948), o qual assume que a superfície do terreno está sempre saturada. Outros métodos, como Thornthwaite (1948), baseado na temperatura,

e o método Priestly-Taylor (1972), baseado em energia, também prevêm (*EP*), porém para locais específicos e novamente consideram que a superfície do terreno está saturada, o que nem sempre representa a situação real, conforme relatado por Wilson (1990).

2.7.1. MÉTODOS CLIMATOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REGIONAL

A evaporação pode ser medida diretamente (usando equipamentos simples e ou equipamentos sofisticados) ou então é computada com base em dados microclimáticos detalhados. Dados climáticos detalhados ou dados de medidas de campo diretas usualmente não estão disponíveis. Diante disso, é difícil, por exemplo, estimar fluxos evaporativos para o local do projeto de disposição de estéril permanente com base de dados coletados durante uma ou duas estações (Wilson, 1990).

Métodos climatológicos para prever evaporação são mais aceitáveis para diversas aplicações em engenharia geotécnica. Isto pode ser atribuído principalmente ao fato de que estes métodos requerem somente dados climáticos de rotina tais como, temperatura média e umidade relativa. Métodos climatológicos para estimativa de evaporação e evapotranspiração fornecem uma estimativa regional. Em outras palavras, eles tendem a combinar os efeitos de múltiplos microclimas em uma escala regional. Vários métodos climatológicos para avaliação da evaporação potencial ou evapotranspiração estão disponíveis. Os métodos mais comumente usados em engenharia prática são:

- O Método Thornthwaite;
- O Método Penman.

2.7.1.1. Método de Thornthwaite

O método Thornthwaite é uma equação baseada na temperatura do ar a qual fornece mensalmente estimativas de evapotranspiração potencial.

Thornthwaite considerou condições meteorológica tais como radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento para serem os fatores dominantes controlando evapotranspiração quando comparados aos fatores vegetação e solo, (Thornthwaite e Mather, 1955) de acordo com Wilson (1990). Thornthwaite, além disso, conforme relatado por Wilson (1990), modificou esta abordagem climatológica na tentativa de identificar os parâmetros mais estáveis ou parâmetros meteorológicos conservadores para estimar evapotranspiração potencial. Parâmetros tais como umidade relativa e radiação solar não são confiáveis e não deveriam ser incluídos na formulação. Thornthwaite fundamentou o significado da temperatura mensal por ser o parâmetro mais estável pelo fato de ser uma função da radiação solar e da umidade disponível. A fórmula de Thornthwaite para estimativa da taxa de evapotranspiração potencial mensal.

$$E = 1{,}6\left(\frac{10\overline{\overline{T_a}}}{I_c}\right)^a \tag{2.24}$$

em que E é a taxa de evapotranspiração mensal (cm); $\overline{\overline{T_a}}$ temperatura média mensal do ar (ºC); a é um índice que se ajusta a cada região, dado pela fórmula $a = 6{,}75\text{x}10^{-7}\ I^3 - 7{,}71\text{x}10^{-5}\ I^2 + 1{,}792\text{x}10^{-2}\ I + 0{,}492$; I_c é um índice de calor, dado pela soma dos 12 valores mensais de i_c , índice mensal, que pode ser obtido da Equação 2.25.

$$i_c = \left(\frac{\overline{\overline{T_a}}}{5}\right)^{1{,}514} \tag{2.25}$$

O método de Thornthwaite é apontado como um método simples, que não requer dados sofisticados, mas que apresenta algumas limitações. Ele pode ser considerado altamente errôneo em um intervalo de tempo curto onde o significado mensal de temperatura não possa refletir a quantidade de entrada de radiação solar em um dado dia qualquer. Em termos gerais, o método de Thornthwaite está limitado à estimativa de evapotranspiração potencial de áreas com grande escala sobre períodos de pelo menos um mês.

2.7.1.2. Método de Penman

De acordo com Wilson (1990), Penman (1948), propôs um método de cálculo da evapotranspiração potencial por meio do uso de equações que consideram balanço de energia e transferência de massa simultaneamente. A proposta de cálculo do coeficiente de evaporação é apresentada pela Equação 2.26. Penman combinou os dois métodos, valendo-se da razão de Bowen, que relaciona evaporação com calor sensível (Oliveira, 2003).

$$EP = \frac{Q_n \Delta + E_a \eta}{\Delta + \eta} \tag{2.26}$$

em que EP é a taxa de evapotranspiração potencial em mm/dia; Q_n é a radiação líquida total na superfície do solo em mm/dia; Δ é a inclinação da curva pressão de saturação de vapor x temperatura, na temperatura média do ar, mmHg/ºC; E_a é a evaporatividade do ar à sombra, obtida trocando-se $u_v = u_{v0}$ em $E = f_v (u_v - u_v^a)$; u_{v0} é a pressão de saturação de vapor na temperatura do ar; η constante psicrométrica mmHg/ºC.

Há algumas restrições na formulação de Penman. Primeiramente, o método não é confiável em áreas sujeitas a forte advecção horizontal de calor sensível, que é o tipo de calor cujo fluxo é realizado por condução ou convecção. Em segundo lugar, a fórmula de Penman requer uma correção quando aplicada a evapotranspiração sobre condições onde água não esteja livremente disponível. Em geral, o método de Penman super estima evapotranspiração quando aplicado a regiões secas. Finalmente, a forma presente da equação de Penman ignora aquecimento do terreno e da subsuperfície do solo. Esta deve ser uma condição razoável quando a superfície do terreno estiver molhada. No entanto, fluxos de calor subsuperficiais significantes podem ocorrer sobre condições de solo seco (Wilson, 1990).

2.7.2. MEDIDAS DIRETAS E MÉTODOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Os métodos normalmente utilizados para determinar a evaporação em termos de medidas diretas e métodos empíricos são:

- Evaporímetro;
- Evaporógrafo de Balança.

2.7.2.1. Evaporímetros

Os evaporímetros são instrumentos que possibilitam uma medida direta do poder evaporativo da atmosfera, estando sujeitos aos efeitos de radiação, temperatura, vento e umidade. Os mais conhecidos são os atmômetros e os tanques de evaporação.

- Atmômetros

São equipamentos que possuem um recipiente com água, conectado a uma placa porosa de onde ocorre a evaporação. Para ilustrar, podem ser citados os modelos de Piché, de Livingston e o de Bellani. O mais comum entre estes é o de Piché, e de acordo com Porto *et al*. (2000) é constituído de um tubo cilíndrico de vidro de 25 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro (Figura 2.15). O tubo é graduado e fechado em sua parte superior. A abertura inferior é obturada por uma placa circular de papel filtro padronizado de 30 mm de diâmetro e de 0,5 mm de espessura, fixado por capilaridade e mantido por uma mola. O aparelho é previamente cheio de água destilada, a qual se evapora progressivamente pela folha de papel filtro. A diminuição do nível de água no tubo permite calcular a taxa de evaporação.

Figura 2.15 – Modelo de atmômetro de Piché.

A energia para evaporação provém da radiação, transporte de calor sensível e condução de calor através do recipiente de abastecimento. A instalação, geralmente bem acima da superfície do solo e o meio circundante, afetam as reações deste aparelho, o que o torna pouco confiável. Além disso, o atmômetro de Piché é instalado em um abrigo para proteger o papel filtro da chuva e como conseqüência o aparelho não leva em conta a influência da insolação. Tem como pontos positivos a fácil instalação, operação e portabilidade.

- Tanques de Evaporação

Os tanques de evaporação têm sido utilizados por muitos anos para estimativas em reservatórios. A popularidade dos tanques é devida ao fato de serem relativamente baratos e de simples operação. Estes podem ser reunidos em quatro classes: enterrados, superficiais, fixos e flutuantes. O tanque classe A é um dos mais utilizados, como apresentado pela Figura 2.16 e pela Figura 2.17. O tanque possui uma forma circular com um diâmetro de 121,9 cm e profundidade de 25,4 cm. Construído em aço ou ferro galvanizado, deve ser pintado na cor alumínio e instalado numa plataforma de madeira a

15 cm da superfície do solo. Deve permanecer com nível de água variando entre 5,0 e 7,5 cm da borda superior. A taxa de evaporação, medida com auxílio de uma ponta linimétrica apoiada em um tranquilizador, é resultado das mudanças de nível de água no tanque, levando em consideração a precipitação ocorrida. A manutenção da água entre profundidades recomendadas, evita erros que podem chegar a 15% do valor determinado, quando, por exemplo, o nível de água estiver 10 cm abaixo dos níveis estabelecidos. Também a água dentro do tanque deve ser renovada regularmente para evitar a turbidez, responsável por erros que podem superar 5% dos valores determinados.

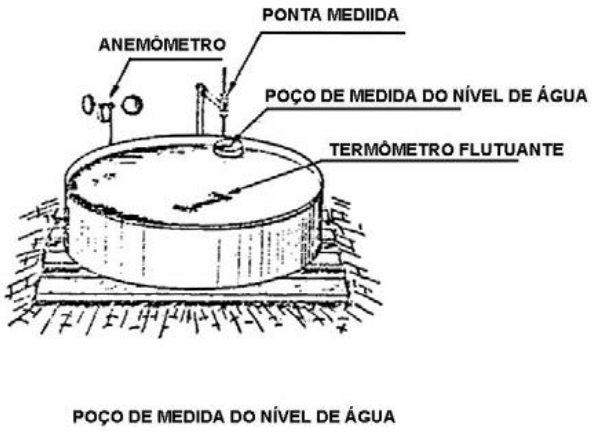


Figura 2.16 – Esquema de um tanque Classe A.

Figura 2.17 – Disposição em campo de um evaporímetro – Tanque.

O fato de o tanque ser instalado sobre o solo faz com que as paredes do mesmo sofram influência da radiação e da transferência de calor sensível, traduzindo-se num aumento da evaporação medida. Alguns estudos atribuem incrementos na temperatura de 2 a 5ºC e redução na umidade relativa de 20 a 30%, ao nível do tanque, quando instalados sobre pisos inadequados. Quando circundados por cultivos de elevada estatura, subestimam a evaporação. Os valores da evaporação medidos em tanques superam os obtidos em lagos e/ou reservatórios, devido às diferenças de volume, superfície, localização e também pelo fato do lago e/ou reservatório depender da variação do transporte de massa e balanço de energia, que influenciam os dias subsequentes, enquanto que no tanque, isto não ocorre. O fator que relaciona a evaporação de um reservatório e do tanque classe A oscila entre 0,6 e 0,8, sendo 0,7 o valor mais utilizado.

2.7.2.2. Evaporógrafo de Balança

É um aparelho composto por uma balança de precisão com prato próprio para colocação de água, e uma agulha sensível que registra as modificações na massa do prato. Inicialmente, o prato é cheio com uma determinada massa de água. À medida que essa água evapora, a agulha registra a variação de sua massa, construindo um gráfico de evaporação em mm por tempo. Por se tratar de um aparelho sensível, deve ser instalado sob um abrigo. Este aparelho é bastante utilizado na agricultura.

2.7.3. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA EVAPORAÇÃO

Os métodos para determinação indireta da evaporação que serão tratados neste item são:

- Transferência de Massa;
- Balanço de Energia;
- Balanço Hídrico.

2.7.3.1. Métodos de Transferência de Massa

Estes métodos são baseados em conceitos de mistura contínua e descontínua aplicado à transferência de massa na superfície que evapora. De acordo com Oliveira (2003), Penman (1948) dividiu os métodos de transferência de massa em semi-empíricos e aerodinâmicos.

Os métodos semi-empíricos são baseados na Lei de Dalton, que apresenta uma relação de diferença entre a pressão parcial de vapor da superfície evaporante e a pressão parcial de vapor do ar em contato com a superfície evaporante, como pode ser visto na Equação 2.27 apresentada por Oliveira (2003).

$$E = f_v \left(u_{vs} - u_v^a\right) \tag{2.27}$$

em que E é a evaporação na unidade de tempo, mm/dia; f_v é a função empírica envolvendo a velocidade do vento horizontal; u_{vs} é a pressão parcial de vapor na superfície de evaporação, mmHg; u_v^a é a pressão parcial de vapor no ar acima da superfície, mmHg.

A determinação da taxa de evaporação através do método de transferência de massa aerodinâmico considera a mistura turbulenta e transporte de vapor além da camada sublaminar na interface, e leva em conta a dependência da taxa de evaporação por unidade de área do tamanho e forma da área de teste, considerando ainda fatores climáticos. Penman (1948), de acordo com Oliveira (2003), apresenta uma proposta para obtenção do valor da evaporação total, como mostrado na Equação 2.28.

$$E_p(x_0, y_0) = C_t \left(\bar{u}_v - \bar{u}_v^a\right) u_2^{0,76}\, x_0^{0,88}\, y_0 \tag{2.28}$$

em que E_p é a taxa de evaporação total, em mm/dia; x_0,y_0 são as dimensões da área que evapora; C_t é uma constante relacionada com a temperatura absoluta; $\bar{u}_v^a$ é a pressão de

vapor do ar a uma altura suficiente para não ser afetada pela evaporação; u_2 é a velocidade do vento, a 2 metros de altura em relação a superfície em milhas/dia.

2.7.3.2. Método do Balanço de Energia

O método do balanço de energia é baseado no princípio da conservação de energia. A principal fonte de energia para a atmosfera terrestre é a radiação solar. Essa energia é refletida e absorvida no seu caminho pela atmosfera até o solo. A distribuição média da radiação solar incidente pode ser obtida a partir de informações sobre albedo (razão entre a radiação que é refletida e a radiação que chega), uso da terra, cobertura de nuvens, etc.

Parte da radiação que chega a terra é refletida e parte é absorvida. Como o planeta se encontra em equilíbrio térmico, a radiação absorvida é re-irradiada de volta para o espaço na forma de radiação de ondas longas, após passar por um processo de reciclagem, que envolve energia radiante, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Conforme citado por Oliveira (2003), o fluxo de calor sensível é o fluxo de calor por condução ou convecção, enquanto que o calor latente é a quantidade de calor por unidade de massa transferida durante uma mudança de fase, como por exemplo, o calor latente de vaporização (Halliday & Resnick, 1994). O calor latente é carregado pela água que evapora e o seu transporte pela atmosfera é a principal contribuição para o balanço de calor na terra.

O Balanço de Energia pode ser representado pela Equação 2.29, dada por Anderson e citada por Oliveira (2003).

$$Q_s - Q_r - Q_b - Q_h - Q_e = Q_\theta - Q_v \tag{2.29}$$

em que Q_s é a radiação solar incidente, W/m²; Q_r é a radiação solar refletida, W/m²; Q_b é a energia perdida por radiação de ondas longas, W/m²; Q_h é a energia conduzida para a atmosfera como calor sensível, W/m²; Q_e é a energia utilizada na evaporação, W/m²; Q_θ

é o aumento de energia armazenada, W/m²; Q_v é a energia transferida para o corpo através de outros processos, como condensação, chuva, percolação, etc., W/m².

Oliveira (2003) relata que o termo referente à transferência de calor sensível, $Q_{h,}$é de difícil medição direta. Através da utilização da constante de Bowen, que é definida como a razão entre a energia conduzida como calor sensível e a energia utilizada na evaporação, é possível eliminar o termo $Q_{h,}$. Desta forma, a taxa de evaporação pode ser medida como apresentado pela Equação 2.30.

$$E_b = \frac{Q_s - Q_r - Q_b - Q_\theta + Q_v}{\rho_w L_v \left(1 + R_B\right)} \tag{2.30}$$

em que E_b é a taxa de evaporação, m/s; ρ_w é a massa específica da água, kg/m³; L_v é o calor latente de vaporização, J/kg; R_B é a razão de Bowen.

2.7.3.3. Balanço Hídrico

Eagleson (1978), citado em Wilson (1990), apresenta uma definição para o sistema clima-solo-vegetação onde é colocado que vem sendo bastante reconhecido que estes sistemas estão dinamicamente conectados por processos físicos que produzem transporte de energia térmica e massa de água através da superfície do terreno.

Por sustentar a vida terrestre, o ciclo hidrológico deve ser considerado um dos ciclos mais importantes. Em uma maneira simples de definir, o ciclo hidrológico é a circulação contínua de água entre os oceanos, a atmosfera, a rocha e o solo. A Figura 2.18 apresenta de forma clara esta definição (Wilson, 1990).

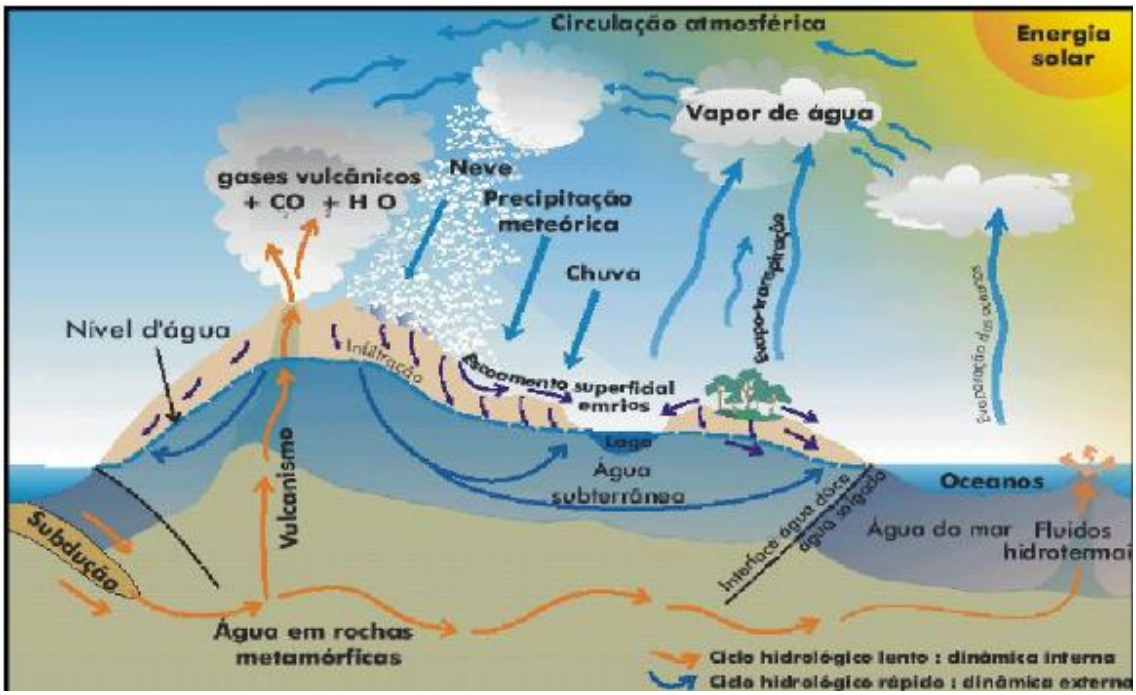


Figura 2.18 – Representação do Ciclo Hidrológico (Teixeira *et al*. 2001).

O ciclo hidrológico pode ser esquematizado como apresentado na Figura 2.19, por um ponto de vista da engenharia (Oliveira, 2003).

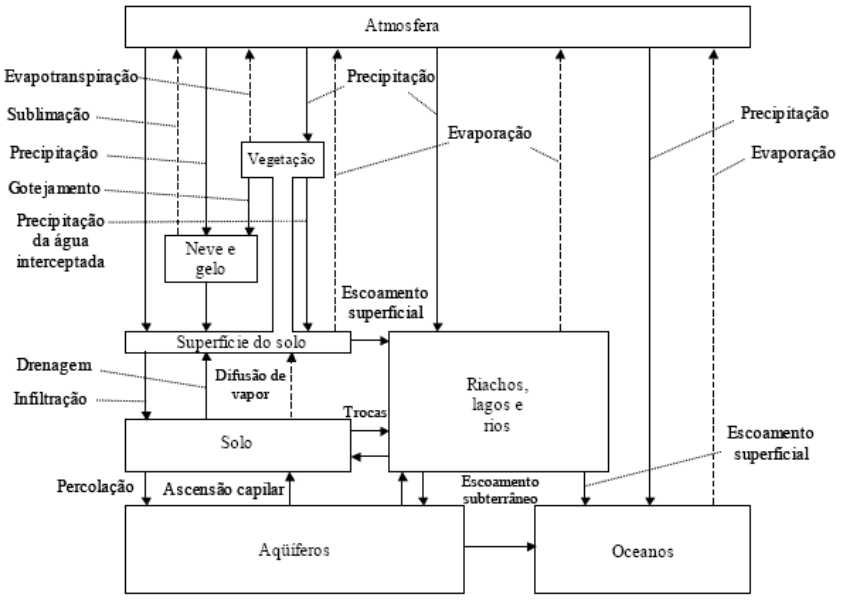


Figura 2.19 – Apresentação do ciclo hidrológico através de uma visão da engenharia (Eagleson, 1978) citado em (Oliveira, 2003).

De acordo com Oliveira (2003), para qualquer transformação dentro do ciclo hidrológico pode ser escrita a Equação 2.31.

$$I_f - Q = \Delta S \tag{2.31}$$

em que I_f é o fluxo de entrada, ou seja, toda a água que entra no volume de controle; Q é o fluxo de saída, sendo toda a água que sai do volume de controle; ΔS é a variação no armazenamento nas várias formas de retenção no volume de controle.

Ainda conforme mencionado por Oliveira (2003), Freeze e Cherry (1979) reescreveram a Equação 2.31 (Equação 2.32), sendo adaptada para períodos anuais.

$$P - E_m - Q_a = \Delta S_S + \Delta S_G \tag{2.32}$$

em que P é a precipitação média anual; E_m é a evapotranspiração média anual; Q_a é o escoamento médio anual; ΔS_s é a variação no armazenamento de reservatórios superficiais; ΔS_G é a variação no armazenamento de reservatórios subterrâneos.

Oliveira (2003) complementa ainda que em geral, caso seja tomada a média de muitos anos, pode ser considerado que, $\Delta S_s = \Delta S_G = 0$. Com esta definição a Equação 2.32 pode ser reescrita de modo que a evapotranspiração média anual possa ser obtida conforme apresentado pela Equação 2.33.

$$E_m = P - Q_a \tag{2.33}$$

Eagleson (1978), citado em Wilson (1990), fez uma proposta de uma definição mais rigorosa em que o balanço volumétrico de água por unidade de área em função do tempo é dada de acordo com a Equação 2.34.

$$\int_0^t \left\{ i(t) - e_T(t) - \frac{\partial}{\partial t}\left[V_{ss}(t) + V_{sg}(t) \right] \right\} dt = \int_0^t \left[r_s(t) + r_g(t) \right] dt = \int_0^t y(t)\,dt \tag{2.34}$$

em que *i(t)* é a intensidade de precipitação; $e_T(t)$ é a taxa de evapotranspiração; $V_{ss}(t)$ é o volume de armazenamento na superfície; $V_{sg}(t)$ é o volume de armazenamento subterrâneo; *dt* é o intervalo de tempo; $r_s(t)$ é a taxa de escoamento superficial; $r_g(t)$ é a taxa de escoamento subterrâneo; *y(t)* é a taxa de escoamento.

O uso de uma equação de balanço hídrico para estimar a evaporação é teoricamente correto, pois está alicerçado no princípio de conservação de massa. Na prática, as dificuldades para medir as variáveis limitam este procedimento. As imprecisões ficam por conta principalmente das contribuições diretas que aportam a um reservatório. Quando a variação da contribuição direta é grande, a imprecisão na sua avaliação pode produzir erros significativos na determinação da evaporação.

2.7.4. EVAPORAÇÃO REAL – FORMULAÇÃO DE PENMAN-WILSON (1990)

Uma função limitadora para a evaporação real do solo foi apresentada por Wilson *et al*. (1997) como mostrado pela Equação 2.35.

$$E_r = EP\left[\frac{h_r - \left(\frac{u_{v0}^a}{u_{v0_s}}\right)h_a}{1-\left(\frac{u_{v0}^a}{u_{v0_s}}\right)h_a}\right] \tag{2.35}$$

em que E_r é a taxa de evaporação real, mm/dia; h_r é a umidade relativa do ar na superfície do solo; u_{v0}^a é a pressão de saturação de vapor de água na temperatura do ar, mmHg; u_{v0_s} é a pressão de saturação de vapor de água na temperatura do solo, mmHg; h_a é a umidade relativa do ar. O valor da evaporação potencial *EP* é obtido através de qualquer método direto ou indireto.

O acoplamento atmosférico é alcançado pelo cálculo do fluxo evaporativo do solo baseado na formulação de Penman-Wilson (1990). Assim, realizando uma combinação entre a Equação 2.35 e a Equação 2.26 de Penman (1948), é possível promover a

inclusão da condição não saturada do solo e desta forma calcular a evaporação real, tal como relatado por Wilson (1990) e Wilson *et al*. (1994), conforme citado por Oliveira (2003). Esta condição é apresentada pela Equação 2.36.

$$E_r = \frac{Q_n \Delta + E_a \eta}{\Delta + \eta A} \tag{2.36}$$

em que E_a é a evaporatividade do ar à sombra, obtida conforme Equação 2.37, mm/dia; A é o inverso da umidade relativa do ar na superfície do solo, h_r.

$$E_a = f_v u_{v0_S} (B - A) \tag{2.37}$$

em que B é o inverso da umidade relativa do ar ($1/h_a$).

O valor de A que aparece na Equação 2.36 pode ser obtido através da Equação 2.38.

$$A = \frac{1}{h_r} = \frac{1}{e^{\frac{-\psi_t g \omega_V}{R T_L}}} \tag{2.38}$$

em que ψ_t é a sucção total, m; g é a aceleração da gravidade, m/s²; ω_v é a massa molecular do vapor de água, kg/mol; R é a constante universal dos gases, J/(mol·K); T_L é a temperatura do solo, K.

2.7.5. EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

De acordo com Wilson (1990), Freeze (1969) define evaporação como, “a remoção de água do solo pela superfície do terreno, juntamente com fluxo ascendente associado”. Esta definição não especifica os mecanismos nem os princípios de fluxo de vapor. Por exemplo, evaporação pela superfície do terreno é uma resposta a um déficit de vapor no ar acima da superfície do terreno (ou seja, é indicado que um gradiente de pressão de vapor precisa existir para estabelecer esta condição). O termo evaporação usualmente se refere a superfícies de água livre e de solo descobertas.

O processo pelo qual vapor de água é transferido para a atmosfera proveniente da água que está dentro das plantas é chamado transpiração. O termo evapotranspiração geralmente se refere a combinação de transpiração pelas plantas e a evaporação pelo solo onde elas estão plantadas. Wilson (1990) relata que é o processo de evaporação por superfícies de solos descobertas e evapotranspiração pelas superfícies de solos vegetados que atraem o interesse dos engenheiros geotécnicos. Entretanto, é importante citar a evaporação da água livre na superfície, pois ela forma uma base para a discussão de evaporação por superfícies de solos com ou sem vegetação.

Nos itens seguintes será realizada uma abordagem do processo de evaporação em determinadas condições da superfície, conforme mencionado em Wilson (1990).

2.7.5.1. Evaporação da água livre na superfície

A evaporação da água livre na superfície ocorrerá se a pressão de vapor no ar acima da água superficial for menor do que a pressão de vapor de saturação da água a uma dada temperatura. De acordo com (Wilson, 1990, Brutsaert, 1982) define a pressão de vapor de saturação "*u*", como, "a pressão de vapor no qual uma alteração na fase pode ocorrer a uma temperatura constante". Esta definição especifica uma condição particular de equilíbrio.

O coeficiente de evaporação da água livre em uma superfície depende da pressão de vapor na massa de ar acima da água (isto é, gradiente de energia) e do coeficiente de fluxo devido a difusão e a mistura turbulenta de moléculas de vapor de água no interior da massa de ar. Estes parâmetros formam a base para os métodos de transferência de massa usados para descrever a evaporação e já mencionado anteriormente.

2.7.5.2. Evaporação por superfícies de solos sem vegetação

Wilson (1990) apresenta que Hillel (1980) declara que existem três condições que devem predominar para o processo de evaporação. Primeiro, que um fornecimento

contínuo de energia deve estar disponível para o calor latente de vaporização. No caso de superfícies de solos descobertos, o recurso mais significante é tipicamente a rede de radiação de ondas longas "Q_L". Contudo, energia advectiva transmitida pela massa de ar acima do solo ou calor acumulado em camadas de solo devem se tornar significantes de tempo em tempo. Segundo, a pressão de vapor da atmosfera acima da superfície do solo deve ser menor do que a pressão de vapor na superfície do solo. Terceiro, um fornecimento contínuo de água para o local da evaporação é necessário. As duas primeiras condições são controladas por fatores micro-meteorológicos tais como radiações de ondas longas e curtas, umidade, temperatura do ar e velocidade do vento. A terceira condição para evaporação é controlada por condições subsuperficiais tais como tipo de solo, teor de umidade e níveis d'água subterrâneos.

- Evaporação por solos com nível d'água elevado

É conhecido que a evaporação continua acontecendo mesmo quando a água livre na superfície começa a diminuir abaixo da superfície. A redução no coeficiente de evaporação depende da posição do nível d'água e das propriedades hidráulicas do solo, (Wilson, 1990).

Ainda de acordo com Wilson (1990), Gardner (1958) analisou condições de estado permanente de fluxo vertical ascendente com o nível d'água em profundidades variadas abaixo da superfície do terreno. A equação de fluxo de umidade não saturada utilizada por Gardner (1958) deve ser escrita como mostrado na Equação 2.39.

$$q_v = k(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1\right) \tag{2.39}$$

em que q_v é o fluxo vertical ascendente; ψ é a sucção mátrica do solo; $k(\psi)$ é a condutividade hidráulica como uma função de ψ; $\left(\frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1\right)$ é o gradiente hidráulico "i".

Gardner (1958), conforme explicitado por Wilson (1990), pôde observar durante seus estudos que em geral, as inclinações dos coeficientes de evaporação *versus* curvas de carga de sucção são grandes para cargas baixas e se aproximam de zero para cargas de sucção altas. Esta observação é atribuída à redução na condutividade hidráulica dos solos não saturados, o qual ocorre quando as cargas de sucção aumentam. Mesmo que o gradiente hidráulico aumente com o aumento das cargas de sucção, a redução na condutividade hidráulica domina.

Ainda de acordo com Wilson (1990), Gardner (1958) também demonstra o efeito da textura do solo e da condutividade hidráulica associada no coeficiente de evaporação do solo. Em resumo, a análise do fluxo evaporativo no estado permanente em solos que apresentam nível d'água elevado indica alguns pontos importantes. Primeiro, é esperado que os mais altos coeficientes de evaporação dos solos sejam mantidos quando o nível d'água está na superfície do solo. Segundo, o abatimento do nível d'água resulta em uma redução do coeficiente evaporativo máximo do solo. Além disso, a taxa de declínio no coeficiente de evaporação do solo será maior para solos com textura grossa quando este deixar de estar saturado. Finalmente, solos com texturas mais finas permitem coeficientes de evaporação do solo maiores quando a condição de não saturado preponderar. É importante notar que para este ponto do trabalho conduzido por Gardner (1958) as observações e resultados obtidos são somente para fluxo de água, sendo que o fluxo de vapor de água não é considerado.

- <u>Evaporação por solos com um nível d'água profundo</u>

Na maioria dos cenários de campo, o nível d'água está situado bem abaixo da superfície. Por meio destas observações, alguns autores, tais como Gardner (1974) e Hillel (1980), citados por Wilson (1990), têm descrito evaporação do solo por meio de uma secagem progressiva em três fases distintas, sendo:

1- A fase inicial de coeficiente constante

2- A fase intermediária de coeficiente reduzindo

3- A fase residual de coeficiente lento

A representação da divisão destas três fases pode ser vista através da Figura 2.20.

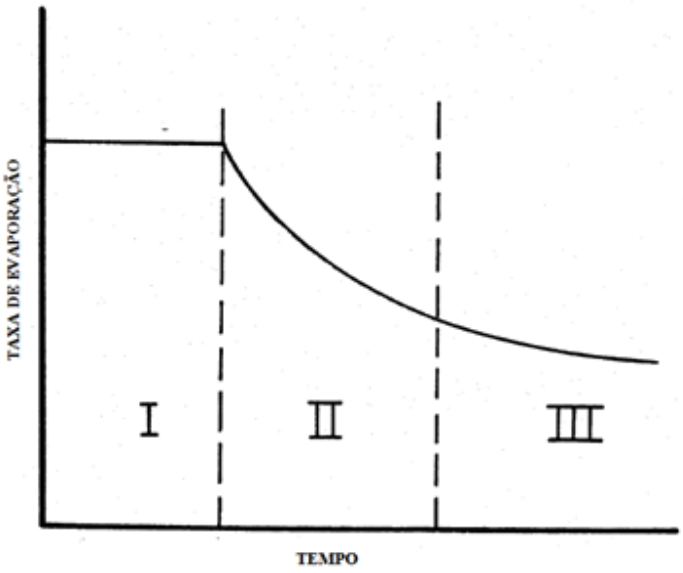


Figura 2.20 – Relação da taxa de evaporação *versus* tempo apresentando os três estágios de secagem (depois de Hillel, 1980 citado por Wilson, 1990).

1- A fase inicial de coeficiente constante – Fase I

A primeira fase de secagem ocorre quando o solo está inicialmente molhado e está saturado ou próximo da saturação. Quando molhado, o solo está suficientemente conductivo para fornecer água para o local evaporativo em um coeficiente igual ao fluxo de evaporação imposto pelas condições climáticas. Para esta fase, o coeficiente de evaporação deve ser determinado com base na rede de radiação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, etc. Este coeficiente de evaporação inicial é constante com o tempo tanto quanto o coeficiente de evaporação climático para uma superfície de água livre permaneça constante. Em geral, o ponto de dessaturação crítico ocorre mais rapidamente para altos índices de evaporação inicial. Mais ainda, baseado no trabalho elaborado por Gardner (1958), deve ser concluído que o ponto de dessaturação crítico ocorre mais rapidamente em solos com granulometria grossa do que em solos granulometria fina. Uma vez que o ponto de dessaturação crítico é alcançado, o coeficiente de evaporação pelo solo começa a diminuir. Isto marca a transição para a segunda fase de secagem.

2- A fase intermediária de coeficiente diminuindo – Fase II

A segunda fase de secagem ocorre quando o solo não pode transmitir água para a superfície de forma rápida o bastante para satisfazer a demanda climática. A condutividade hidráulica do solo diminui com a dessaturação porque a área da seção transversal efetiva da fase líquida está declinando.

3- A fase residual de coeficiente lento – Fase III

A fase residual de coeficiente lento de secagem ocorre após a zona superficial se tornar suficientemente dessaturada tal que a fase líquida da água do solo seja descontínua, de acordo com Hillel (1982), citado em Wilson (1990). Portanto, o fluxo na fase líquida cessa. Moléculas de água migram para a superfície somente por meio da dispersão de vapor e os índices de evaporação são controlados pela dispersão de vapor da zona de superfície seca. O terceiro estágio de secagem ocorre em um ponto de secagem onde a fase líquida residual é controlada pelas forças de adsorção moleculares das partículas do solo. Este teor de umidade crítico varia para diferentes tipos de solos. Conforme relatado em Wilson (1990), Idso *et al.* (1974) constataram que a medida direta do coeficiente de evaporação durante a fase de secagem é muito difícil. Esta dificuldade foi atribuída a dois fatores primários. Primeiramente, a magnitude absoluta de fluxo de evaporação é pequena e a existência de instrumentação precisa se torna crítica. Segundo, a condensação pela superfície do solo durante as noites se torna significante quando comparada aos fluxos evaporativos durante o dia para a fase III. A quantidade aparentemente insignificante de recarga frequentemente proporciona umidade suficiente ao solo para restabelecer a fase II. Em resumo, é identificado que o princípio da fase III de secagem com base na rede de fluxo evaporativo não é confiável.

2.7.5.3. Evaporação por superfícies de solos com vegetação

Em termos gerais, as definições apresentadas nos itens anteriores se aplicam também para as superfícies de solos com vegetação. Entretanto, a maior diferença é a profundidade de secagem ser aumentada pelas raízes pelo fato destas proporcionarem acesso às camadas de solos abaixo da superfície (Wilson, 1990).

Evapotranspiração por superfícies com presença de vegetação é frequentemente dominada pela componente transpiração do que pela componente evaporação real da superfície de solo sem vegetação. Alguns pesquisadores, como Renman e Lang (1960), citados em Wilson (1990), estimaram a evaporação do solo em ser somente 10% da evapotranspiração total em uma plantação de trigo. Claramente, transpiração é o termo mais importante para algumas aplicações. Métodos de avaliação do fluxo de umidade em plantas devem de fato ser utilizados para direcionar apropriadamente a evapotranspiração total. No entanto, coeficiente de transpiração é uma função da umidade do solo e, portanto, técnicas analíticas para computar evapotranspiração devem ser consideradas sobre o fluxo de umidade do solo.

O termo contínuo solo-planta-atmosfera (*soil-plant-atmosphere continuum (SPAC)*), criado por Philip (1966), conforme citado por Wilson (1990), se refere não somente ao sistema planta, mas ao conjunto entrelaçado contínuo de solo, água, tecido vivo, ar e energia. O estudo do movimento de água através deste contínuo é extremamente difícil. Não somente por ser um fenômeno altamente complexo e dinâmico, mas sua investigação requer que o pesquisador examine em várias disciplinas considerando as ciências físicas e biológicas. Atualmente, a área em que se observa o maior avanço destes estudos é a engenharia agrônoma. Analisando este contínuo, é possível entender que o fluxo se inicia com a transferência de água líquida e vapor de água por meio das raízes subsuperficiais. A água então flui como líquido através do tecido lenhoso das raízes por coleta e promove uma transferência ascendente por meio do caule principal.

O coeficiente no qual a água flui pelo solo por meio da planta e chega à atmosfera é função de vários fatores. Wilson (1990) cita alguns dos fatores mais importantes que controlam os coeficientes de transpiração:

- O potencial evaporativo da atmosfera que funciona como um dissipador de capacidade ilimitada.
- A resistência à difusão da camada de contorno laminar em torno da folha e a resistência interna da folha. A resistência interna da folha inclui a resistência das epidermes, poros estomatais e cavidades subestomatais. O termo resistência à difusão é inversamente proporcional ao coeficiente de difusão de vapor de água no ar. A resistência à difusão das raízes das plantas é também uma função do potencial de água na folha. Em geral, diminuindo o potencial de água das folhas, ou seja, sucções altas, aumenta a resistência à difusão de vapor.
- Outro fator é a resistência hidráulica global (ou seja, o inverso da condutividade hidráulica) para o fluxo de líquido do solo para as folhas da planta. Isto inclui a resistência hidráulica entre o solo e a raiz superficial e a resistência ao fluxo de líquido pelo xilema das raízes e o caule da planta.
- Finalmente e possivelmente o mais importante, a disponibilidade de umidade no solo disponível à raiz. De acordo com Wilson (1990), Penman (1963) declara: "O coeficiente de transpiração em qualquer tempo dependerá das condições no solo, em que o desenvolvimento de raízes e a disponibilidade e acessibilidade da água serão dominantes."

O desenvolvimento de modelos teóricos para o transporte de água em plantas foi traçado por Gradmann (1924) conforme mencionado em Wilson (1990). Foi proposto por ele que o fluxo de água nas raízes, caules e folhas é análogo ao fluxo de corrente elétrica. Esta aproximação foi apresentada como simplista, no entanto, ela promove valoração para a iniciação de teorias mais rigorosas.

A área da engenharia geotécnica requer um método de análise mais geral e prático e que esteja mais voltado para o consumo de água por unidade de área em uma dada comunidade de plantas. Este ponto de vista leva ao desenvolvimento de uma função macroscópica em oposição às funções de extração microscópica pelas raízes.

2.8. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Na formulação de uma análise térmica de solos é fundamental o entendimento de como a energia armazenada no solo varia quando a temperatura do solo é alterada.

As propriedades térmicas dos solos exercem influência na profundidade de penetração de calor dentro de uma massa de solo e também na amplitude de variação diária de temperatura. A penetração de calor no solo durante um dia é da ordem de 0,3 a 0,8 m, de acordo com Duarte (2004).

Nas análises de fluxo de calor dois parâmetros térmicos principais são necessários, a condutividade térmica e o calor específico volumétrico. Estes dois parâmetros são função do teor de água no solo e dos minerais que o constituem. Ainda é necessário conhecer o valor do calor latente de vaporização para as análises citadas.

2.8.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica caracteriza a habilidade de um solo em transmitir calor por condução (Geo-slope, 2007). Duarte (2004) cita que Jackson e Taylor (1986) apresentam que o fluxo de calor pelo solo envolve operações simultâneas de vários mecanismos de transporte. A condução é responsável pelo fluxo de calor através dos materiais sólidos, enquanto que através dos poros três mecanismos ocorrem em paralelo, sendo a condução, a convecção e a radiação. Havendo a presença de água no meio, um fator adicional envolvido na transferência de calor seria o calor latente de destilação.

A condutividade térmica (λ) é definida como a quantidade de calor que passa numa unidade de tempo através de uma unidade transversal, devido a um gradiente de temperatura aplicado na direção do fluxo (Duarte, 2004).

Alguns métodos empíricos e também semi-empíricos foram desenvolvidos para estimar a condutividade térmica de solos. Estes métodos foram avaliados em detalhe por

Farouki, 1981, citado em Geo-slope, 2007, em que foi possível concluir que são necessários diferentes métodos para a estimativa da condutividade térmica em diferentes tipos de solos. No entanto, o método desenvolvido por Johansen (1975) se apresentou como o mais geral para esta estimativa. Um método que também é muito utilizado é o apresentado por de Vries (1963), de acordo com Oliveira (2003). Neste item será apresentado o método de Johansen (1975), por ser o mais geral, de acordo com Geo-slope (2007). Este método é o que será utilizado nas análises numéricas que serão desenvolvidas neste trabalho.

De acordo com Oliveira (2003), o método de Johansen (1975) para estimativa da condutividade térmica é baseado na condutividade térmica do solo saturado e seco, na porosidade e no grau de saturação, calculado a partir da curva característica do solo. No caso de solos secos, a condutividade térmica pode ser estimada em função de seu peso específico seco, conforme apresentado pela Equação 2.40.

$$\lambda_{seco} = \frac{0{,}135\gamma_d + 64{,}7}{2700 - 0{,}947\gamma_d} \pm 20\% \tag{2.40}$$

em que γ_d é o peso específico seco; λ_{seco} é a condutividade térmica do solo seco.

A condutividade térmica dos solos tende a crescer quando os vazios que estavam preenchidos por ar são ocupados por água. A magnitude deste crescimento está relacionada com o tipo de solo. O aumento da condutividade térmica dos solos devido a umidade, além de depender da substituição do ar pela água, depende também das mudanças na ligação água-solo e das características peculiares das interfaces físico-químicas da água.

Duarte (2004) apresenta que Johansen (1975) expressou a condutividade térmica de um solo não saturado como uma função da condutividade térmica seca (λ_{seco}) e saturada (λ_{sat}) para um mesmo peso específico seco. Assim, o conceito de condutividade térmica normalizada foi apresentado, sendo chamada de número de Karsten (λ_e). A Equação 2.41 apresenta a formulação citada.

$$\lambda_e = \frac{\lambda - \lambda_{seco}}{\lambda_{sat} - \lambda_{seco}} \tag{2.41}$$

Com esta colocação, a condutividade térmica de um solo não saturado pode ser dada conforme a Equação 2.42.

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{seco}).\lambda_e + \lambda_{seco} \tag{2.42}$$

em que λ_{seco} é dado pela Equação 2.40.

Johansen (1975), de acordo com Duarte (2004), apresentou relações que determinam a condutividade térmica normalizada (λ_e) para solos finos e grossos, baseado nos dados de Kersten (1949). Essas relações são conforme apresentado pelas Equações 2.43 e 2.44.

$$\lambda_e \cong logS + 1 \qquad \text{solos finos} \tag{2.43}$$

$$\lambda_e \cong 0{,}7logS + 10 \quad \text{solos grossos} \tag{2.44}$$

em que S é o grau de saturação.

Especificamente para solos saturados, foi observado por Johansen que variações na microestrutura apresentariam um efeito na condutividade térmica. Assim, para a obtenção do valor da condutividade térmica saturada Johansen apresentou uma equação baseada nas condutividades térmicas e volumes relativos de seus constituintes, como mostrado pela Equação 2.45, Duarte (2004).

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \lambda_w^n \tag{2.45}$$

em que λ_s é a condutividade térmica das partículas do solo; λ_w é a condutividade térmica da água; n é a porosidade.

A condutividade térmica das partículas do solo (λ_s) pode ser estimada como apresentado pela Equação 2.46.

$$\lambda_s = \lambda_q^{q_s} \ \lambda_o^{(1-q_s)} \tag{2.46}$$

em que λ_q é a condutividade térmica do quartzo (7,0 W/m·K); q_s é a relação da quantidade de quartzo com a fração total dos sólidos; λ_o é a condutividade térmica dos outros minerais (2,0 W/m·K ou 3,0 W/m·K se houver menos de 20% de quartzo).

A Tabela 2.3 apresenta valores típicos de condutividade térmica para vários materiais. Os valores foram apresentados por Geo-slope (2007), extraídos de Johnston, Ladanyi, Morgenstern e Penner (1981).

Tabela 2.3 – Valores de condutividade térmica para vários materiais (Geo-slope, 2007).

Materiais	**Condutividade Térmica**		
	Btu(hr·ft·°F)	**J/(sec·m·°C)**	**kJ/(dia·m·°C)**
Água	0,35	0,605	52,27
Gelo	1,29	2,230	192,7
Ar (seco)	0,014	0,024	2,07
Neve			
Nova, solta	0,05	0,086	7,43
Sobre o terreno	0,07	0,121	10,45
Compactada, densa	0,20	0,340	29,37
Solos e Rochas			
Argila xistosa	0,90	1,50	129,6
Evaporito	3,10	5,40	466,6
Calcário	0,75 - 2,90	1,30 – 5,00	112 - 432
Dolomito	2,90	5,00	432
Arenito	1,10 – 2,40	1,80 – 4,20	155 – 86,4
Xisto	0,90	1,60	138,24
Gnaisse	1,40	2,50	216
Greenstone	1,90	3,30	285,12
Ardósia	2,20	3,80	328,4
Quartzito	2,60 – 4,10	4,50 – 7,10	388,8 - 613
Granito	1,00 – 2,30	1,70 – 4,00	146,9 – 345,6

2.8.2. CALOR ESPECÍFICO VOLUMÉTRICO (CAPACIDADE DE AQUECIMENTO VOLUMÉTRICO)

A capacidade de aquecimento volumétrico (C) de um material por unidade de volume é definida como a energia de calor necessária para mudar a temperatura do volume unitário de um dado solo de 1ºC (Duarte, 2004). Quando estiver expressa por unidade de peso, esta quantidade de calor é referida como a capacidade de calor específico. Sendo expressa por unidade de volume, a quantidade é conhecida como a capacidade de aquecimento volumétrico.

O calor específico volumétrico de um solo pode ser calculado a partir do calor específico volumétrico do ar, da água e das partículas de solo, de acordo com a Equação 2.47, apresentada por de Vries (1963) citada em Geo-slope (2007).

$$C \cong C_s\theta_l + C_w\theta_w + C_a\theta_a \tag{2.47}$$

em que C é o calor específico volumétrico, (J/m³/ºC); C_s é o calor específico volumétrico das partículas de solo, (J/m³/ºC); θ_l é o teor volumétrico de sólidos, (m³/m³); C_w é o calor específico volumétrico da água, (J/m³/ºC); θ_w é o teor volumétrico de água, (m³/m³); C_a é o calor específico volumétrico do ar, (J/m³/ºC); θ_a é o teor volumétrico de ar, (m³/m³).

De acordo com Oliveira (2003) de Vries (1963) relata que o calor específico volumétrico do ar é muito pequeno se comparado ao da água e das partículas do solo, e é portanto, desprezível. Os teores volumétricos de água e sólidos são função da porosidade e do grau de saturação e podem ser obtidos por meio da curva característica.

A Tabela 2.4 apresenta valores típicos da capacidade de aquecimento volumétrico para vários materiais, de acordo com Geo-slope (2007).

Tabela 2.4 - Valores de capacidade de aquecimento volumétrico para vários materiais (Geo-slope, 2007).

Materiais	**Capacidade de Aquecimento Específico em Massa**		**Capacidade de Aquecimento Volumétrico**	
	Btu/(lb·ºF)	**kJ/(kg·ºC)**	**Btu/(ft³·ºF)**	**kJ/(m³·ºC)**
Água	1,00	4,187	62,4	4187
Gelo	0,50	2,094	28,1	1880
Ar	0,24	1,00	0,0187	1,25
Minerais do solo	0,17	0,71	28,0	1875
Minerais orgânicos do solo	0,40	1,674	37,5	2520
Isolamento extrudado de poliestireno	0,24	1,00	0,65	43,5
Concreto	0,21	0,895	30,0	2010
Asfalto	0,40	1,674	37,5	2520
Neve (fresca)	-	-	3,11	209
Neve (amontoada e compactada)	-	-	7,80	523,5
Granito	-	-	37,1	2490
Calcário	0,29	1,20	48,9	3285
Dolomito	0,21	0,88	37,4	2510
Arenito	-	-	37,4	2510
Xisto	-	-	27,4	1840
Vidro	-	-	26,2	1760
Aço	0,11	0,46	56,0	3890
Madeira	0,19	0,80	7,79	523

Capítulo 3

3. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA, PARÂMETROS UTILIZADOS NAS ANÁLISES E ESTUDOS REALIZADOS

3.1. HISTÓRICO DA PILHA DE ESTÉRIL ANALISADA

A pilha de estéril de minério de ferro denominada Capão da Serra faz parte das estruturas que integram a mina do Tamanduá, no Complexo Minerador de Vargem Grande, de propriedade da mineradora Vale. Esta mina está localizada no município de Nova Lima, que faz parte da região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em 1997, foram iniciadas as atividades de lavra da mina do Tamanduá. Para atender a demanda de disposição dos materiais estéreis provenientes do processo de decapagem da área da cava, o projeto inicial da pilha foi concebido para dispor 74 milhões de metros cúbicos. Devido à expansão da mina e conseqüente aumento do volume necessário para disposição de estéril, o projeto passou por uma revisão passando a comportar um volume total de estéril correspondente a 112 milhões de metros cúbicos.

A princípio, o projeto da nova pilha ampliada atenderia às necessidades de disposição de estéril até o ano de 2020. Atualmente, conforme dados do planejamento de longo prazo da mina, o volume que foi estudado atenderá a mina até o ano de 2014, devido a um novo projeto de expansão da cava.

A pilha se encontra assentada em fundação cujas características dos materiais são diversas, sendo desde sedimentos arenosos constituídos de rejeitos e minério de ferro fino no fundo do talvegue, de acordo com os resultados obtidos nas sondagens realizadas na época da elaboração do projeto, quartzitos pouco a muito alterados nas escarpas do vale, além dos coluviões e materiais saprolíticos característicos da região, que ocorrem ao longo de todo o espaldar da pilha. Como uma caracterização geral da fundação da pilha, a mesma estará assente sobre fundação resistente, constituída de

saprólitos jovens e maturos e algum coluvião consolidado, existente principalmente nas partes mais altas da encosta (DF Consultoria, 2004).

Os materiais que irão constituir a pilha serão itabiritos, filitos, quartzitos e rochas básicas em diversos estados de alteração, originados da mesma mina, escavados em níveis diferentes ao longo da lavra.

A sequência de formação da pilha, conforme descrito no relatório do projeto executivo (DF Consultoria, 2004), adota a construção de um lastro e de dreno de fundo do trecho compreendido entre o pé da atual pilha e da pilha futura. A retenção dos sedimentos gerados por erosão na área de formação da pilha durante períodos chuvosos, que antes eram realizadas integralmente em bacias formadas por barramentos construídos a jusante da pilha, em uma nova concepção deste projeto deverá ser parcialmente (aproximadamente 80%) cumprida por bacias de sedimentação situadas dentro da área da própria pilha, diminuindo a distância de transporte destes sedimentos e retendo-os próximo da fonte geradora.

Foi prevista a execução do enrocamento de proteção do pé da pilha, que acumula a função de bacia de amortecimento das vazões conduzidas pelos canais laterais de drenagem, além da construção dos próprios canais laterais que acompanham a formação da pilha. O revestimento vegetal dos taludes finais da pilha também deverá ser executado.

Para a drenagem interna da pilha foi estudada a implantação de colchões drenantes e de drenos coletores e condutores dispostos em níveis diferentes. O relatório e os desenhos do projeto executivo apresentam de forma detalhada.

A pilha atualmente encontra-se em processo de implantação, onde é possível distinguir a fase de taludes finais e a fase operacional. A Figura 3.1 apresenta a situação de implantação da estrutura no ano de 2007.

Figura 3.1 – Pilha de Estéril Capão da Serra (Vale, 2007).

A medida que os taludes são finalizados, a revegetação é executada. Acompanhando a mesma condição da revegetação, é realizada a implantação dos canais de drenagem periférica.

3.2. QUANTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NAS ANÁLISES

Para a quantificação de parâmetros necessários para realizar as análises foram feitas correlações de valores encontrados para materiais com características semelhantes ao da estrutura estudada. É extremamente difícil encontrar uma pilha de estéril que tenha definido os parâmetros necessários para análises de fluxo transiente, como é a proposta deste estudo. Tratando de forma mais específica sobre os parâmetros relacionados às propriedades térmicas dos solos, especificamente na área da engenharia geotécnica, a escassez de dados é ainda maior. A seguir serão apresentados os parâmetros utilizados e a forma como foram obtidos.

3.2.1. DADOS METEOROLÓGICOS

Para a realização das análises foram utilizados dados referentes ao ano de 2008 da estação meteorológica localizada na mina do Pico que está próxima a mina do Tamanduá. A Figura 3.2 apresenta a localização das minas da mineradora Vale no estado de Minas Gerais e pode ser observada a proximidade entre as duas minas citadas. O ano de 2008 foi escolhido por estar mais próximo da época das análises realizadas que apresenta as informações necessárias medidas por 348 dias. A planilha em que constam os dados meteorológicos está apresentada no Anexo I.

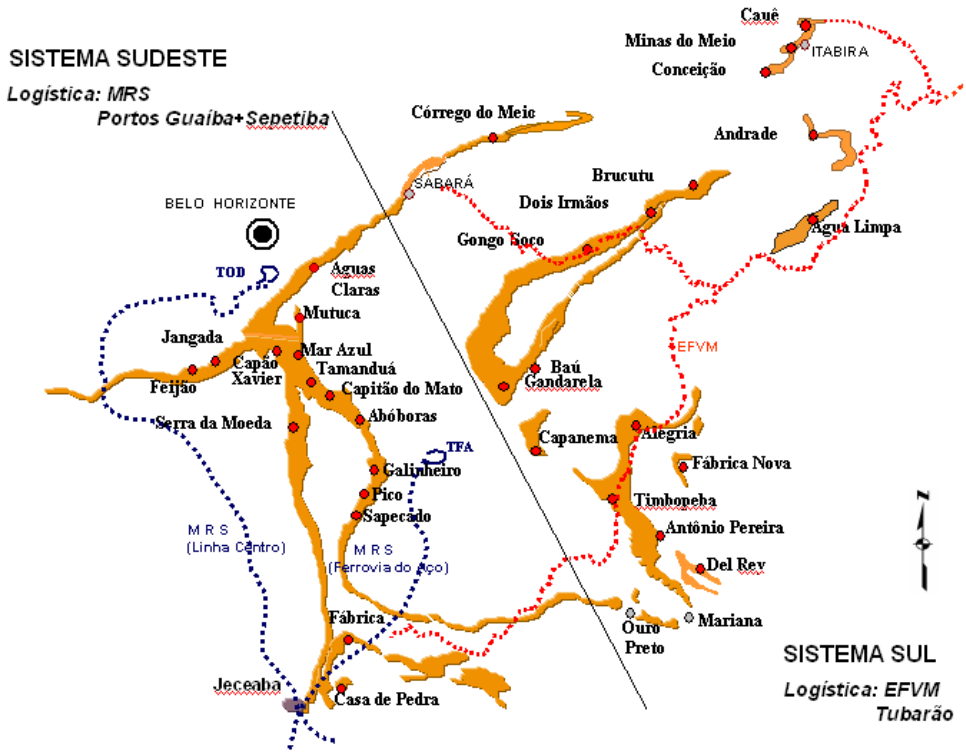


Figura 3.2 – Localização das minas da mineradora Vale no estado de Minas Gerais.

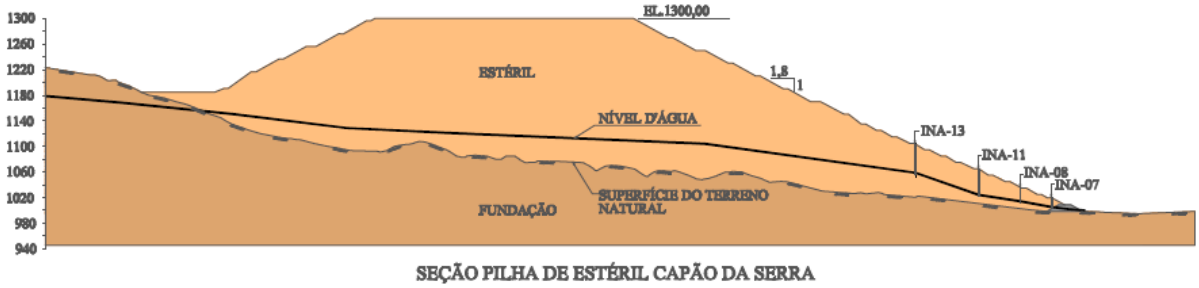
3.2.1.1. Caracterização climática da região Sudeste

A temperatura média anual da região Sudeste está situada entre 20ºC, no limite de São Paulo e Paraná, e 24ºC ao norte de Minas Gerais, enquanto nas áreas mais elevadas das Serras do Espinhaço, Mantiqueira e do Mar, a média pode ser inferior a 18ºC, devido ao efeito conjugado da latitude com a freqüência das correntes polares. No inverno, a

média das temperaturas mínimas varia de 6ºC a 20ºC, com mínimas absolutas de -4ºC a 8ºC, sendo que as temperaturas mais baixas são registradas nas áreas mais elevadas. O litoral e a Serra do Mar e ainda do oeste de Minas Gerais ao município do Rio de Janeiro são as áreas onde são registrados os maiores índices de precipitações, alcançando altura superior a 1.500 mm. Na Serra do Mar, em São Paulo, chove em média mais de 3.600 mm. No norte mineiro, os totais de chuva anuais não ultrapassam os 800 mm.

3.2.2. LINHA FREÁTICA

A linha freática apresentada foi obtida por meio de leituras dos instrumentos indicadores de nível d'água existentes na pilha de estéril. As tabelas que apresentam as leituras e os dados obtidos estão no Anexo II. Foram utilizados os instrumentos indicadores de nível d'água com leituras realizadas no mês de junho de 2008 para inserção do nível d'água inicial com os códigos correspondentes de acordo com informações fornecidas pelo monitoramento realizado pela mineradora Vale dos seguintes instrumentos: TAM/PDE/INA07; TAM/PDE/INA08; TAM/PDE/INA11; TAM/PDE/INA13. No Anexo III é apresentada a localização da instrumentação citada e a seção transversal da pilha para a realização das análises. Na metodologia construtiva de pilhas de estéril, com o avanço da implantação realizada com a disposição de baixo para cima, método ascendente, é que é feita a instalação da instrumentação definida no projeto executivo. A pilha analisada ainda se encontra em formação, portanto não estão instalados todos os instrumentos previstos pelo projeto. Assim, até o ponto onde há informações de instrumentos, o nível d'água inicial indicado é o correspondente às leituras existentes e a partir deste ponto o nível d'água considerado nas análises foi estimado.



SEÇÃO PILHA DE ESTÉRIL CAPÃO DA SERRA

Figura 3.3 – Seção transversal da pilha de estéril Capão da Serra com indicação da localização dos intrumentos instalados.

3.2.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E ÍNDICES FÍSICOS

Para o estéril de mina foi considerado de modo predominante um material com características semelhantes a uma areia fina – silte. Para obtenção dos parâmetros deste material foi utilizado o trabalho de Pereira (2009) que em seu estudo apresentou dados da Pilha do Correia – mina de Gongo Soco de propriedade da mineradora Vale. Para o material de fundação, de acordo com descrição do projeto executivo da pilha, é identificado solo residual, constituído de saprólitos jovens e maturos. Os valores utilizados foram estimados de acordo com valores médios para materiais desta natureza. Desta forma foram definidos os valores de condutividade hidráulica (*k*), umidade (*w*), teor de umidade volumétrico residual (θ), porosidade (*n*) e índice de vazios (*e*), como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condutividade hidráulica e índices físicos.

Material	Condutividade Hidráulica (k)	Umidade (w)	Teor de umidade residual (θ)	Porosidade (n)	Índice de vazios (e)
Estéril de mina (areia fina – silte)	4,320 m/dia	15,00 %	0,225 m³/m³	0,50	1,00
Fundação (Solo residual)	0,231 m/dia	20,41 %	0,317 m³/m³	0,42	0,72

3.2.4. COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA

Na geotecnia clássica o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) é definido pela razão entre a deformação e a carga aplicada no ensaio de compressão unidimensional. No módulo Vadose o coeficiente de compressibilidade volumétrica é definido como a inclinação da função de teor de água volumétrico na região de poro pressões positivas e em termos físicos descreve se um volume de solo saturado dilata ou contrai para uma dada variação na poro pressão. De acordo com Geo-Slope (2007) o valor para este coeficiente não precisa ser definido precisamente para a maior parte dos

problemas de percolação em solos não saturados. Para o caso onde há possibilidade de que uma quantidade significante de água possa ser gerada ou perdida através de uma variação do volume da matriz de solo em regiões saturadas da geometria do problema, o valor do coeficiente necessita ser definido com mais cautela. Na maioria dos casos, no entanto, é aconselhável especificar um valor da ordem de 1,0 x 10^{-5} l/kPa, como o que foi considerado para as análises desenvolvidas neste trabalho.

3.2.5. PESO ESPECÍFICO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Os valores de peso específico e os parâmetros de resistência efetivos do estéril foram estimados com base nos valores médios calculados experimentalmente para a Pilha do Correia, mina de Gongo Soco, de propriedade da mineradora Vale e citado em Pereira (2009). Estes dados foram utilizados por serem mais conservadores em relação aos dados considerados no projeto executivo da Pilha Capão da Serra. Para os parâmetros de fundação os dados utilizados foram obtidos das análises de estabilidade realizadas no projeto executivo da Pilha Capão da Serra. Os dados estão apresentados na Tabela 3.2. Na elaboração das análises de estabilidade foi utilizado o método de equilíbrio limite por Morgenstern e Price.

Tabela 3.2 – Parâmetros de Resistência.

Material	γ_{sat} (kN/m³)	c' (kN/m²)	ø' (º)	$Ø_b$' (º)
Estéril de mina (areia fina – silte)	19	14	33	33
Fundação (Solo residual)	27	50	35	35

3.2.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Para definição dos valores relacionados à condutividade térmica e calor específico volumétrico foram feitas correlações com dados existentes na bibliografia. Especificamente para estas propriedades a escassez de dados é muito grande. Os valores utilizados para o estéril estão relacionados aos dados apresentados por Oliveira (2003).

Para os materiais de fundação foram estimados valores e realizadas análises de sensibilidade para definição dos dados, fazendo uma correlação com dados obtidos de

Duarte (2004). Considerando as condições de comportamento dos diversos tipos de solos em relação às propriedades térmicas, e conforme já mencionado no Capítulo 2, é possível acrescentar que é conhecido que, normalmente os solos arenosos apresentam macroporos em abundância, porém, sua porosidade total, normalmente, é menor do que a dos solos argilosos, os quais possuem elevado número de microporos que têm maior capacidade de reter água. Por esta razão, os solos argilosos retêm mais água do que os arenosos. O teor de umidade afeta drasticamente as propriedades térmicas do solo, no sentido de acréscimos na condutividade térmica e no calor específico à medida que aumenta o teor de umidade do solo. Portanto, em condições normais o solo arenoso é mais seco, logo, a sua condutividade térmica e o seu calor específico são menores do que os solos argilosos. Assim, os valores considerados nas análises estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros térmicos dos solos.

Material	Sucção mátrica (ψ_m) (kN/m^2) Valores correspondentes para os parâmetros	Condutividade Térmica - (λ) ($kJ/dia/m/^oC$)	Calor Específico Volumétrico (c) ($kJ/m^3/^oC$)
Estéril de mina (areia fina – silte)	0,01 1000	116,64 82,08	3450 2100
Fundação (Solo residual)	0,01 1000	181,44 146,88	3450 2100

Em análises de sensibilidade da ferramenta numérica em relação aos valores de calor específico volumétrico foi constatado que nas condições estabelecidas para os casos estudados e os tipos de solos determinados não foram observadas alterações significativas que pudessem justificar a adoção de valores diferentes entre os dois tipos de solos existentes.

3.3. ANÁLISES NUMÉRICAS

3.3.1. ANÁLISE DE FLUXO – ESTUDO DE CASO

Neste item serão apresentadas as análises realizadas por meio da modelagem numérica para análise de fluxo transiente e os resultados obtidos.

A Figura 3.4 apresenta a malha de elementos finitos definida para a seção de análise da pilha de estéril. Esta malha foi constituída por 2605 nós e 2551 elementos.

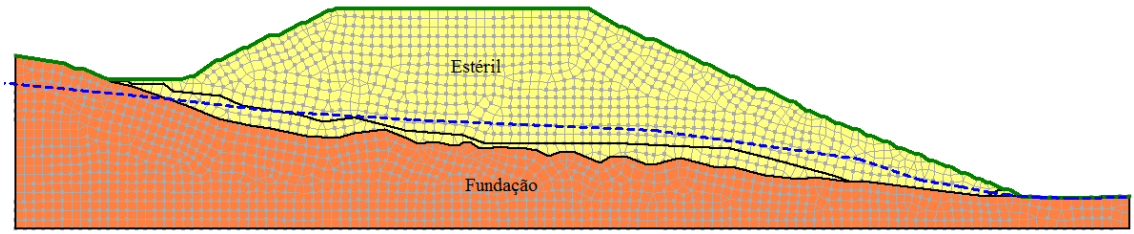


Figura 3.4 – Malha de elementos finitos da seção de análise.

Na Figura 3.5 podem ser vistas as condições de contorno adotadas para a análise de fluxo. Em análise de fluxo utilizando a ferramenta numérica é necessário definir além de outras condições a condição atmosférica. As setas verdes mostradas e que contornam a área superficial da seção da pilha representam o contorno das condições climáticas, em que constam dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e o período de precipitação. As bolas verdes localizadas no pé da pilha, na saída da região da drenagem interna, indicam a condição de contorno hidráulica, onde a pressão é zero. Na base da seção, no material da fundação, foi considerada a condição de contorno térmica, onde a temperatura adotada é de 25ºC. Este valor foi adotado considerando valores empregados em análise de exemplo da ferramenta numérica e que apresenta características semelhantes a esta análise.

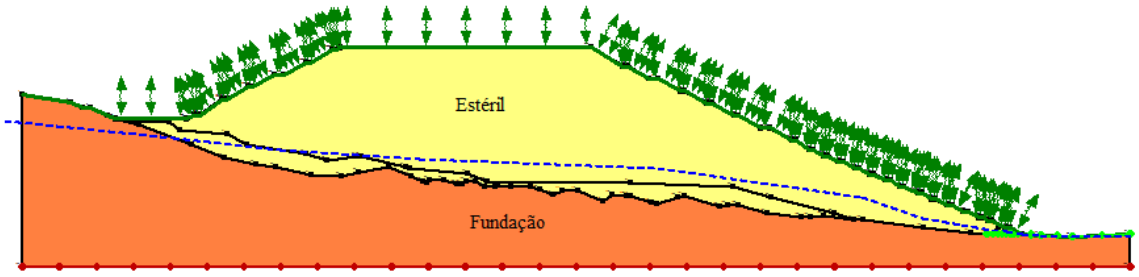


Figura 3.5 – Condições de Contorno

Na Figura 3.6 é apresentado o resultado do Balanço Hídrico (Ciclo Hidrológico) em que pode ser aplicado a qualquer intervalo de tempo para bacias e para o planeta. Nos dados climáticos informados para a seção da pilha analisada foi considerada a análise por um período de 348 dias. Avaliando os resultados obtidos é observado que os valores cumulativos apresentados são provenientes do início da simulação, em que em um tempo zero o volume acumulado também é zero. Assim, o volume de água existente no sistema no início da análise não levou em consideração a área que se encontra saturada devido à posição inicial do nível d'água. Em linhas gerais na conta para obtenção dos valores encontrados foi considerado como entrada de água no sistema a precipitação e como saída a evaporação, a transpiração e o escoamento superficial.

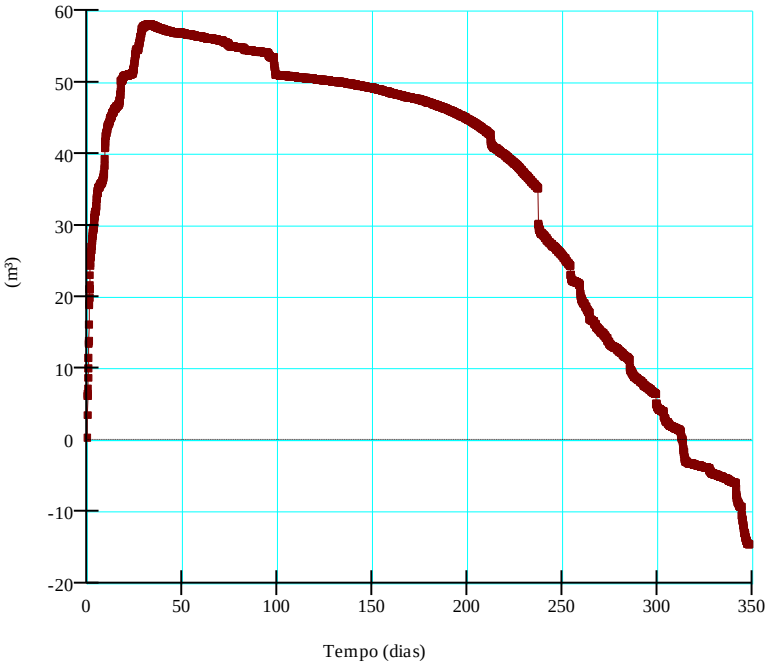


Figura 3.6 – Balanço hídrico acumulado (Estudo de caso).

Os valores das precipitações são as principais variáveis de entrada do ciclo hidrológico. É ela que estabelece as condições de fluxo no sistema, como e se ocorrerá a subida do lençol freático, e consequentemente a forma como estes fatores solicitarão as estruturas. Os valores apresentados na Figura 3.7 estão associados aos dados climáticos provenientes da estação meteorológica da mina do Pico e das condições de contorno climáticas estabelecidas na seção da análise. São valores coerentes com os dados climáticos e a seção de análise.

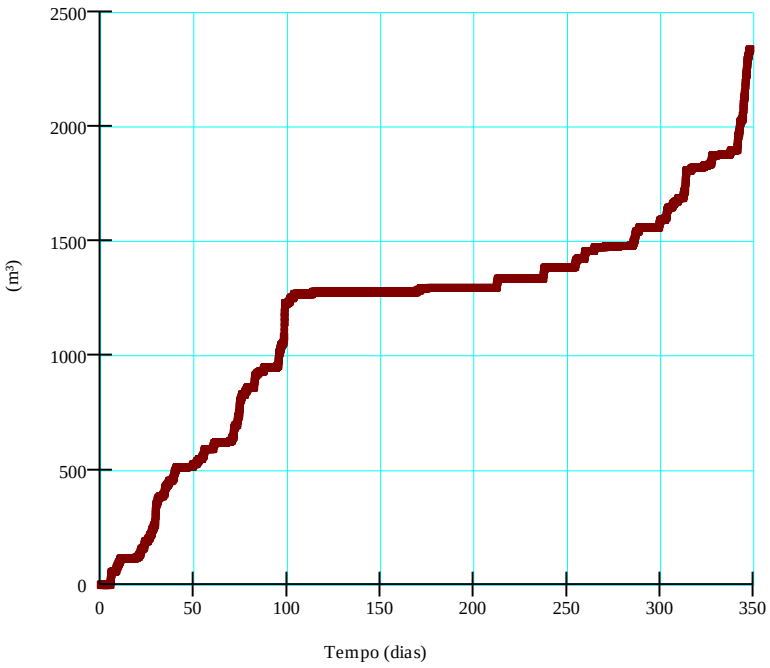


Figura 3.7 – Precipitação acumulada (Estudo de caso).

A evaporação, como já mencionado, pode ser definida como a remoção de água do solo pela superfície do terreno, juntamente com fluxo ascendente associado. Fazendo uma análise entre a Figura 3.8 de evaporação superficial acumulada e a precipitação acumulada, Figura 3.7, é observado que a precipitação acumulada atingiu valores da ordem de 2300 m³ enquanto a evaporação acumulada ficou próxima de 2100 m³. Portanto, é constatado que há uma diferença de 200 m³ que podem estar distribuídos entre escoamento superficial e ainda que uma parcela de água infiltrada tenha atingido o

nível do lençol freático, onde as condutividades hidráulicas e térmicas são maiores e saído pelo dreno de fundo da pilha.

A ferramenta de análise numérica utiliza o método de Penman-Wilson para calcular a evaporação real. Este método foi apresentado no item 2.7.4 deste trabalho.

Como o nível d'água da estrutura analisada está situado bem abaixo da superfície, conforme já descrito, alguns autores, tais como Idso *et al.* (1974), Gardner (1974) e Hillel (1980), citados em Wilson (1990), têm descrito evaporação do solo por meio de uma secagem progressiva deste em três fases distintas. Analisando a Figura 3.8, a fase inicial, chamada de coeficiente constante poderia então ser encaixada entre os dias 0 e 150 que correspondem aos meses chuvosos da região estudada, indo de janeiro a abril e ainda pode ser considerado o mês de maio, mesmo sendo um mês em que as precipitações caem drasticamente. Esta fase, de acordo com os referidos autores, ocorre quando o solo está inicialmente molhado, podendo estar saturado ou próximo da saturação.

A segunda fase de secagem ocorre quando o solo não pode transmitir água para sua superfície de forma rápida o bastante para satisfazer a demanda climática. Esta fase é configurada por uma redução dos valores da condutividade hidráulica "*k*" do solo com a dessaturação porque a área da seção transversal efetiva da fase líquida está diminuindo. A Figura 3.8 configura que esta fase está inserida entre os dias 150 a aproximadamente o 270, correspondendo aos meses de junho, julho e agosto que são meses onde as precipitações são raras e ainda setembro, que mesmo já tendo ocorrências de chuvas poderia estar inserido no contexto da fase 2.

A terceira e última fase é conhecida como a fase residual de coeficiente lento. O terceiro estágio de secagem ocorre em um ponto de secagem onde a fase líquida residual é controlada pelas forças de adsorção moleculares das partículas do solo. Nesta fase é observado que a quantidade aparentemente insignificante de recarga frequentemente proporciona umidade suficiente ao solo para restabelecer a fase 2 de secagem. Em resumo, é identificado que o princípio da fase 3 de secagem com base na rede de fluxo

evaporativo não é confiável. Portanto, devido ao novo ciclo de chuvas que se inicia no mês de outubro de acordo com os dados da região, é esperado que seja possível restabelecer as fases 2 e 1, respectivamente, para as condições de evaporação do sistema apresentado.

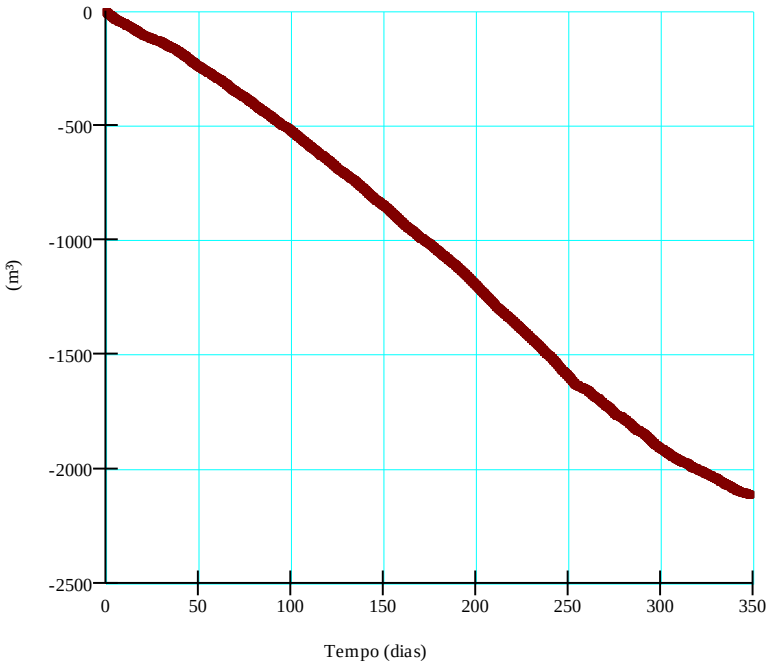


Figura 3.8 – Evaporação superficial acumulada (Estudo de caso).

A Figura 3.9 consolida a Figura 3.6, a Figura 3.7 e a Figura 3.8 que representam parâmetros relevantes do balanço hídrico completo do modelo. Em uma solução ideal, a somatória de todos os parâmetros conduziria ao valor zero para o Balanço Hídrico Cumulativo. Neste caso, conforme apresentado na Figura 3.6 a variação é tão pequena que na Figura 3.9 pode ser entendido como zero.

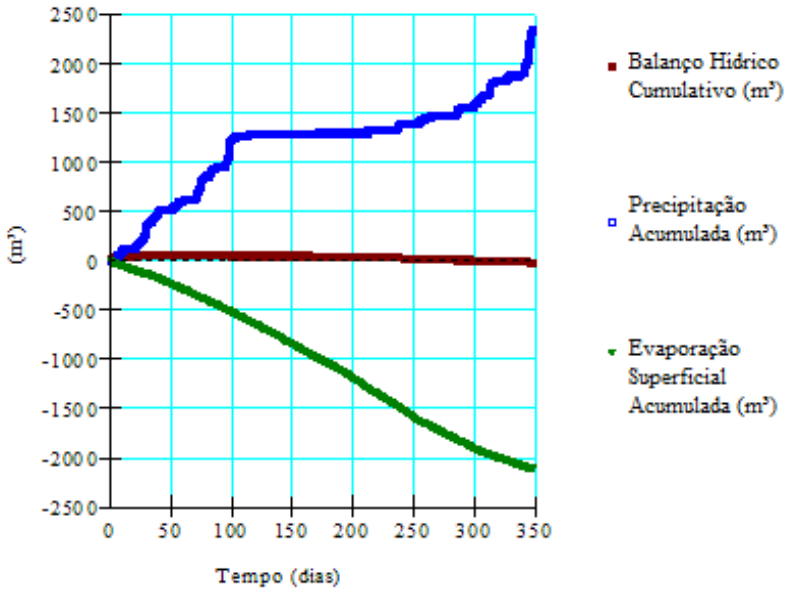


Figura 3.9 – Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (Estudo de caso).

Como apresentado na Figura 3.10, para as análises desenvolvidas a seguir foram escolhidos três nós com as respectivas elevações: Nó 1537 (El. 1300,69m); Nó 1542 (El. 1285,60m); Nó 1534 (El. 1213,31m).

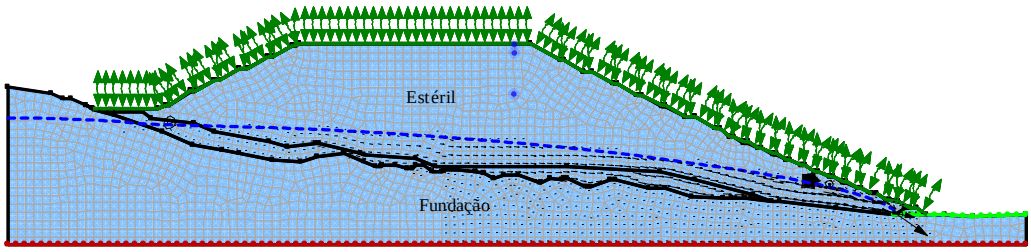


Figura 3.10 – Seção analisada e nós considerados nas avaliações seguintes (Estudo de caso).

A Figura 3.11 apresenta a variação da temperatura nos pontos apresentados na Figura 3.10. O comportamento da temperatura mostra oscilações para o nó localizado na superfície, Nó 1537, ou seja, a região superficial se apresenta como sendo a mais sensível às condições de contorno atmosféricas. Este comportamento pode ser atribuído à condição dos dados climáticos referentes às precipitações não serem contínuos.

Um dos fatores necessários para a evaporação é uma fonte de energia. Assim, quando a água evapora, calor é retirado do corpo e a temperatura, inicialmente em equilíbrio com o ambiente, diminui com o passar do tempo, o teor de água diminui e o solo mais seco torna a entrar em equilíbrio com o ambiente. Assim, no (Nó 1537), é observado que há um acréscimo na temperatura, principalmente no período chuvoso do dia 0 a aproximadamente o 108º dia, o que leva a concluir que a evaporação esteja ocorrendo de forma muito reduzida devido à incidência direta de chuva na região superficial. O Nó localizado a 15 m abaixo da superfície (Nó 1542) mostra que as quedas identificadas nos valores da temperatura podem ser indícios de que ocorra evaporação de forma um pouco mais acentuada nesta região. Já o nó situado a aproximadamente 90 m da superfície (Nó 1534) mantém sua temperatura constante, mesmo estando na região não saturada.

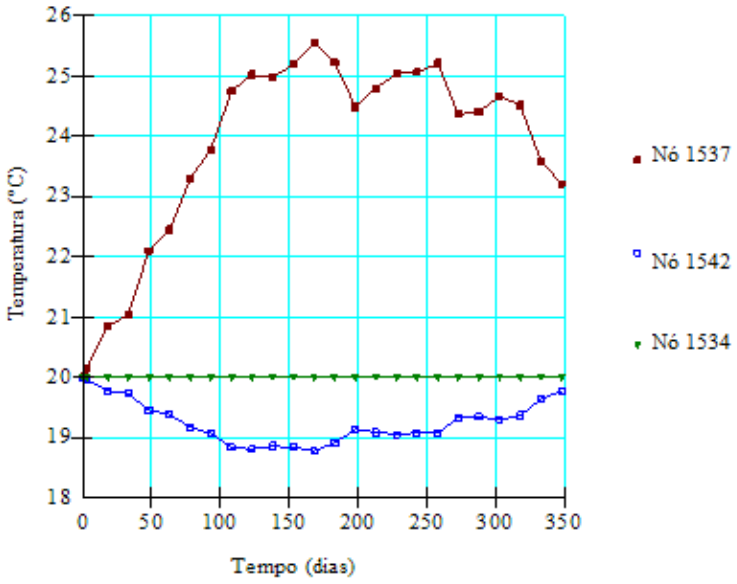


Figura 3.11 – Variações de temperatura (Estudo de caso).

O comportamento esperado para os nós analisados, que estão localizados na zona vadosa é de se obter valores negativos para as poro pressões, conforme Figura 3.12. No Nó 1537, localizado na superfície, há um acentuado aumento nos valores da sucção. Como a sucção é o parâmetro que controla as tensões efetivas é previsto que no período

onde é observado este aumento, tanto para o Nó 1537 como para os outros nós haja um correspondente ganho de resistência do solo considerando todo o sistema.

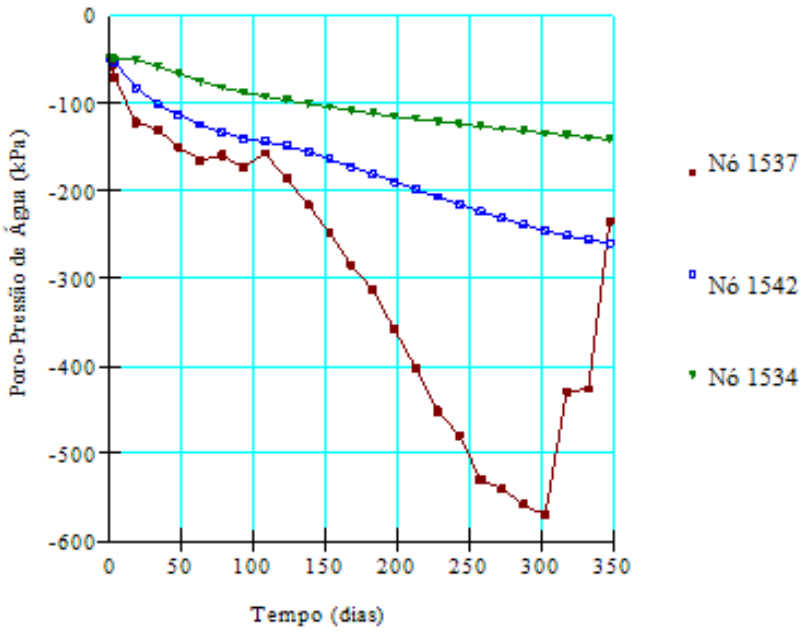


Figura 3.12 – Variações das poro pressões (Estudo de caso).

A Figura 3.13 ilustra como os fluxos estão se processando na superfície, sendo considerada a plataforma final da pilha na El. 1300,00 m e os dias, conforme apresentado foram o 108º dia, representando o final do período chuvoso em abril, o 213º dia para o período de seca referente ao mês de agosto e o 348º dia já no final da análise, em dezembro e já inserido em novo ciclo de período chuvoso.

No início da análise está o maior índice de infiltração. Passando para a análise do período de seca ainda é observado um fluxo residual. Por fim, retornando a novo período de chuvas, representado pela análise do 348º dia, há o aumento do fluxo, em que poderá ocorrer a saturação do material da pilha e a subida do lençol freático e ocasionar situações de instabilidade devido ao início do processo de saturação.

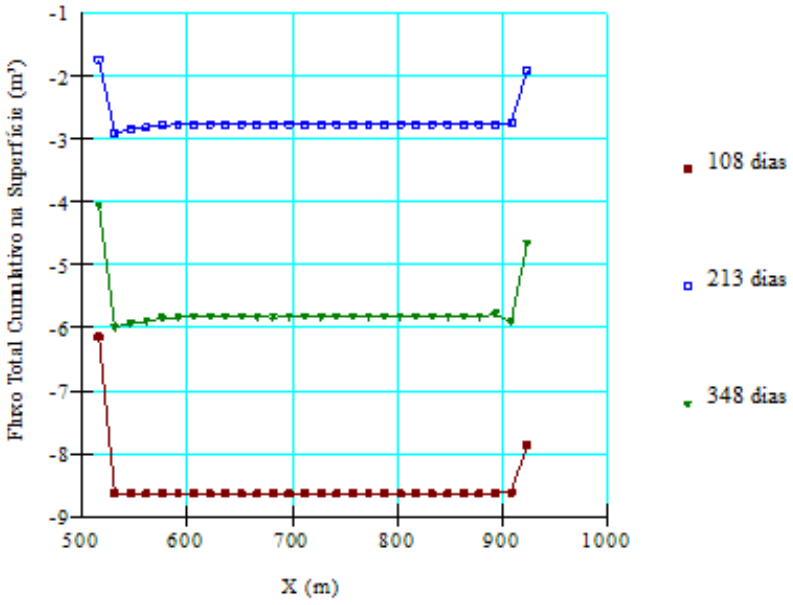


Figura 3.13 – Variações do fluxo total acumulado na superfície (Estudo de caso).

As análises de estabilidade foram desenvolvidas em três períodos do ano, buscando representar de forma adequada a condição da sazonalidade.

Na Figura 3.14 é reproduzido o grau de saturação em um perfil do solo situado na região mais profunda da superfície potencial de ruptura analisando os três períodos propostos na Figura 3.13. É notado que no 108º dia o grau de saturação é maior e decresce nas cotas mais elevadas. Durante o ano, para os 213º e 348º dias, os valores de saturação declinam. Isto pode caracterizar a evolução de processos como a evaporação e a redução do teor de umidade, ficando bem evidente os valores mais baixos para o grau de saturação para o 348º dia. Nesta época há o retorno das chuvas após período de seca, em que para as elevações mais próximas da superfície da pilha é observado o menor grau de saturação.

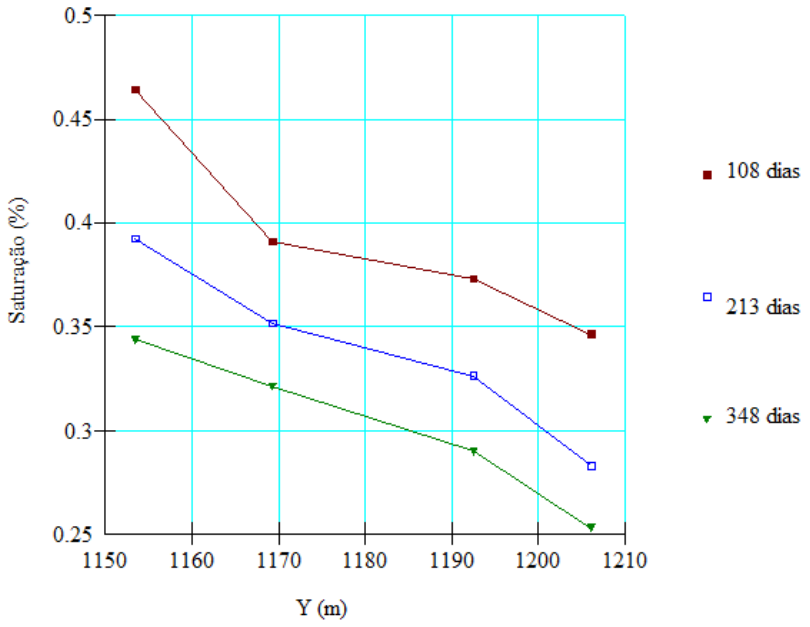


Figura 3.14 – Grau de saturação em relação a profundidade (Estudo de caso).

Na Figura 3.15 é observado um incremento nos valores das poro pressões negativas no decorrer do ano e em direção à superfície, o que, como consequência gera aumento na resistência do solo. Assim, associado ao aumento da sucção no decorrer do ano há um acréscimo no valor do fator de segurança da pilha no período, como pode ser observado na Figura 3.16 e na Figura 3.17, correspondentes ao dia 108, na Figura 3.19 e na Figura 3.20 referente ao dia 213 e na Figura 3.22, correspondente ao dia 348. É verificado que, à medida que o material da pilha passa pelo processo de dessaturação durante o ano, o fator de segurança acompanha este processo apresentando aumento.

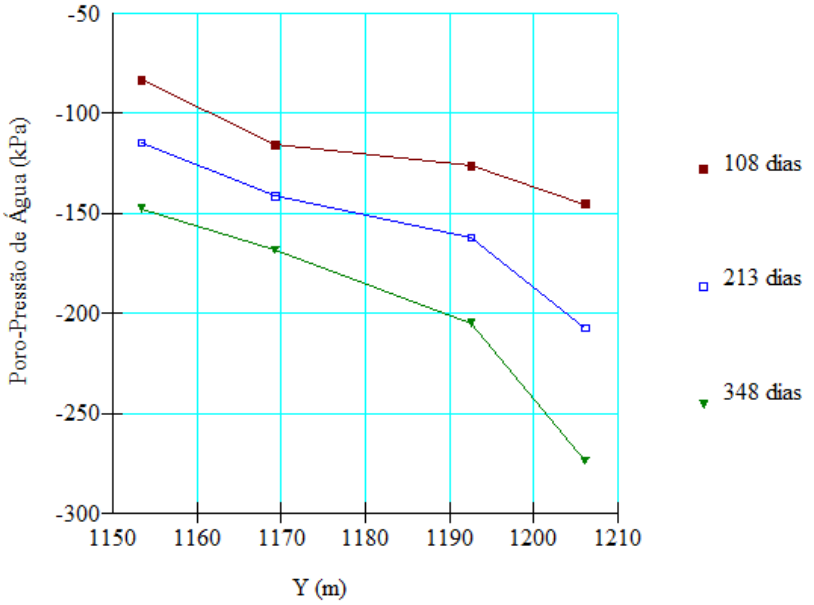


Figura 3.15 – Variação das poro pressões em relação à profundidade para quatro pontos específicos da malha (Estudo de caso).

Avaliando a Figura 3.18, Figura 3.21 e Figura 3.23 é possível estabelecer correlações entre as poro pressões e as superfícies potenciais de ruptura.

A Figura 3.18, que está associada à Figura 3.16, mostra que na zona vadosa as poro pressões apresentam valores que não ultrapassam 200kPa negativos, e que na zona saturada, onde está situada grande parcela da superfície potencial de ruptura, os valores das poro pressões ultrapassam os 400kPa positivos. Assim, o fator de segurança encontrado é de 1,422, como mostrado na Figura 3.16 para uma análise parcial do talude. Fazendo uma pesquisa de superfície para análise global da estabilidade da pilha o fator de segurança encontrado é de 1,471, como apresentado na Figura 3.17.

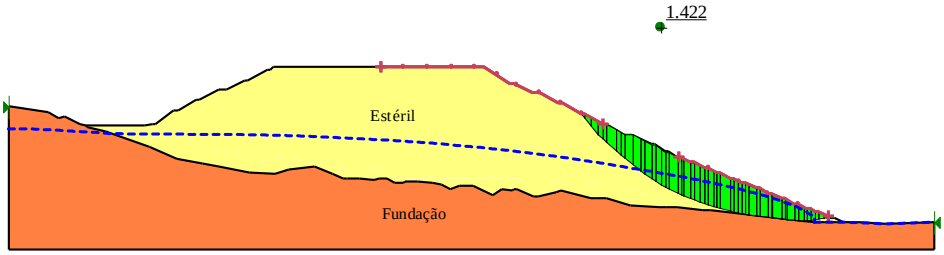


Figura 3.16 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso).

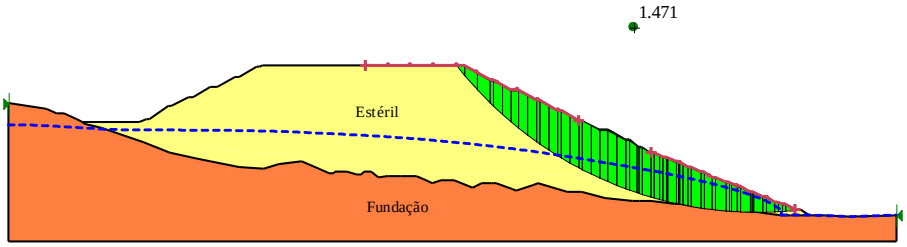


Figura 3.17 - Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso).

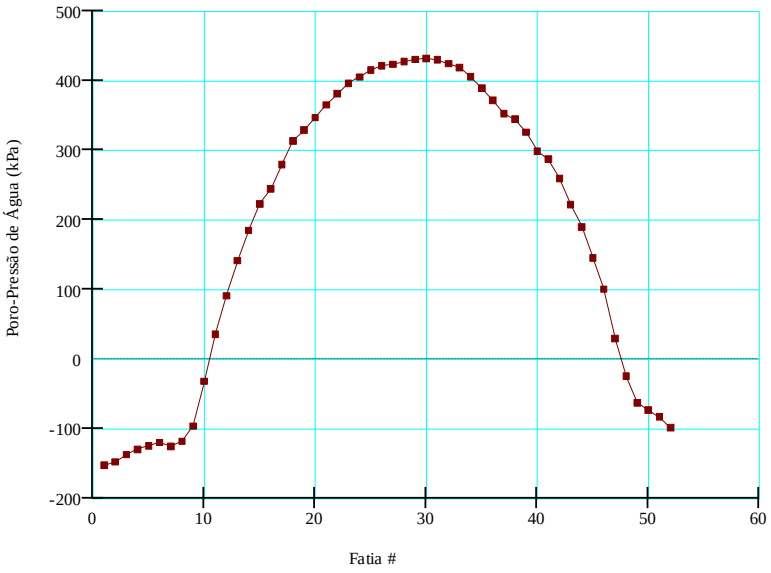


Figura 3.18 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura para o 108º dia (Estudo de caso).

Na Figura 3.21 é observado um considerável incremento nas poro pressões negativas, em que estas alcançam valores acima de 400 kPa, e com isto ocorre um correspondente ganho de resistência verificado por meio do aumento do valor do fator de segurança, correspondente a 1,498, como mostrado na Figura 3.19 para uma análise de estabilidade local do talude. A Figura 3.20 apresenta uma pesquisa de superfície para análise da estabilidade global da estrutura e o fator de segurança encontrado é de 1,532.

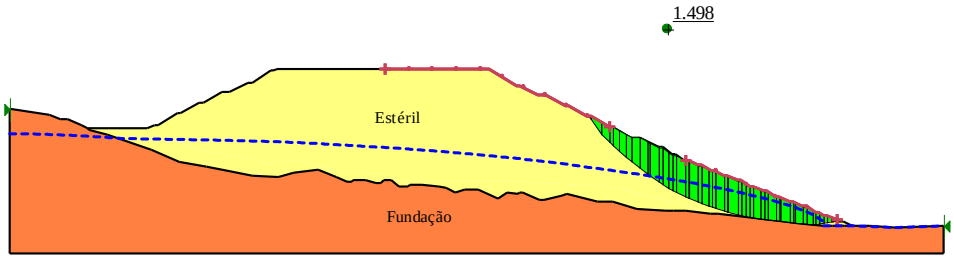


Figura 3.19 – Análise de estabilidade local para o 213º dia - Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso).

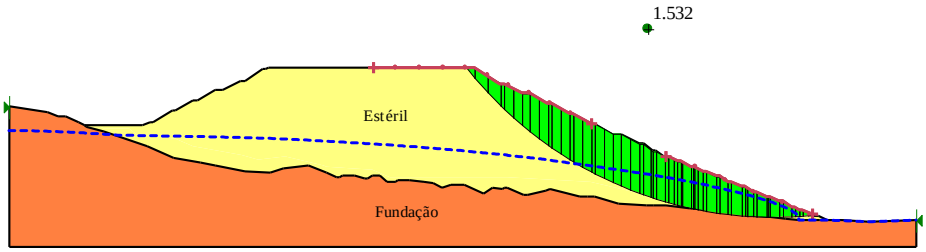


Figura 3.20 - Análise de estabilidade global para o 213º dia – Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso).

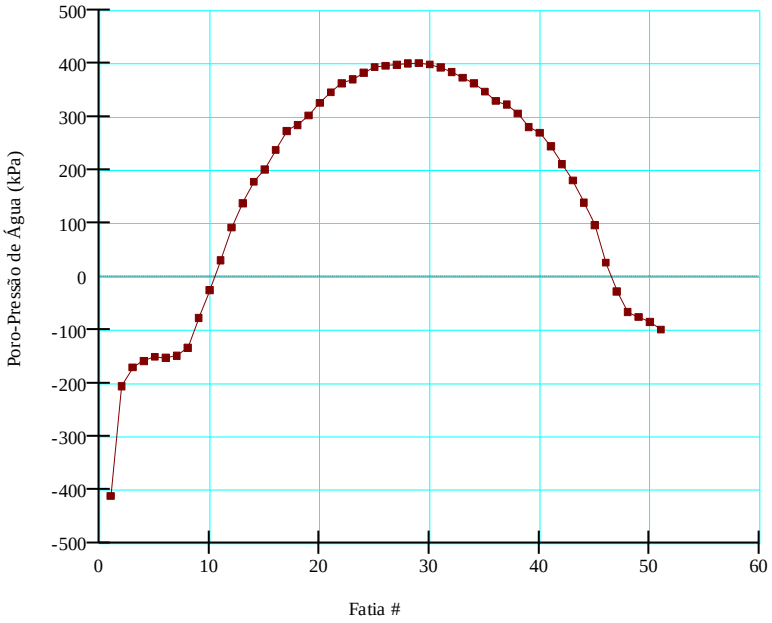


Figura 3.21 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura para o 213º dia (Estudo de caso).

Na Figura 3.22 é observado aumento no valor do fator de segurança, em que o valor encontrado foi de 1,561. Ao analisar que o dia 348 é no mês de dezembro, em que novo ciclo de chuvas já se iniciou, é observado que o grau de saturação ainda é baixo, como mostrado na Figura 3.15, o que poderia evidenciar a influência na estrutura do período sem ocorrência de chuvas. Porém, fazendo uma análise da Figura 3.23 é observado que os valores das poro pressões negativas já apresentam queda em relação a análise do dia 213 apresentada na Figura 3.21, o que evidencia a influência do início do ciclo de período chuvoso.

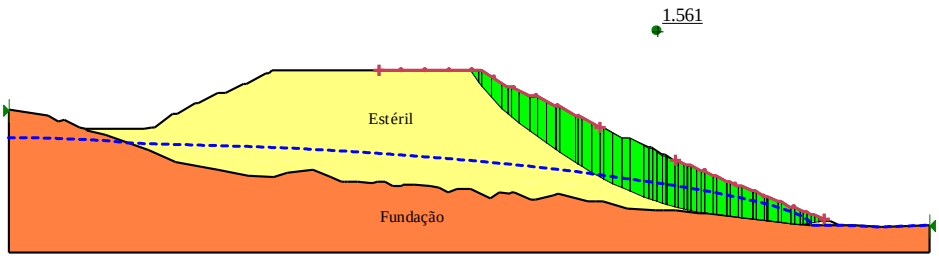


Figura 3.22 - Análise de estabilidade global para o 348º dia - Superfície potencial de ruptura (Estudo de caso).

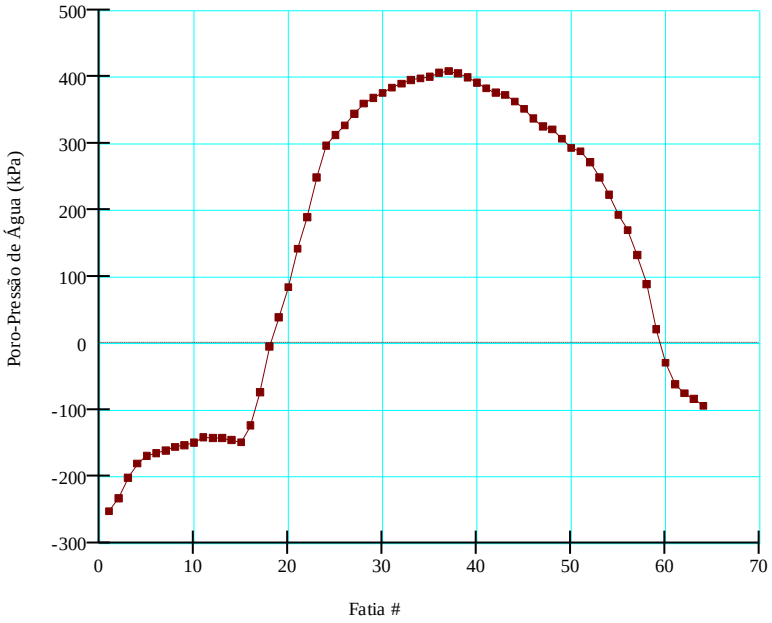


Figura 3.23 – Poro pressões na superfície potencial de ruptura para os resultados do 348º dia (Estudo de caso).

A Figura 3.24 mostra a variação do fator de segurança no decorrer do ano. Há um declínio dos valores até aproximadamente o 108º dia, que marca o final do período chuvoso. A partir deste ponto há o aumento dos valores dos fatores de segurança, sendo o período marcado por queda nas ocorrências de precipitações e a conseqüente secagem do aterro.

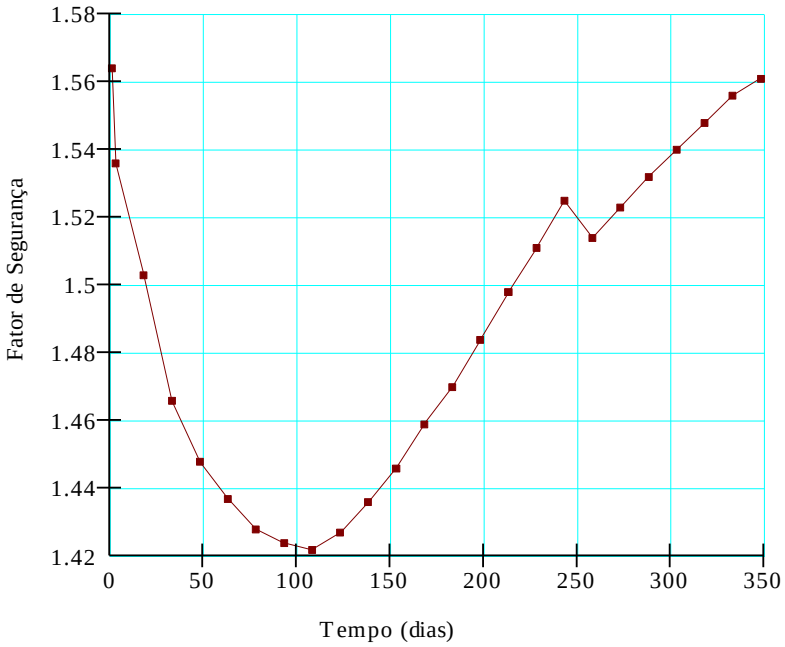


Figura 3.24 - Fator de segurança x tempo – (Estudo de caso).

A Figura 3.25 estabelece uma comparação entre os fatores de segurança obtidos para análises de estabilidade considerando a sucção e sem considerar sua influência. O ganho de resistência observado nas análises ao ser inserida a condição de influência da sucção é considerável, colocando a estrutura em uma condição de estabilidade com valores de fatores de segurança bem acima da análise sem considerar sua influência. É interessante e relevante avaliar a influência deste parâmetro visto que sua influência altera de forma abrupta as conclusões sobre a condição de estabilidade de uma estrutura que apresenta zona não saturada em seu contexto.

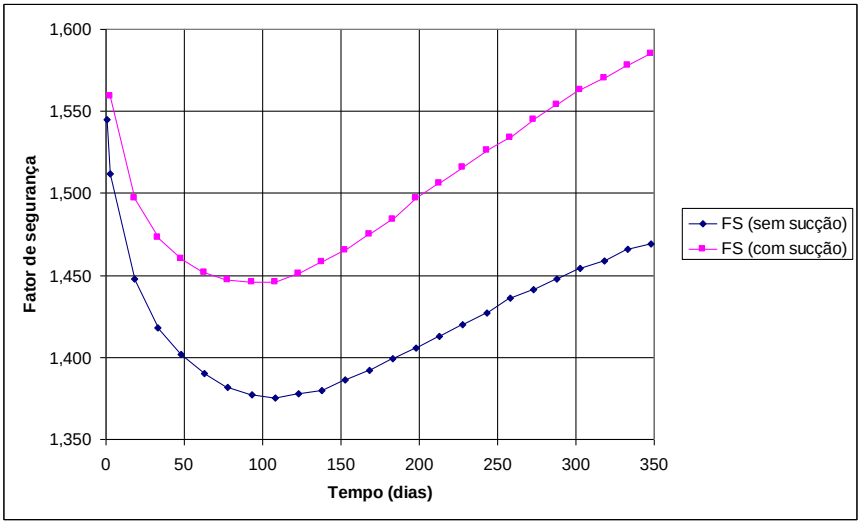


Figura 3.25 – Correlação do Fator de segurança x tempo para análise de estabilidade com sucção e sem sucção – (Estudo de caso).

3.4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

3.4.1. AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DA PILHA COMO BARRAMENTO PARA ARMAZENAMENTO DE ÁGUA

Na elaboração desta análise foi considerada a mesma seção de análise da pilha avaliada no estudo de caso. Porém, para simular o comportamento da pilha de estéril devido a uma condição de aumento da carga hidráulica foi considerado um reservatório na El. 1237,00m. A Figura 3.26 apresenta a seção analisada. O nível d'água inicial foi obtido por meio de análise de percolação com a ferramenta numérica utilizando o módulo Seep que é integrante do sistema computacional Geostudio 2007. É importante esclarecer que o objetivo de analisar esta condição é de avaliar o comportamento de uma pilha de estéril como barramento sem que tenha sido realizada qualquer adequação da estrutura para funcionar como uma barragem, tal como, implementação de sistema de drenagem interna, proteção específica para o talude de montante, dentre outros tratamentos que poderiam ser indicados para esta condição.

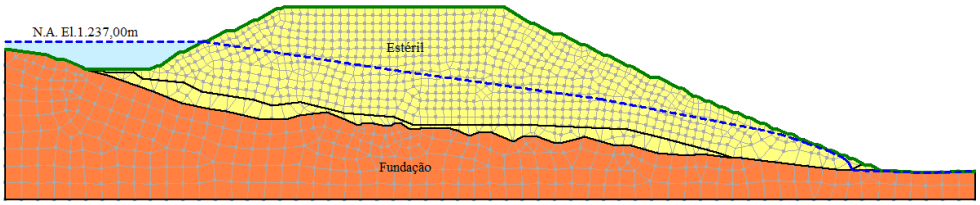


Figura 3.26 – Seção de análise considerando reservatório de água.

O módulo é utilizado para modelar o fluxo de água e a distribuição de poro pressões em meios porosos como o solo, através do método dos elementos finitos. Os dados de entrada necessários para a análise foram os mesmos utilizados para as análises transientes realizadas com o módulo Vadose.

A Figura 3.27 apresenta as linhas equipotenciais obtidas por meio da análise de percolação deste caso para 348º dia.

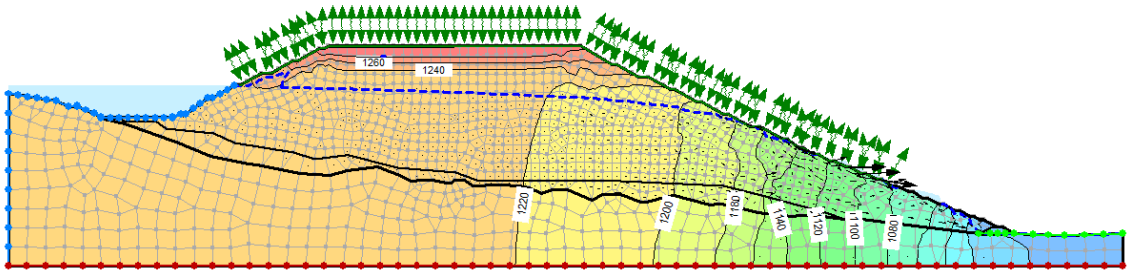


Figura 3.27 – Linhas equipotenciais (análise com reservatório).

Na análise dos resultados obtidos com o estudo considerando a existência de reservatório serão apresentadas informações conclusivas até o 240º dia. Analisando o período completo de 348 dias foi observada uma oscilação considerável da análise numérica a partir do dia 240 em que neste período a análise apresenta um encontro entre a linha freática e a condição de contorno de forma mais agressiva.

A Figura 3.28 apresenta o resultado do Balanço Hídrico, sendo o período considerado até o dia 240. Nesta avaliação é possível verificar, assim como foi feito no estudo de caso, que o volume de água já inserido no sistema no início da análise devido à posição inicial do nível d'água não é considerado na conta do balanço hídrico da análise numérica. Em linhas gerais, na conta para obtenção dos valores encontrados foi

considerado como entrada de água no sistema a precipitação e como saída a evaporação, a transpiração, que não será avaliada neste trabalho, e alguma ocorrência de escoamento superficial.

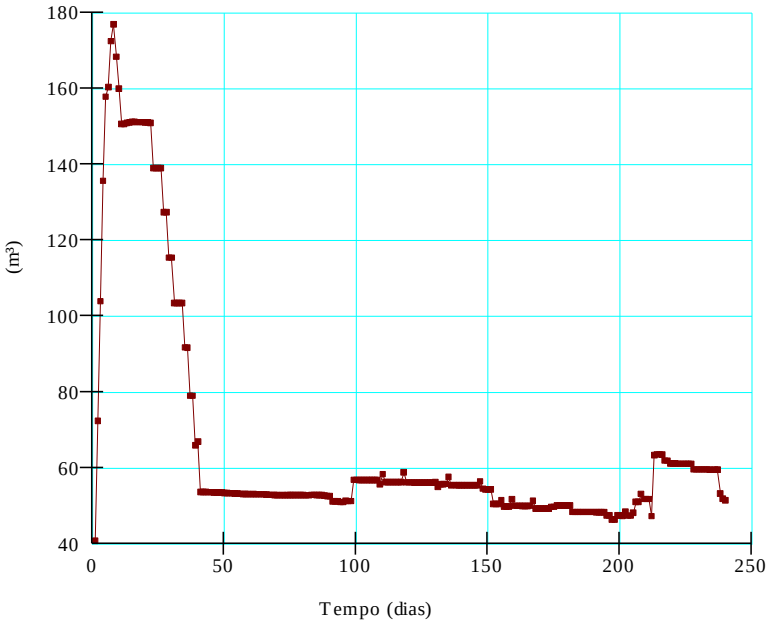


Figura 3.28 – Balanço hídrico acumulado (análise com reservatório).

Ao se fazer a avaliação das precipitações, é notada a consistência dos resultados obtidos em relação aos dados climáticos informados para a análise. A Figura 3.29 apresenta a distribuição das precipitações ao longo do ano.

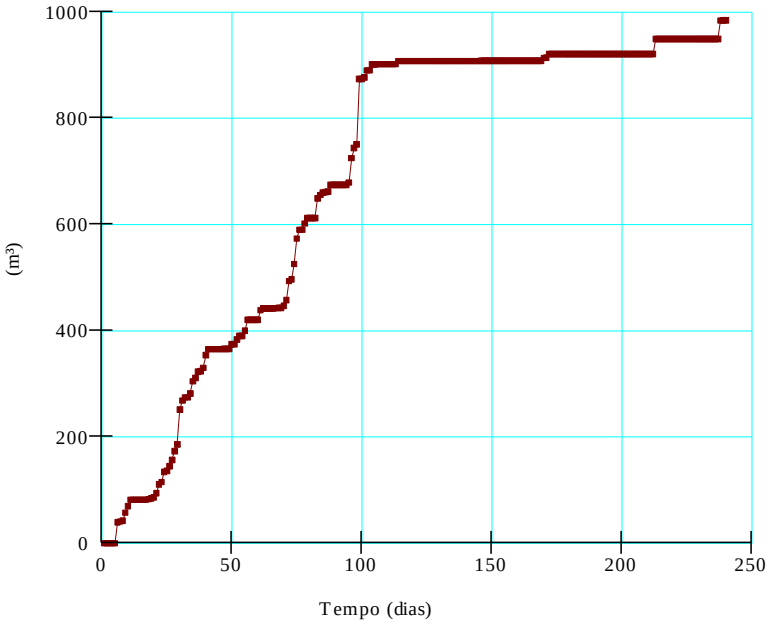


Figura 3.29 – Precipitação acumulada (análise com reservatório).

Assim como no estudo de caso apresentado anteriormente, neste estudo também, ao fazer a análise conjunta da Figura 3.29 e da Figura 3.30, é observada uma diferença entre os valores registrados para a precipitação acumulada e a evaporação acumulada no período de 250 dias. A diferença entre estas duas grandezas é de aproximadamente 200 m³. Neste caso esta diferença conduz a um entendimento de que seja possível que neste período há um déficit entre a demanda de evaporação necessária para manter o equilíbrio entre a atmosfera e a estrutura observado pelo valor de volume de evaporação acumulada estar um pouco acima do volume precipitado.

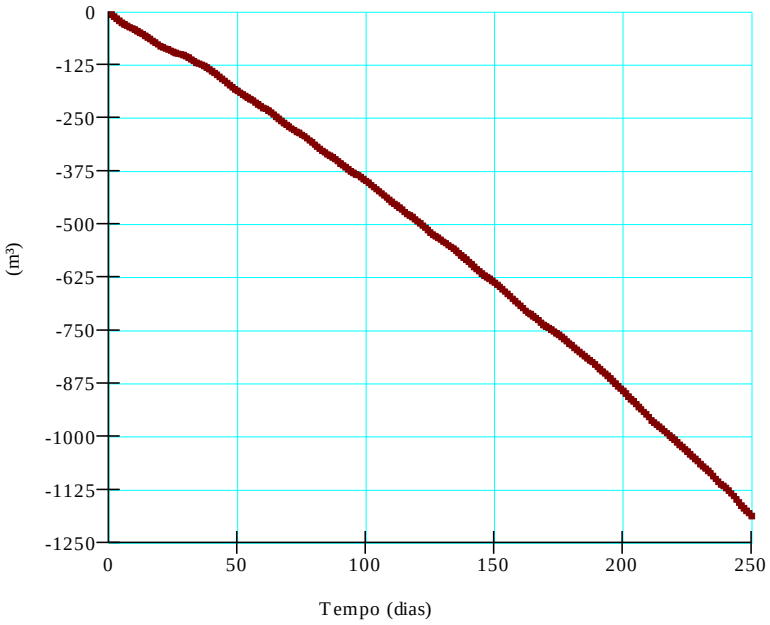


Figura 3.30 – Evaporação superficial acumulada (análise com reservatório).

A Figura 3.31 é apresentada como uma consolidação das informações constantes na Figura 3.28, na Figura 3.29 e na Figura 3.30 e que representam parâmetros relevantes do balanço hídrico completo do modelo, mostrando a consistência entre os dados de saída de evaporação e precipitação acumulados, e do balanço hídrico geral de aproximadamente zero para o período de 240 dias.

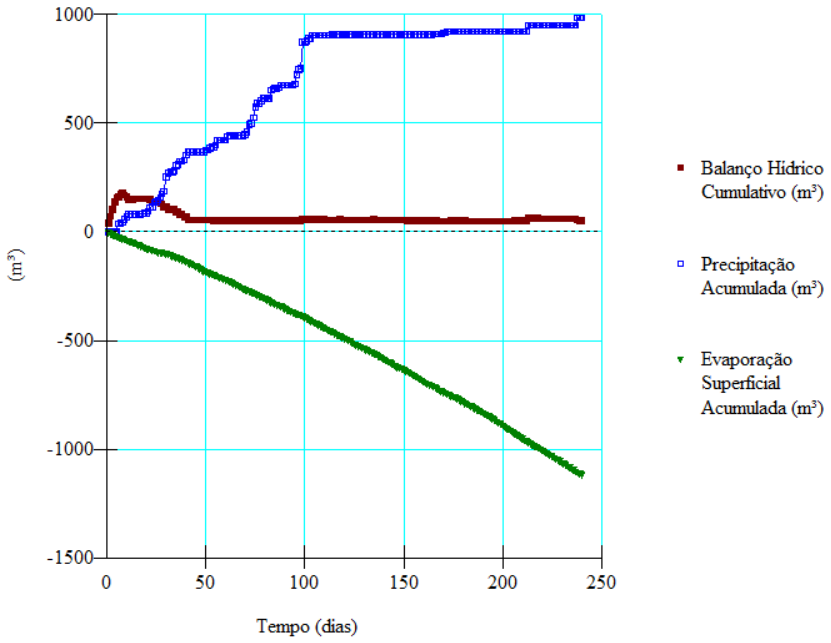


Figura 3.31 - Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (análise com reservatório).

A Figura 3.32 apresenta a distribuição das poro pressões com os respectivos valores para o 248º dia da análise e também os quatro nós que serão avaliados durante o período de 248 dias com as respectivas elevações nas análises seguintes. As elevações correspondentes para cada nó são: Nó 1 (El. 1300,69m); Nó 2 (El. 1285,60m); Nó 3 (El. 1213,31m); Nó 4 (El. 1137,00m).

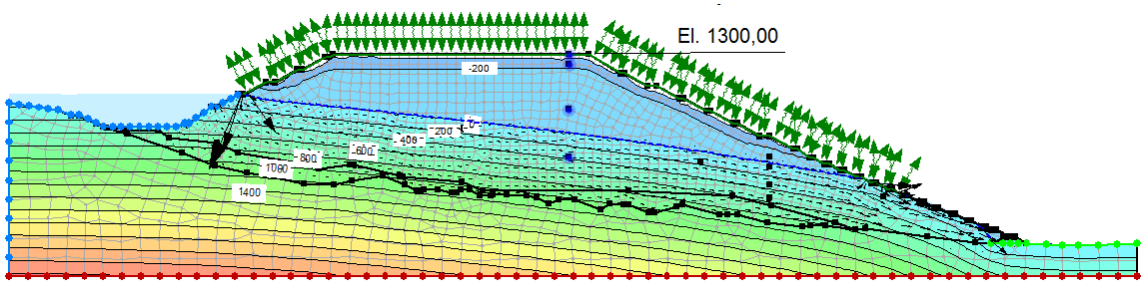


Figura 3.32 - Distribuição das poro pressões na seção de análise e dos nós considerados na avaliação das poro pressões (análise com reservatório).

Para melhor avaliação dos resultados foram escolhidos nós que estão situados na região não saturada e um nó localizado na área saturada.

Observando o comportamento das poro pressões positivas do Nó 4, que está localizado na região saturada da pilha, é possível ver que ao longo do período há uma tendência de queda dos valores. Isto pode estar associado a uma queda no nível da linha freática devido ao período em que não há ocorrência de chuvas e o conseqüente ganho de resistência devido a uma tendência de aumento das poro pressões negativas, conforme observado nos Nós 1, 2 e 3, mas principalmente no Nó 1, mais próximo da superfície. Para os Nós 2 e 3 há uma consistência e uma variação de valores que demonstram que apesar da diferença em relação às elevações que se encontram o comportamento de ambos é bastante semelhante em termos dos valores das poro pressões negativas observadas. Por outro lado, o Nó 1, situado na superfície da pilha apresenta variações e valores maiores para as poro pressões negativas, demonstrando, da mesma forma que foi visto no estudo de caso apresentado anteriormente, que há uma forte sensibilidade pelos parâmetros do solo nas áreas mais superficiais das estruturas em relação às condições climáticas.

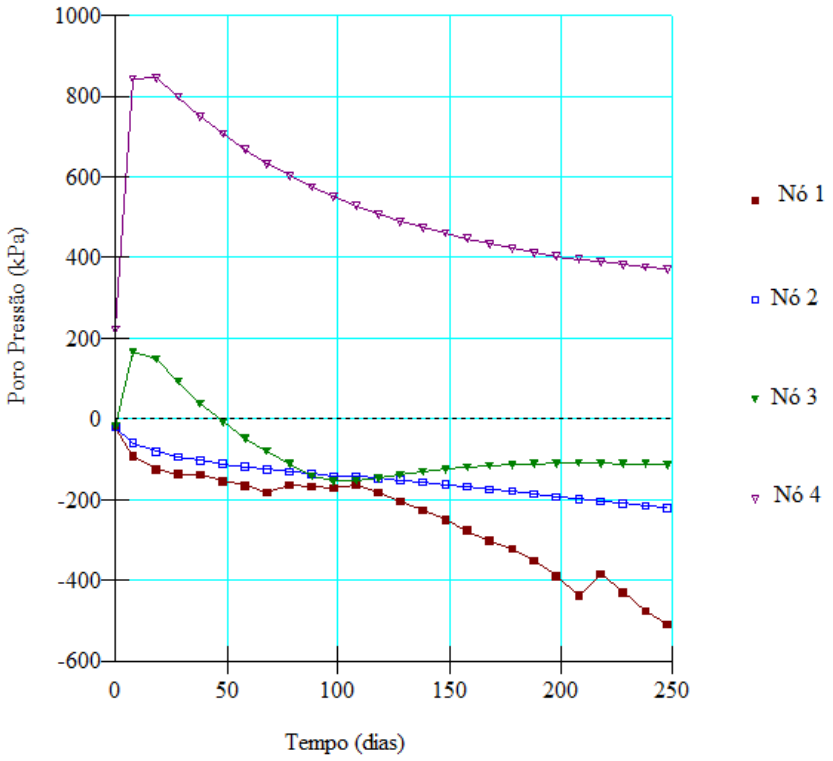


Figura 3.33 - Variações das poro pressões (análise com reservatório).

As análises de estabilidade produzidas para este caso de solicitação da pilha devido a consideração de um reservatório serão apresentadas a seguir e foram desenvolvidas, assim como no estudo de caso, em três períodos do ano, buscando também representar de forma adequada a condição da sazonalidade. Foram realizadas análises da estabilidade global e local da pilha.

Para as análises seguintes os nós considerados estão apresentados na Figura 3.34.

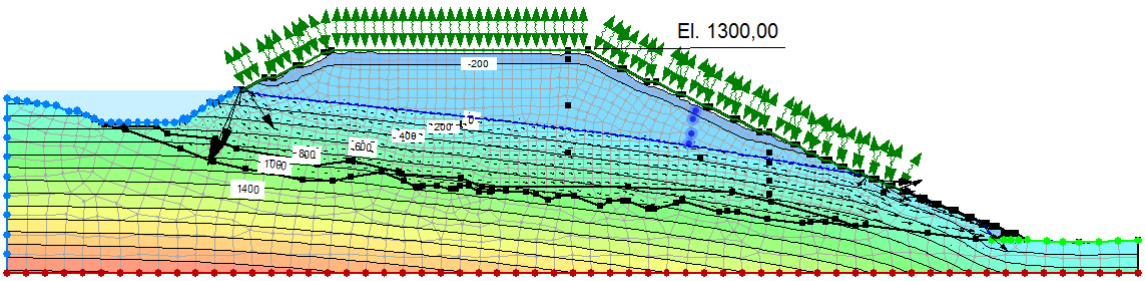


Figura 3.34 – Nós considerados para a avaliação da Figura 3.35 e Figura 3.36.

A Figura 3.35 apresenta a variação da saturação da estrutura pela profundidade por um perfil de quatro pontos específicos localizados na região mais profunda da superfície potencial de ruptura da análise de estabilidade global para os quatro dias mostrados na legenda. Ao avaliar a

Figura 3.36 é possível fazer uma correlação com a Figura 3.35 e observar que, com a redução do grau de saturação ao longo do período de análise, as poro pressões negativas apresentam aumento correspondente, o que gera um incremento nos parâmetros de resistência do solo. Desta forma é observado um correspondente aumento dos fatores de segurança, mesmo sendo um aumento sensível, ao longo do tempo, conforme apresentado nas Figuras das análises de estabilidade global da pilha (8º dia - Figura 3.38, 108º dia - Figura 3.41; 218º dia - Figura 3.44; 248º dia - Figura 3.47).

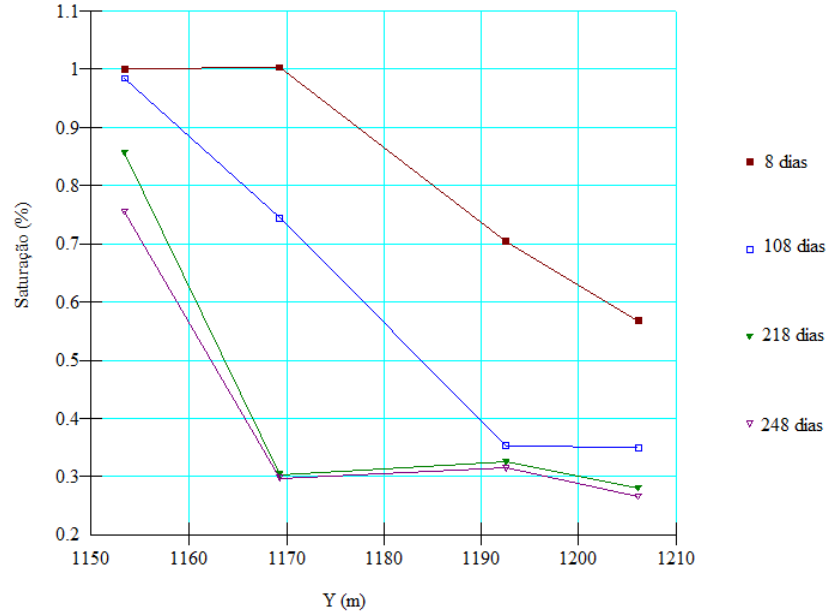


Figura 3.35 - Grau de saturação em relação a profundidade (análise com reservatório).

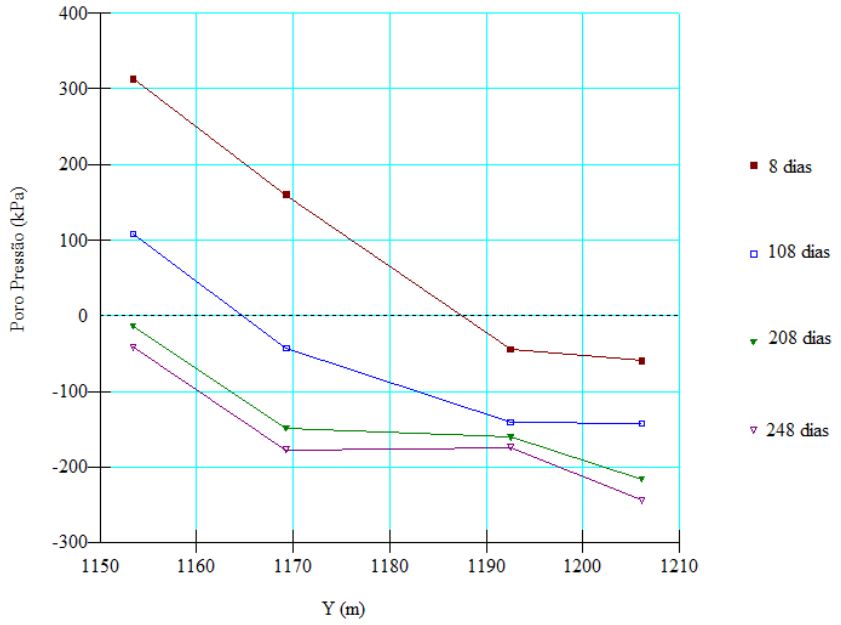


Figura 3.36 - Variação das poro pressões em relação à profundidade para quatro pontos específicos da malha (análise com reservatório).

Na avaliação das poro pressões positivas deste caso, a Figura 3.42, a Figura 3.45 e a Figura 3.48 mostram que é possível verificar um aumento destes valores em relação ao estudo de caso apresentado anteriormente para os quatro períodos aqui considerados.

Este fato provavelmente está associado ao posicionamento mais elevado da linha freática, devido a consideração de existência de um reservatório, o que condiciona uma abrangência maior da área saturada da estrutura.

Nas análises de estabilidade foram consideradas duas situações distintas, uma análise local e uma análise global da superfície crítica de ruptura do talude. Na análise de estabilidade local, para os quatro períodos considerados, conforme mostrado pela Figura 3.37 – 8º dia da análise, Figura 3.40 – 108º dia, pela Figura 3.43 – 218º dia e ainda pela Figura 3.46 – 248º dia, é observado que a região saturada da pilha não apresenta resistência adequada às solicitações impostas, devido aos valores dos fatores de segurança muito próximos de uma unidade.

Ao se avaliar as análises de estabilidade global, que foram realizadas para os mesmos períodos das análises locais, de acordo com a Figura 3.38 – 8º dia, Figura 3.41 – 108º dia. A Figura 3.44 – 218º dia e a Figura 3.47 – 248º dia, é observado um aumento nos valores dos fatores de segurança em relação às análises locais. Este incremento pode estar associado às poro pressões negativas geradas na região não saturada da pilha que a depender dos valores atingidos podem tornar o esqueleto sólido mais rígido e produzir um aumento na tensão efetiva. Porém, este aumento observado não é satisfatório para garantir a segurança operacional da pilha de estéril como barramento de água. O que se pode verificar é que, para que a pilha passe a atuar como barragem em uma condição futura, seria necessário passar por adequações que pudessem viabilizar esta consideração.

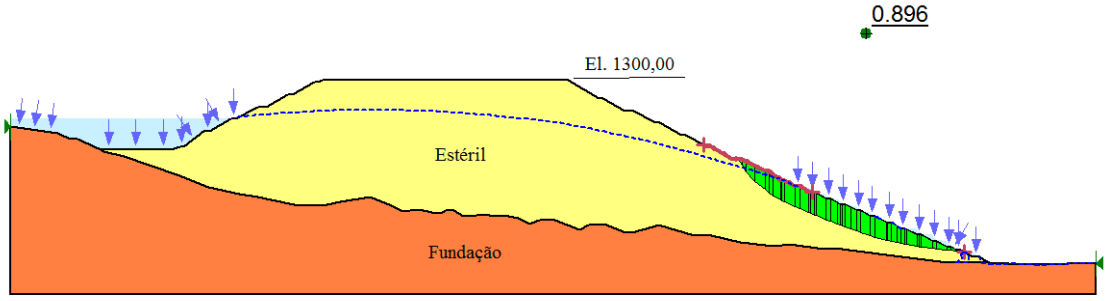


Figura 3.37 – Análise de estabilidade local para o 8º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

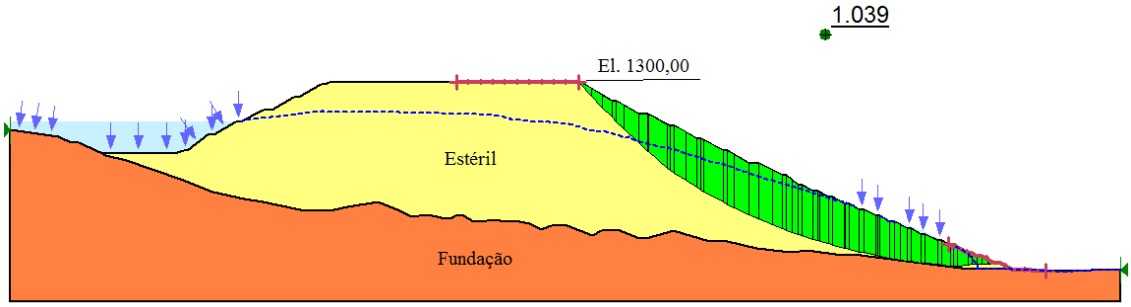


Figura 3.38 – Análise de estabilidade global para o 8º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

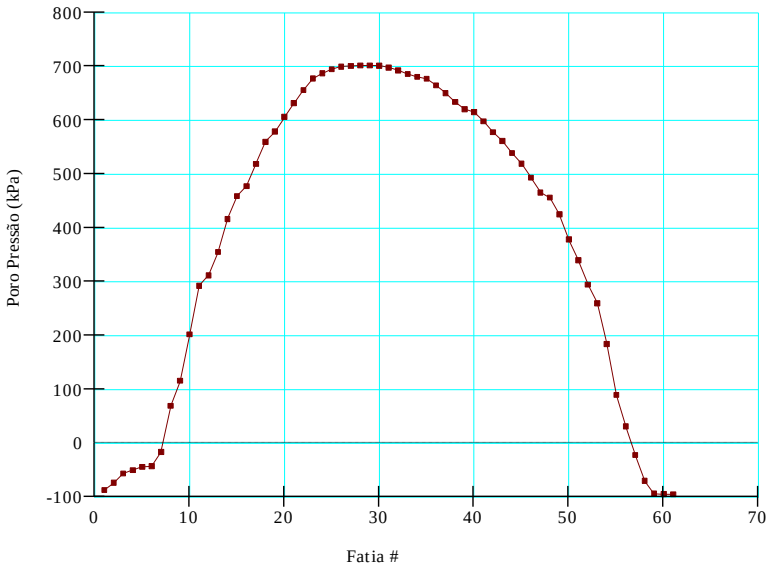


Figura 3.39 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 8º dia da análise (análise com reservatório).

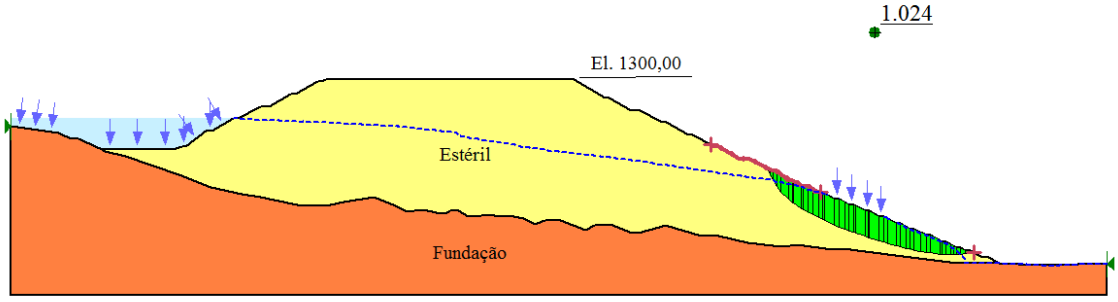


Figura 3.40 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

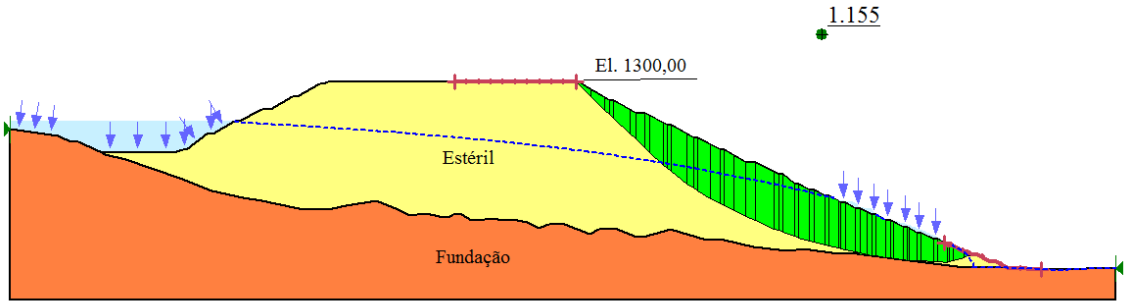


Figura 3.41 - Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

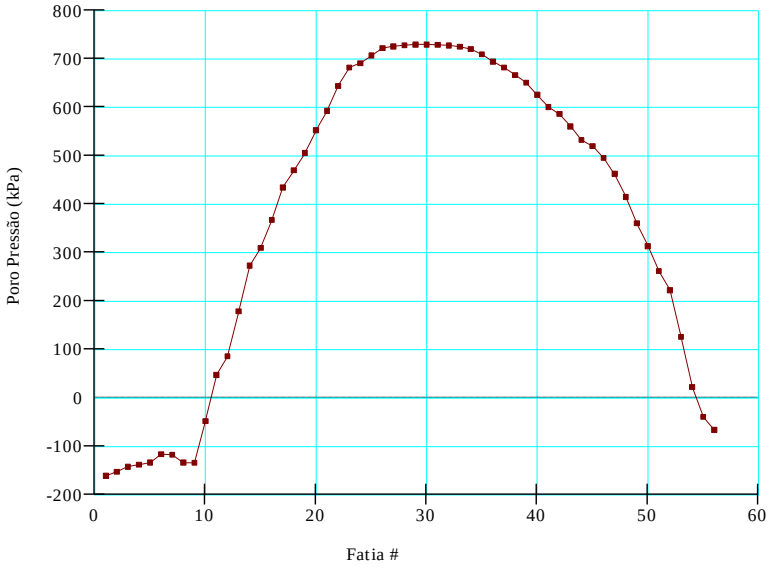


Figura 3.42 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 108º dia da análise (análise com reservatório).

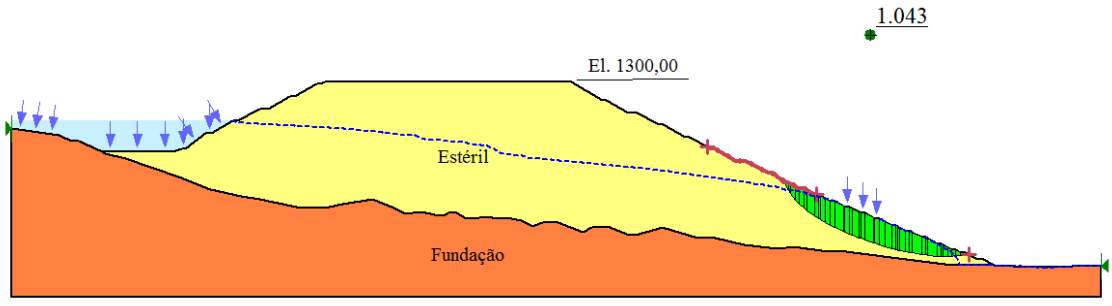


Figura 3.43 - Análise de estabilidade local para o 208º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

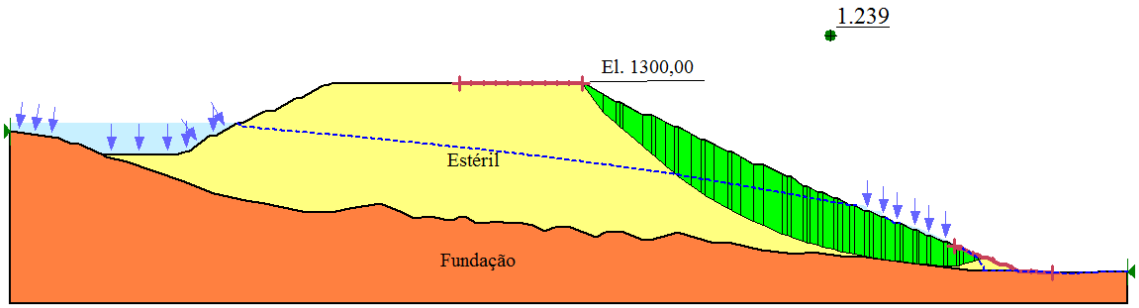


Figura 3.44 - Análise de estabilidade global para o 208º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

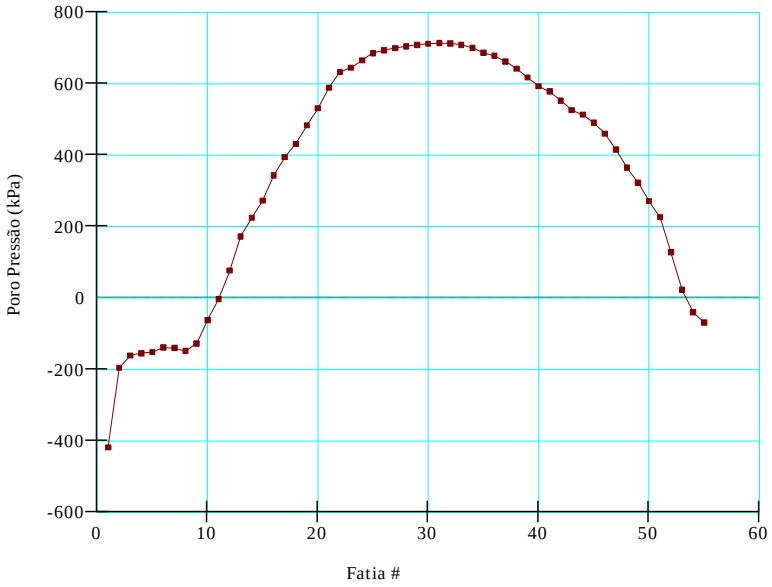


Figura 3.45 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 208º dia da análise (análise com reservatório).

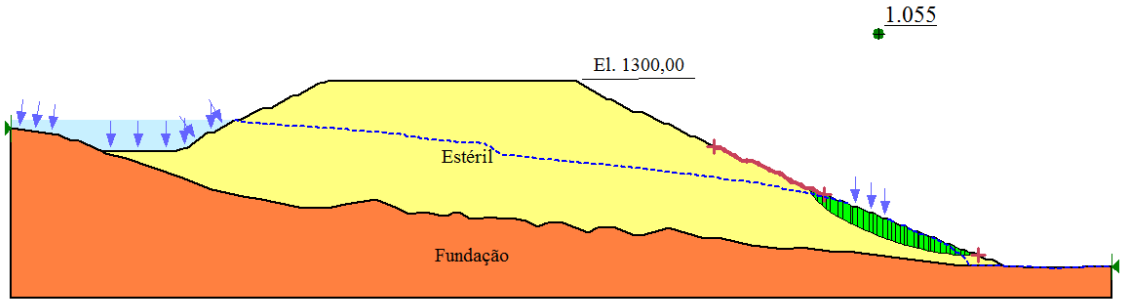


Figura 3.46 - Análise de estabilidade local para o 248º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

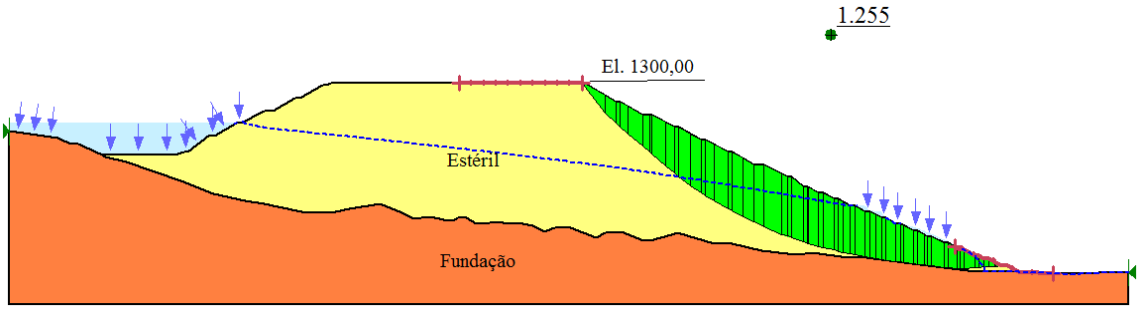


Figura 3.47 - Análise de estabilidade global para o 248º dia – Superfície crítica de ruptura (análise com reservatório).

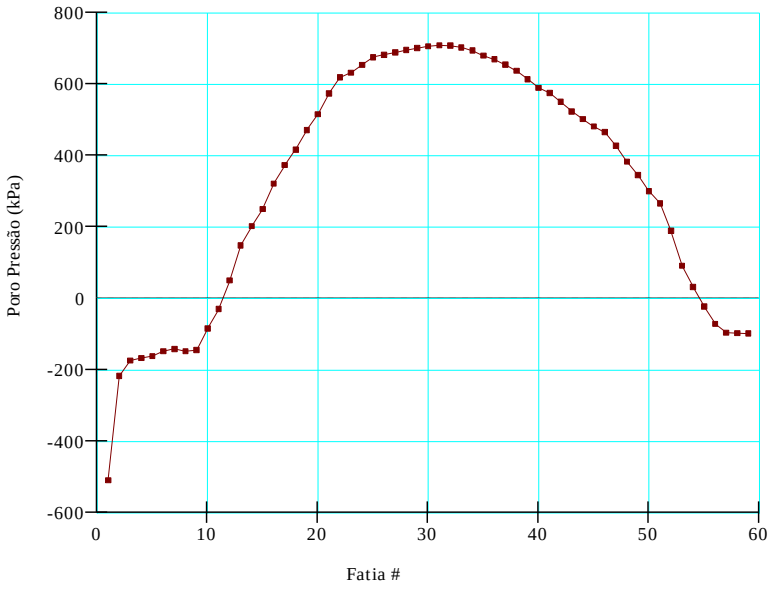


Figura 3.48 - Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 248º dia da análise (análise com reservatório).

A Figura 3.49 apresenta a variação dos valores referentes aos fatores de segurança da pilha para a análise global da estabilidade durante os 248 dias considerados na análise numérica inserindo a sucção e também sem a consideração desta. O objetivo é promover uma análise comparativa da influência da sucção no processo de análise. Ao avaliar o período inicial de análise da Figura 3.33 (variação das poro pressões) até aproximadamente o 28º dia de análise pode ser observado um pico no valor da poro pressão positiva, que pode ser associado à queda do fator de segurança no mesmo período para a Figura 3.49. No decorrer do período, é notado o crescente aumento dos

valores dos fatores de segurança. Este fato pode estar associado ao período seco, em que há uma redução no grau de saturação do maciço, com o conseqüente incremento das poro pressões negativas e aumento da resistência da estrutura. Neste caso também é observada a importância de uma avaliação mais cuidadosa da influência da sucção na estabilidade de uma estrutura.

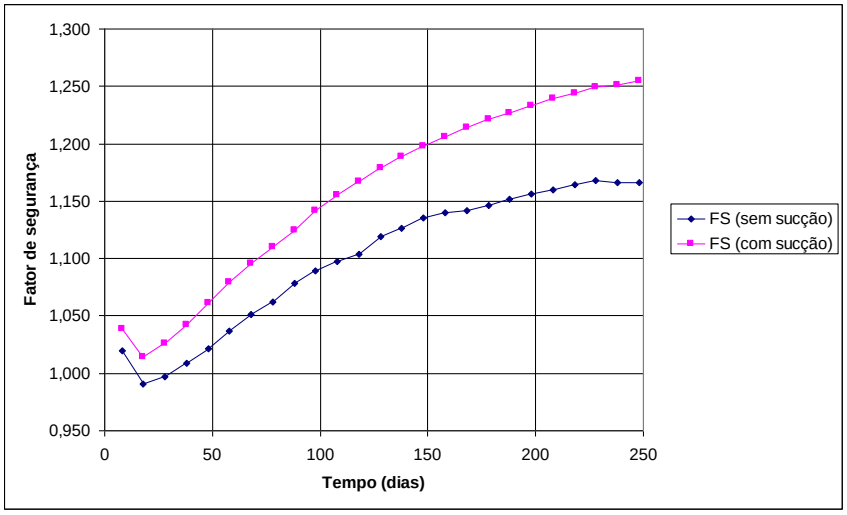


Figura 3.49 – Correlação do Fator de segurança x tempo para análise de estabilidade com sucção e sem sucção (análise com reservatório).

3.4.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MAXIMIZAÇÃO DE DADOS PLUVIOGRÁFICOS NO PROCESSO SAZONAL DE FLUXO NA PILHA DE ESTÉRIL

A análise que será apresentada foi desenvolvida para avaliar a sensibilidade da ferramenta numérica e também do comportamento da pilha de estéril analisada em relação aos dados climáticos com informações principalmente de volume de chuvas mais intensas e reais, como as que ocorreram na cidade de São Paulo em dezembro de 2009 e janeiro de 2010. Para isto, foram utilizados os dados de entrada do estudo de caso apresentado anteriormente. No entanto, os dados climáticos que foram utilizados nos estudos anteriores, que eram provenientes exclusivamente dos valores fornecidos pela estação meteorológica localizada na Mina do Pico, tiveram o período correspondente a dois meses modificados. As alterações citadas correspondem aos dados climáticos de dezembro de 2009 e janeiro de 2010 da cidade de São Paulo,

principalmente em relação aos valores de precipitações medidos, que ficaram bem acima da média desta cidade, que é de 190 mm para o mês de dezembro e de 240 mm para janeiro (a fonte dos dados informados é do endereço eletrônico www.weatherbase.com). A máxima precipitação no mês de janeiro, medida oficialmente pela estação meteorológica do Mirante de Santana, de responsabilidade do INMET, foi de 481,4 mm no ano de 1947. No mês de janeiro de 2010 foi registrado até as 16 horas do dia 30 o valor de 480,5 mm de chuva, valor bem próximo do recorde já registrado. O recorde não foi alcançado devido ao cálculo feito pelo INMET não considerar a chuva da tarde do dia 31 de janeiro de 2010.

Na cidade de Belo Horizonte a média de precipitações para o mês de dezembro é de 319 mm e para o mês de janeiro é de 296 mm, conforme fonte: *MSN Weather*. Assim, ao inserir os dados de precipitações medidas na cidade de São Paulo para o mês de dezembro com 350 mm e o mês de janeiro com 466,36 mm, conforme dados disponibilizados e apresentados no Anexo IV, poderá ser realizada uma análise da influência destes valores de precipitações no comportamento da pilha de estéril.

Os dados climáticos inseridos na análise foram obtidos por meio de pesquisa realizada dia 01/03/2010 no endereço eletrônico do INMET referentes a estação meteorológica A701 (Mirante Santana) localizada na cidade de São Paulo. Na data consultada foi informado que os dados disponibilizados eram “brutos e sem consistência com o único objetivo de deixá-los disponíveis de forma imediata.” Foi informado ainda que “uma nova versão apresentará os dados depois de verificação de consistência”. Os dados foram disponibilizados com medições realizadas de hora em hora no período considerado. Para inserção na análise foi procedido um tratamento prévio para obtenção de valores médios diários.

Os dados climáticos utilizados nos estudos apresentados nesta análise também são constituídos por 348 dias, assim como foi feito no estudo de caso. As alterações provenientes de dados climáticos da cidade de São Paulo correspondem ao período que vai de 01 a 31 representando os valores informados para o mês de janeiro e de 318 a 348 dias para o mês de dezembro.

Ao iniciar as análises de fluxo, na Figura 3.50 é mostrado o resultado do Balanço Hídrico (Ciclo Hidrológico). Assim como nas outras análises, os dados climáticos informados foram considerados pelo período de 348 dias. É possível observar que os valores cumulativos apresentam um sensível aumento em relação ao Balanço Hídrico do estudo de caso da Figura 3.6. Este incremento pode ser associado a um reflexo do aumento dos valores das precipitações inseridas na análise.

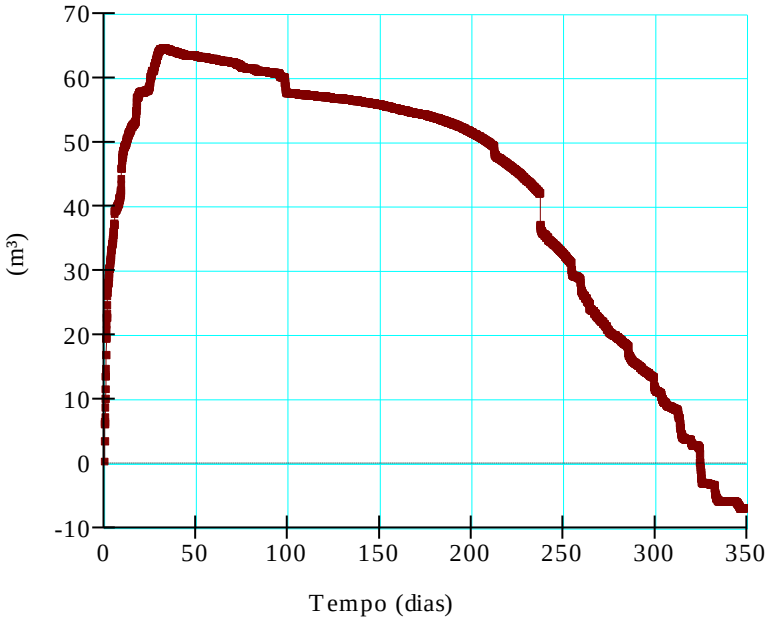


Figura 3.50 – Balanço hídrico acumulado (aumento dos dados pluviográficos).

A seguir são apresentadas a Figura 3.51, Figura 3.52 e a Figura 3.53 que demonstram o Balanço Hídrico completo da análise. Podem ser notadas pequenas diferenças na quantificação da Precipitação acumulada e na Evaporação superficial em relação ao estudo de caso. Porém esta diferença não é significativa. É possível afirmar que as alterações estão associadas principalmente ao incremento do volume de chuvas realizado na análise em questão. Na Figura 3.52 é observada uma pequena redução no valor total de volume evaporado, que configuram que a maior entrada de água no processo pode de fato impor uma dificuldade à continuidade do processo de evaporação.

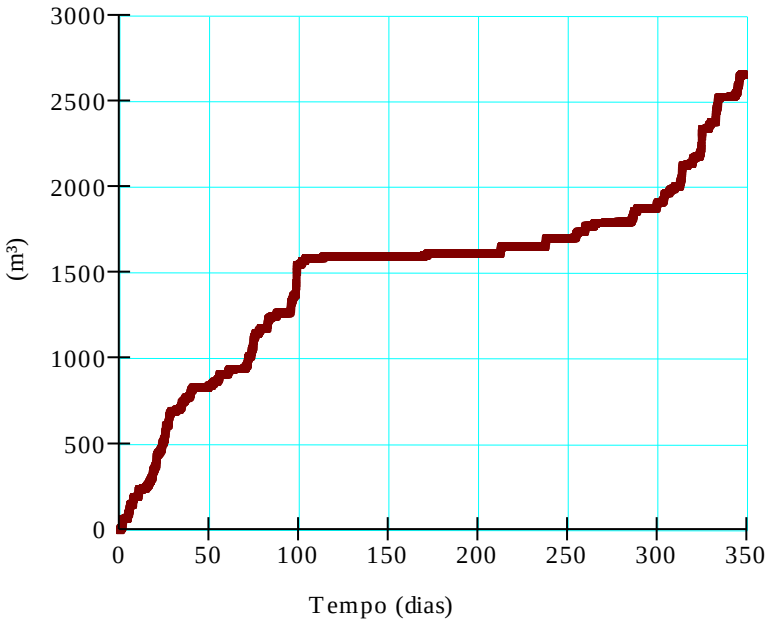


Figura 3.51 – Precipitação acumulada (aumento dos dados pluviográficos).

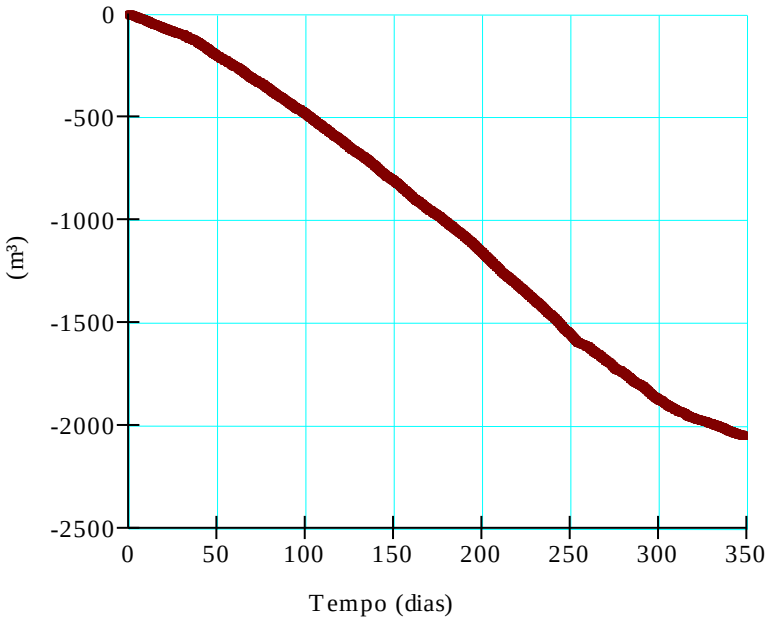


Figura 3.52 – Evaporação superficial acumulada (aumento dos dados pluviográficos).

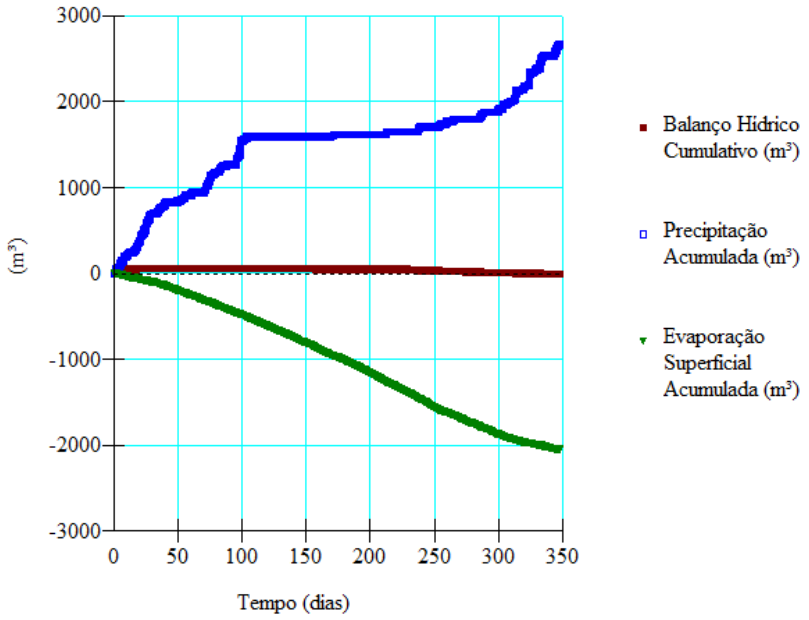


Figura 3.53 – Resumo do balanço hídrico para o modelo completo (aumento dos dados pluviográficos).

A Figura 3.54 mostra a variação de temperatura em três nós distintos localizados conforme já apresentado na Figura 3.10. A ordem de grandeza dos valores encontrados é a mesma obtida no estudo de caso. Apesar disso, a característica marcante desta figura está na análise do Nó 1537 que representa o Nó superficial. Até o 50º dia é possível observar um acréscimo acentuado dos valores de temperatura. Este fato provavelmente está associado a uma sensibilidade maior da região mais superficial da pilha às condições de contorno atmosféricas, como já mencionado anteriormente, sendo que os 30 primeiros dias estão inseridos no período de maior volume de chuvas da análise, o que poderia justificar tal comportamento.

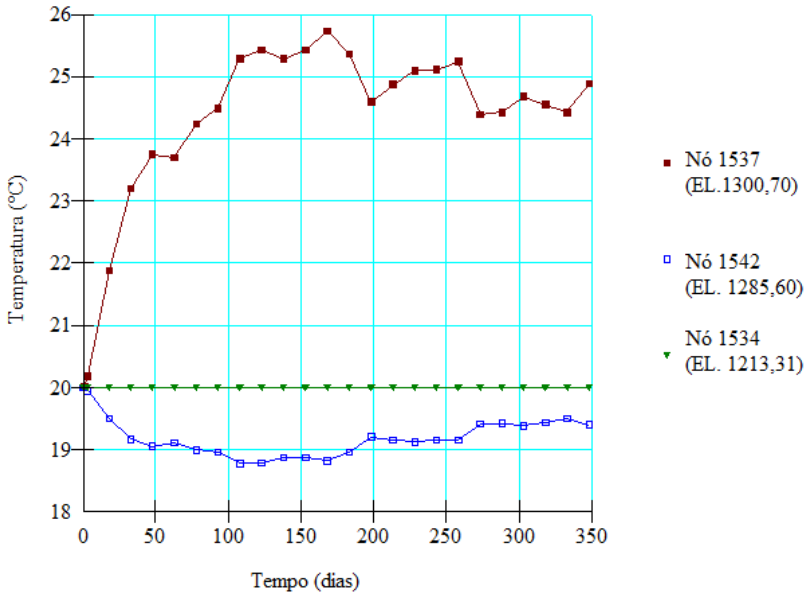


Figura 3.54 – Variações de temperatura (aumento dos dados pluviográficos).

Na Figura 3.55 todos os nós analisados estão localizados na zona vadosa. Como esperado as poro pressões apresentaram os maiores valores para o Nó 1537, que está posicionado na região mais superficial da seção da pilha e que sofre mais rapidamente as influências provenientes das condições atmosféricas, assim como foi observado no estudo de caso. Outra observação importante é que o aumento das poro pressões negativas até o 100º dia ocorre de forma branda visto que neste período que vai até o início do mês de abril a ocorrência de chuvas é bastante acentuada. A partir deste período é observado um aumento acentuado e contínuo das poro pressões negativas até meados do 300º dia. Ao analisar o Nó 1537 com mais critério é possível notar que a partir de aproximadamente o 260º dia há uma continuidade no aumento das poro pressões negativas até o 300º dia, porém de forma mais suave. Este comportamento representa a influência do período seco até o 260º dia que está compreendido entre os meses de abril a setembro e a partir daí até o 300º dia já inserido em outro ciclo de período chuvoso no mês de outubro. Do 300º dia até o final da análise há uma contínua redução nos valores das poro pressões negativas que pode estar associado ao aumento do teor de umidade do solo para o período analisado.

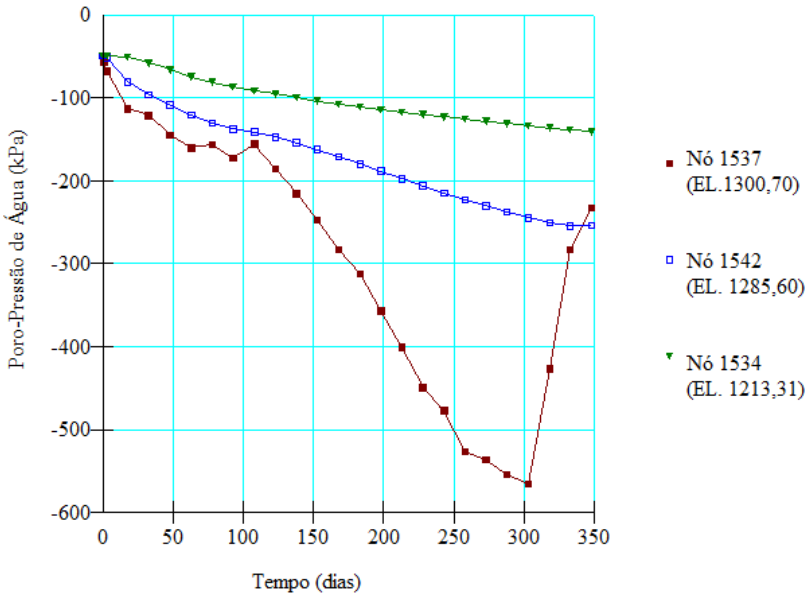


Figura 3.55 – Variações das poro pressões (aumento dos dados pluviográficos).

Semelhante a análise realizada para a Figura 3.13 do estudo de caso, da mesma forma na Figura 3.56 é apresentado o comportamento dos fluxos na plataforma final da pilha na El. 1300,00 m. É possível observar aumento nos valores de infiltração de água para este caso em todos os dias analisados considerando volume de chuva mais intenso.

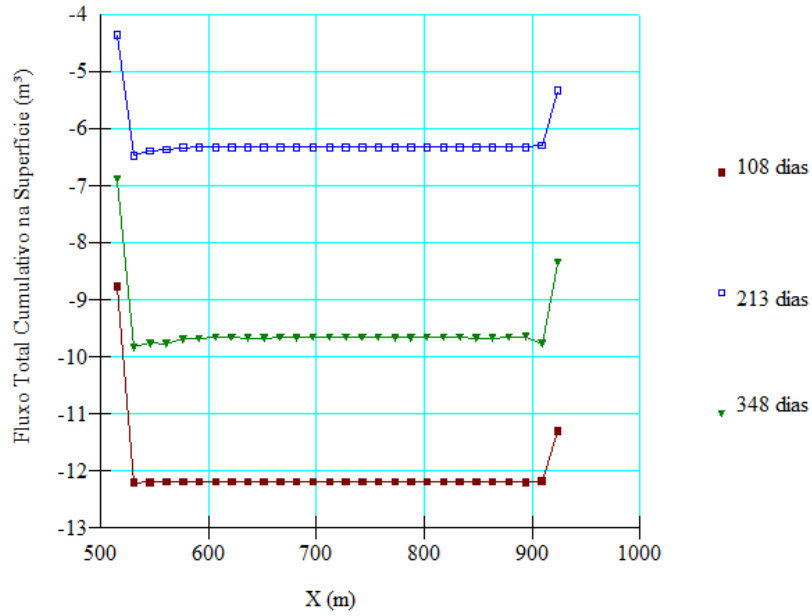


Figura 3.56 – Variações do fluxo total acumulado na superfície (aumento dos dados pluviográficos).

A seguir serão realizadas as ponderações em relação à análise sazonal de estabilidade da pilha devido ao aumento do volume de chuvas considerado nos dados climáticos.

A Figura 3.57 apresenta a variação da saturação pela profundidade por um perfil de cinco pontos específicos localizados na região mais profunda da superfície potencial de ruptura para os três dias mostrados na legenda. Nas elevações mais baixas é que estão os maiores valores de saturação. Em uma análise associada com a Figura 3.58 é possível fazer uma correlação em que a medida que o grau de saturação diminui no decorrer do ano e em direção às cotas mais elevadas da pilha, em resposta a este processo, as poro pressões negativas apresentam aumento no decorrer do ano em direção a região mais superficial da pilha. Desta forma, com o processo de dessaturação da pilha há um correspondente aumento dos fatores de segurança no decorrer do ano, como pode ser visto nas Figuras das análises de estabilidade (108º dia - Figura 3.59 e Figura 3.60; 213º dia - Figura 3.62 e Figura 3.63; 348º dia - Figura 3.65).

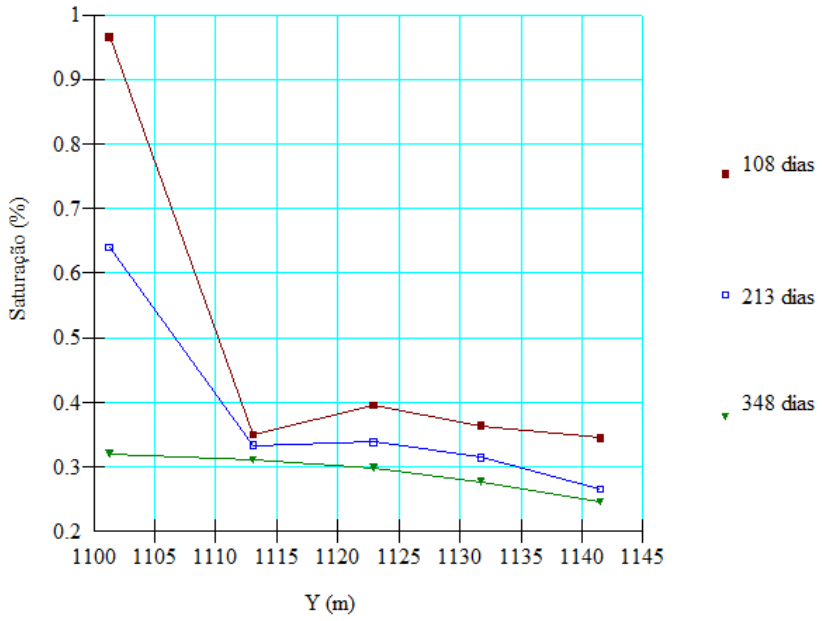


Figura 3.57 – Grau de saturação em relação a profundidade (aumento dos dados pluviográficos).

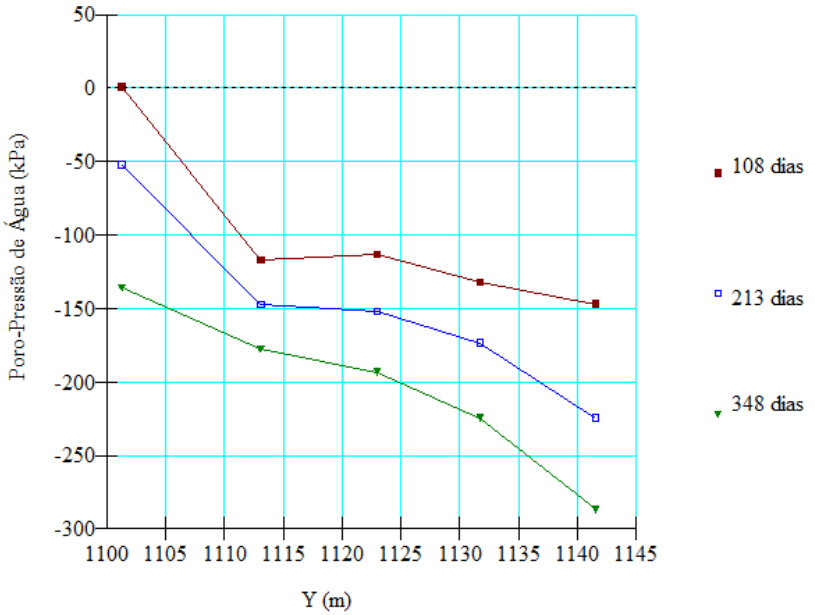


Figura 3.58 – Variação das poro pressões em relação à profundidade (aumento dos dados pluviográficos).

A ordem de grandeza dos valores encontrados para as poro pressões na Figura 3.61 para o 108º dia, na Figura 3.64 para o 213º dia e na Figura 3.66 para o 348º dia são semelhantes à ordem de grandeza identificada no estudo de caso. Portanto, é possível concluir que o aumento no volume de chuvas nos meses de dezembro e janeiro incluídos nos dados de entrada desta análise não afetou os valores dos fatores de segurança da estrutura de forma significativa. É importante ressaltar que todas as análises realizadas são análises globais e, portanto, as conclusões observadas são relativas a esta condição. É possível que, caso seja realizada uma análise mais específica de um ponto onde existam instabilidades localizadas da pilha, como uma área onde existam trincas em direções variadas ou recalques diferenciais, a influência do volume de precipitação seja mais sensível. Tratando da análise de fluxo realizada anteriormente é notado que o volume mais intenso de chuvas provoca aumento em vários parâmetros se comparados com as mesmas análises feitas para o estudo de caso.

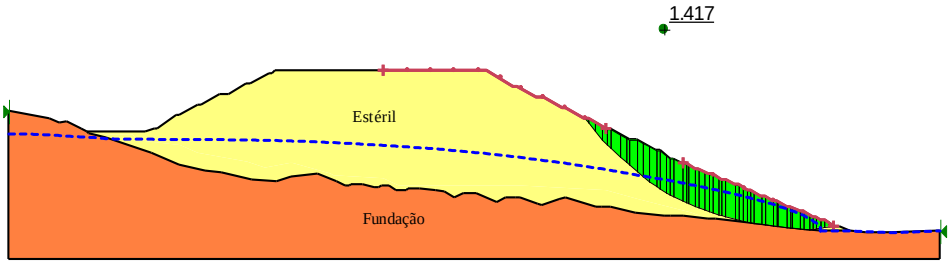


Figura 3.59 – Análise de estabilidade local para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos).

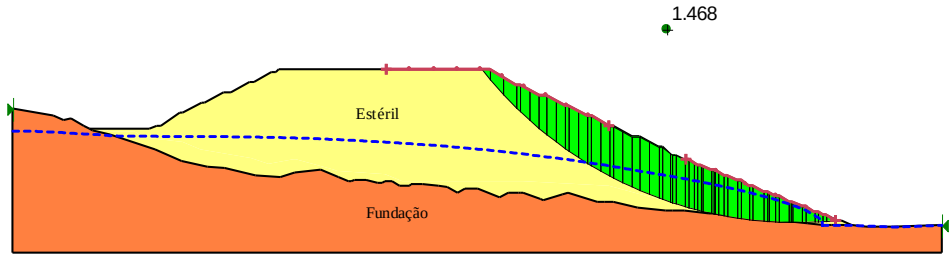


Figura 3.60 – Análise de estabilidade global para o 108º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos).

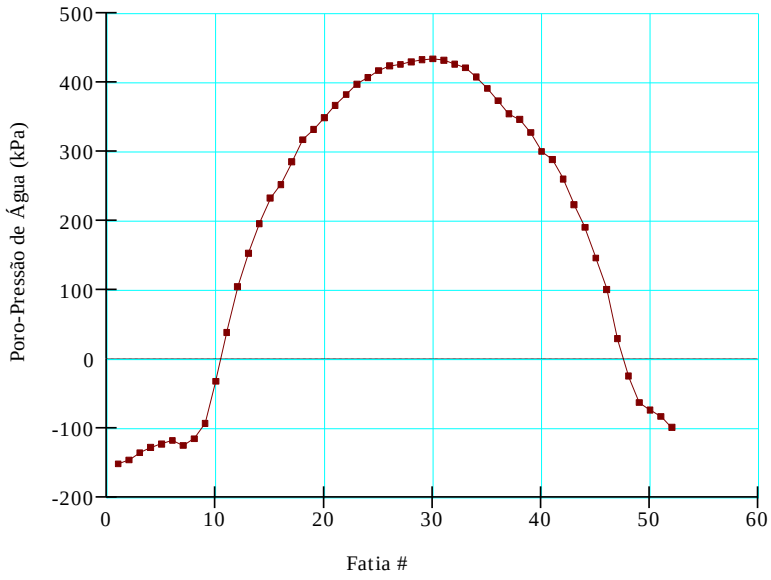


Figura 3.61 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 108º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos).

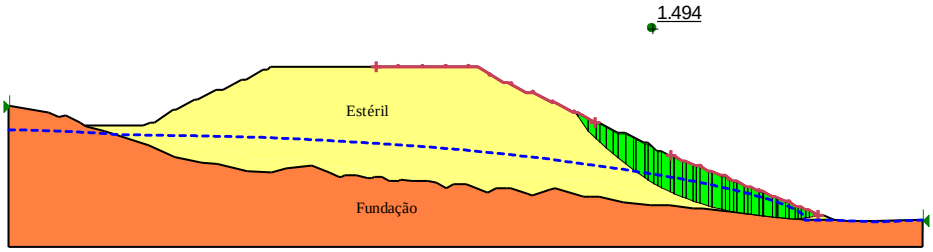


Figura 3.62 - Análise de estabilidade local para o 213º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos).

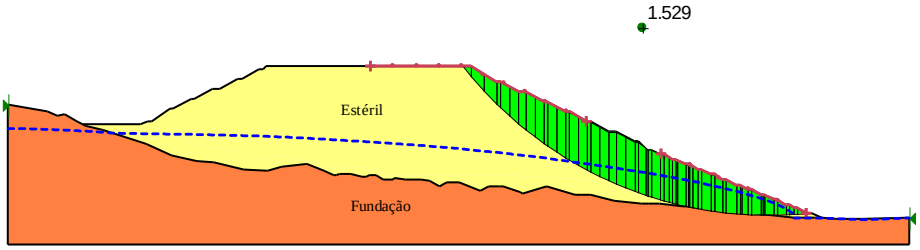


Figura 3.63 - Análise de estabilidade global para o 213º dia – Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos).

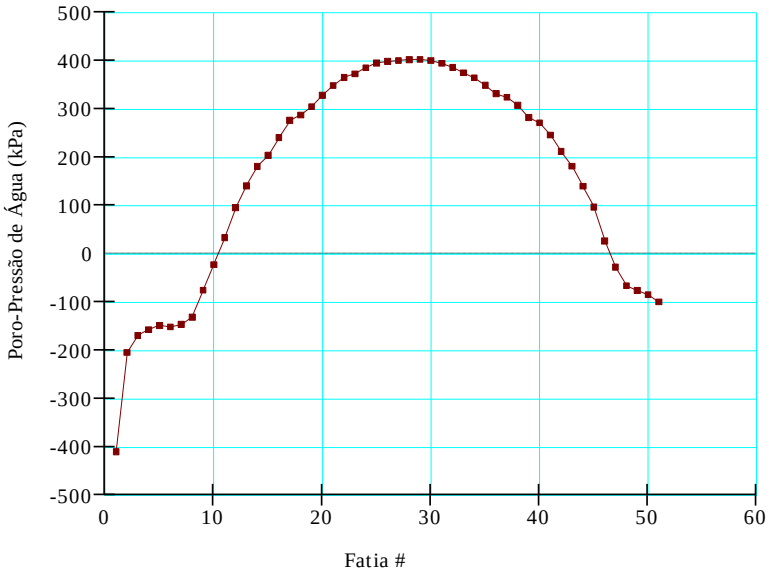


Figura 3.64 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 213º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos).

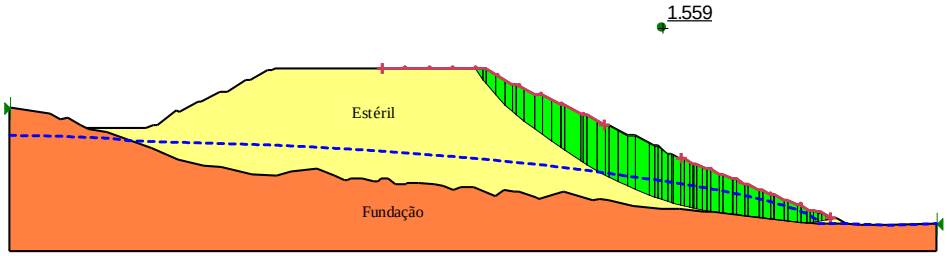


Figura 3.65 – Análise de estabilidade global para o 348º dia - Superfície crítica de ruptura (aumento dos dados pluviográficos).

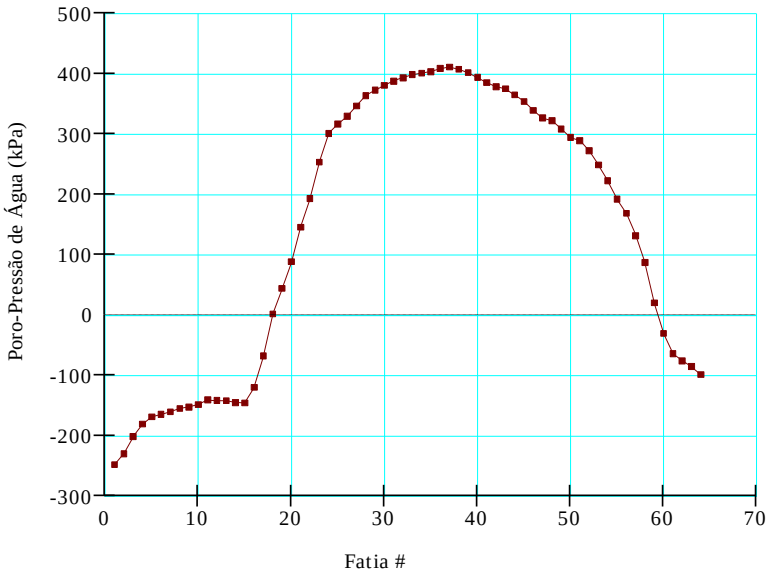


Figura 3.66 – Poro pressões na superfície potencial crítica de ruptura global para o 348º dia da análise (aumento dos dados pluviográficos).

A Figura 3.67 apresenta a variação do fator de segurança durante o período de 348 dias. É apresentada a variação dos valores dos fatores de segurança da pilha no decorrer do ano para a situação com sucção e sem considerar a influência desta no comportamento dos valores encontrados. No período chuvoso, que compreende o tempo 0 até o 108º dia aproximadamente, é observado um declínio dos valores. A partir deste ponto há o aumento dos valores dos fatores de segurança, marcado pelo período de seca. Nesta avaliação é possível observar a diferença significante entre os valores dos fatores de segurança considerando a influência da sucção.

Na avaliação deste estudo, assim como no estudo de caso apresentado, mais uma vez é colocada a relevância de uma avaliação de estruturas desta natureza com observação da influência da sucção na estabilidade.

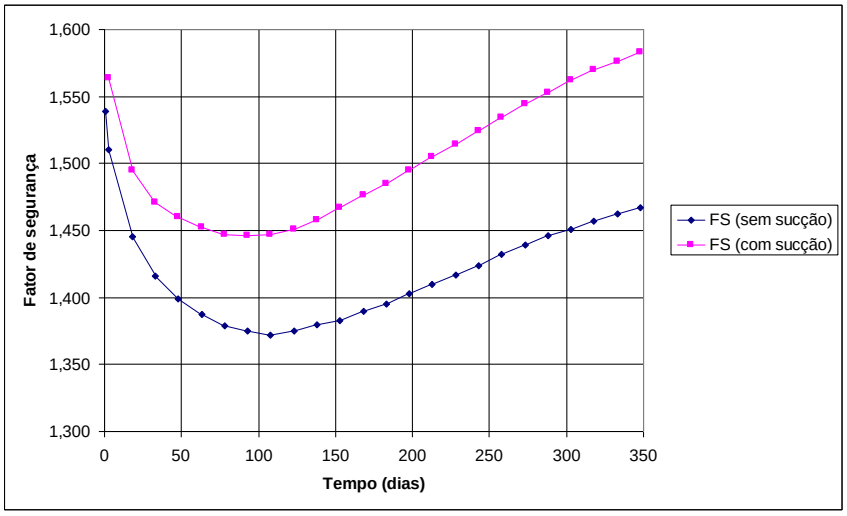


Figura 3.67 - Fator de segurança x tempo – Análise de estabilidade global - (aumento dos dados pluviográficos).

A análise de sensibilidade considerando a maximização de dados pluviográficos apresenta pouca variação para os valores de fatores de segurança em relação aos alcançados no estudo de caso, considerando a influência da sucção. A diferença observada é da ordem de 0,2% se comparada aos valores observados no estudo de caso.

Capítulo 4

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pilhas de estéril de minério de ferro são estruturas complexas tanto pelas características diversas dos materiais que as constituem quanto pelo processo sazonal de fluxo que é estabelecido.

Para implementar a análise numérica proposta neste trabalho determinadas condições simplificadoras foram admitidas visando possibilitar a avaliação da sazonalidade e sua influência na estabilidade da pilha. Uma destas condições simplificadoras foi admitir que o material predominante da pilha, um tipo de solo de características finas fosse considerado como predominante, onde foram adotados valores médios para os parâmetros do solo. Esta hipótese foi admitida devido à complexidade em caracterizar e compartimentar todos os tipos de materiais dispostos na pilha. Outra consideração adotada foi de que toda a área da pilha se encontra sem vegetação.

Para a determinação dos parâmetros necessários de serem utilizados como dados de entrada das análises foram estabelecidas correlações, conforme apresentado no Capítulo 3, de forma que os valores dos parâmetros utilizados fossem o mais próximo possível da realidade para a realização das análises. É importante enfatizar que o foco do trabalho está no fato de se utilizar uma ferramenta numérica que seja útil em apresentar respostas para análises em estruturas onde zonas vadosas existam e sua influência no comportamento dos solos.

Desta forma, a proposta de inserir uma modelagem que realize a interação solo-atmosfera e a busca em otimizar os métodos de análise foi apresentada como satisfatória. A condição de inserção de dados climáticos no contexto de solos não-

saturados torna a análise mais realista e a depender da qualidade dos dados, mais confiável. No entanto, a adequada caracterização e bom conhecimento dos materiais da estrutura a ser analisada e no caso específico das pilhas de estéril após a disposição dos diversos tipos de solo no aterro é de grande relevância para qualidade e confiabilidade das análises sazonais de estabilidade.

Por meio das análises apresentadas no Capítulo 3 é possível concluir ainda que a possibilidade de acompanhar o desenvolvimento das sucções e verificar sua influência no comportamento dos solos pode ser entendida como uma otimização da modelagem da análise de estabilidade sazonal de estruturas com condições não saturadas e saturadas.

4.2. CONCLUSÕES

Através do estudo de caso da pilha de estéril apresentado no Capítulo 3, com base nos parâmetros adotados, é possível verificar que a pilha se encontra em condições de estabilidade satisfatória, apresentando fator de segurança com valor superior a 1,5 em determinados períodos do ano e muito próximo deste valor nos outros períodos. A variação dos valores de fatores de segurança devido à sazonalidade, conforme mostrado na Figura 3.25, mostra a influência das condições climáticas no comportamento da pilha, e ainda a condição da estabilidade considerando a sucção e sem a consideração desta. As análises de estabilidade sem considerar a influência da sucção apresentam valores um pouco abaixo de 1,5. Isto é notado próximo ao 100º dia, onde o período chuvoso está finalizando.

A Figura 3.11 apresenta que a temperatura tende a diminuir com a profundidade e ser estável para camadas mais profundas durante a evaporação. As maiores oscilações observadas na temperatura da região superficial mostram que a sensibilidade desta área às condições climáticas é mais significativa.

De acordo com a Figura 3.12, o modelo mostra que as poro pressões em relação ao tempo, quanto mais próximas da zona de saturação mais aumenta a sucção. Na realidade

as variações das condições de estabilidade são maiores quanto mais próximo se estiver da superfície.

A massa de água absorvida, conforme apresentado pela Figura 3.13, tende a gerar processos de recalque no tempo devido ao peso de água que se acumula.

Com base na variação do grau de saturação na zona potencial de ruptura o estudo evidenciou, conforme mostrado pela Figura 3.14, que a queda alcança taxa média da ordem de 36% no período analisado. Este comportamento ratifica o quanto os parâmetros, peso específico, condutividade hidráulica, coesão aparente, rigidez, dentre outros variam num período anual.

Os estudos de estabilidade mostraram que a condição local, mais especificamente na região do pé do talude, é a menos estável. Como era de se esperar as análises de estabilidade mostraram aumento do fator de segurança com a entrada do período de seca. No entanto, o ganho obtido na estabilidade global foi de apenas 6%.

No estudo de caso apresentado, o comportamento da estabilidade verificado para a condição com sucção em relação à condição mais convencional, sem sucção, mostrou que esta é bastante conservadora. O fator de segurança na condição de sucção matricial incorporada na análise chega a alcançar até 7% acima do fator de segurança para análise sem sucção.

Nas duas análises de sensibilidade realizadas, considerando a existência de um reservatório e com maximização de dados pluviográficos são observadas as mesmas condições que foram feitas para o estudo de caso, se tratando da variação do fator de segurança ao longo do ano, considerando a influência da sucção e sem considerá-la. É identificado o aumento da resistência global da estrutura considerando a influência da sucção nos dois estudos de sensibilidade.

No caso do estudo de sensibilidade considerando a existência de reservatório, as análises mostraram que a variação do fator de segurança alcança valores máximos da ordem de 1,25 considerando a influência da sucção.

Já para o estudo de sensibilidade em que foi inserida a maximização de dados pluviográficos, as análises apresentaram que a pilha de estéril sofre pouca influência desta condição. Fazendo uma comparação entre os fatores de segurança para a análise global do estudo de caso e desta análise pode ser observado que as variações não ultrapassam o correspondente a 0,2%.

As análises apresentadas neste trabalho ratificam a importância da aplicação desta metodologia no desenvolvimento de projetos de estruturas desta natureza e na avaliação operacional destas obras, seja no período construtivo, seja na condição de fechamento da pilha ou descomissionamento da mina.

4.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Uma proposta de trabalho futuro seria realizar o estudo de uma metodologia de caracterização dos materiais que constituem uma pilha de estéril em implantação ou já implantada, considerando ainda a determinação de parâmetros térmicos para uma análise numérica de fluxo na zona vadosa, como a condutividade térmica e o calor específico volumétrico. Com os dados obtidos proceder à realização das análises numéricas que foram propostas neste trabalho.

Ainda como sugestão seria o desenvolvimento de estudo detalhado sobre o processo de transpiração e sua inclusão nas análises numéricas transientes com uma abordagem focada na estabilidade sazonal de estruturas com zonas não saturadas.

Referências Bibliográficas

ALONSO, T. P. (2005), Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaios com Permeâmetro de Parede Flexível. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

APOSTILA DE HIDROLOGIA – Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFBA – Capítulo 4 – Evaporação e Evapotranspiração, 9p.

ASTM D5084 – 90 (1990) – Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 23p.

BONDER, B. H. (2008), Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de Laboratório e de Campo. Dissertação de Mestrado – Unicamp, Campinas/SP.

BOTELHO, A. P. D. (2001), Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, UFOP/MG.

CARVALHO, A. L. (2001), Contaminação de Águas Subsuperficiais em Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos – O Caso do Antigo Lixão de Viçosa (MG). Dissertação de Mestrado – UFV/MG.

DF CONSULTORIA, (2004), Relatório e Desenhos do Projeto Executivo da Pilha de Estéril Capão da Serra.

DUARTE, A. P. L. (2004), Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica. Tese de Doutorado – PUC-Rio, RJ.

FREDLUND, D. G. e RAHARDJO, H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 517p.

FREDLUND, D. G. e XING, A. (1994), Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 31(4):533-546.

FREDLUND, D. G., XING, A. e HUANG, S. (1994), Predicting the Permeability Functions for Unsaturated Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve. Canadian Geotechnical Journal, 33(3):440-448.

FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A. (1979), Groundwater. Prentice Hall, Inc., New Jersey, USA, 604 p.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD., (2007), "Vadose Zone Modeling with Vadose/W 2007" – An Engineering Methodology – Third Edition, March 2008, Calgary, Alberta, Canada.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD., (2007), "Stability Modeling with Slope/W 2007" - An Engineering Methodology – Fourth Edition, November 2008, Calgary, Alberta, Canada.

GERSCOVICH, D. M. S. (1994), Modelagem Numérica de Fluxo em Meios Porosos Saturados/Não Saturados com Aplicações ao Estudo de Encostas do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado - PUC/Rio, RJ.

GOMES, R. C. (2007) - Notas de Aula – Caracterização Tecnológica e Sistema de Disposição de Resíduos de Mineração, Nugeo, UFOP.

GUIMARÃES, L. M. (2008), Desenvolvimento de um Permeâmetro para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada e Não Saturada de Solos. Dissertação de Mestrado - UFV/MG.

HOPMANS, J. W. e DANE, J. H. (1986), Temperature Dependence of Soils Hydraulic Properties, Soil Sci. Soc., American Journal 50, pp. 562-567.

IBAÑEZ, J. P. (2008), Modelagem Micro-Mecânica Discreta de Solos Residuais. Tese de Doutorado - PUC/Rio, RJ.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – Disponível em (www.inmet.gov.br) – acessado em 01/03/2010.

LIBARDI, P.L., (2005), Dinâmica da Água no Solo. Editora da Universidade de São Paulo, SP.

MARINHO, F. A. M. (2005), Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados. Texto apresentado a USP/SP para o concurso de livre docência. USP, São Paulo/SP.

MARQUES, M. E. S. (1999), Influência da Velocidade de Deformação e temperatura nos adensamentos de argilas naturais. Dissertação de Mestrado - COPPE, UFRJ, RJ.

OLIVEIRA, D. R. (2003), Análise da Interação Solo-Atmosfera durante a Secagem para a Argila Porosa de Brasília. Dissertação de Mestrado – UNB/DF.

PEREIRA, W. L. (2009), Análise da Estabilidade da Pilha de Estéril do Correia – Mina de Gongo Soco – Para Implantação da Ferrovia Estrada de Ferro Vitória-Minas – EFVM. Dissertação de mestrado - Nugeo, UFOP/MG.

PORTO, R. L. L., FILHO, K. Z., e MARCELLINI, S. S. (2000) - Apostila de Hidrologia Aplicada – Instrumentos de Medições Climáticas. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP/SP, 32p.

RICHARDS, L. A. (1931), Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums". *Physics* **1** (5): 318–333.

SOTO, M. A. (2004), Comparação de Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos Não Saturados. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.

TEIXEIRA, *et al.* (2001), Decifrando a Terra, São Paulo, Oficina de Textos, 2000. Reimpressão 2001, 568 p.

TOWHATA, I., KUNTIWATTANAKU, P. e KOBAYASHI, H. (1993), A Preliminary Study on Heating of Clays to Examine Possible Effects of Temperature on Soil-Mechanical Properties, Soils and Foundations, vol. 33, 4, p. 184-190.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. (1980), Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.; Madison, v.44, p.892-898.

VASCONCELOS, A. (2008), Transporte de Contaminantes em Meios Porosos Saturados e Não Saturados. Estudo de Caso: Vazamento de Gasolina. Dissertação de Mestrado – UFOP/MG.

VIVIAN, J. B. (2008), Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel. Dissertação de Mestrado – UFRGS/RS.

WILSON, G. W. (1990), Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

WILSON, G. W., FREDLUND, D. G. e BARBOUR, S. L. (1997), The Effect of Soil Suction on Evaporative Fluxes from Soil Surfaces. Canadian Geotechnical Journal, 34, p. 145-155.

I. ANEXO

DADOS METEOROLÓGICOS

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
Média / Total	224,10	24,37	15,09	95,78	53,71	4,22
Mínima	0,00	17,24	13,31	84,70	30,85	2,65
Máxima	83,70	28,89	17,04	99,20	93,10	7,44
01/01/2008	0,00	28,48	16,57	85,20	25,10	3,74
02/01/2008	0,00	26,96	16,10	75,80	36,58	4,26
03/01/2008	0,00	25,29	15,30	78,00	40,93	3,73
04/01/2008	0,00	27,69	15,44	79,70	35,45	3,07
05/01/2008	0,00	27,89	16,77	81,00	34,11	3,30
06/01/2008	37,50	20,10	14,83	98,40	62,10	4,79
07/01/2008	1,20	22,83	14,37	98,90	62,16	3,97
08/01/2008	1,30	24,23	15,23	99,10	60,36	3,30
09/01/2008	14,30	20,24	14,30	98,60	77,40	3,11
10/01/2008	11,70	23,56	15,10	99,50	63,16	3,97
11/01/2008	11,40	24,63	15,57	99,60	54,35	3,30
12/01/2008	0,20	24,96	16,17	99,00	62,09	3,41
13/01/2008	0,00	22,36	16,30	98,80	69,90	3,58
14/01/2008	0,00	22,89	14,11	97,30	52,88	5,50
15/01/2008	0,00	22,96	13,84	98,40	52,21	4,60
16/01/2008	0,00	23,56	14,17	98,50	55,75	3,83
17/01/2008	0,10	26,03	14,91	94,30	45,53	3,85
18/01/2008	0,70	24,76	14,90	98,80	49,21	3,51
19/01/2008	1,50	25,57	16,37	97,60	57,15	5,13
20/01/2008	1,90	26,43	15,70	99,00	54,08	4,52
21/01/2008	7,50	18,37	14,90	99,00	76,70	4,24
22/01/2008	15,50	20,96	14,48	99,20	80,10	3,46
23/01/2008	4,10	19,30	14,83	99,40	83,50	3,68
24/01/2008	18,40	20,69	14,70	99,60	76,60	5,03
25/01/2008	1,60	20,96	15,17	99,40	77,90	3,71
26/01/2008	8,40	20,56	14,04	99,70	83,60	4,45
27/01/2008	11,10	16,70	13,64	100,00	97,10	4,85
28/01/2008	15,70	15,43	13,11	100,00	99,50	5,13
29/01/2008	12,20	17,24	14,23	100,00	94,40	3,62
30/01/2008	61,70	21,76	15,03	99,90	73,40	4,19
31/01/2008	16,40	22,56	13,23	99,80	75,70	4,22
Média / Total	254,40	22,77	14,95	95,85	63,52	4,03
Mínima	0,00	15,43	13,11	75,80	25,10	3,07
Máxima	61,70	28,48	16,77	100,00	99,50	5,50
01/02/2008	5,40	27,30	17,44	99,90	50,34	3,11
02/02/2008	0,10	24,50	17,31	99,80	68,57	3,67

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
03/02/2008	7,00	24,16	15,97	100,00	68,04	7,12
04/02/2008	21,70	18,17	15,37	100,00	93,30	4,45
05/02/2008	6,00	20,63	15,10	100,00	77,50	3,43
06/02/2008	10,90	22,49	15,43	99,80	73,60	2,95
07/02/2008	0,90	24,56	15,03	100,00	57,95	3,04
08/02/2008	6,00	24,90	14,90	100,00	59,56	3,21
09/02/2008	22,90	26,57	15,50	98,30	47,81	3,41
10/02/2008	10,70	26,90	17,31	91,20	51,74	2,24
11/02/2008	0,00	26,17	17,57	95,70	52,88	2,67
12/02/2008	0,00	27,03	17,37	96,70	46,20	2,82
13/02/2008	0,00	26,37	16,18	91,70	49,14	3,64
14/02/2008	0,00	26,03	16,70	93,40	52,35	4,01
15/02/2008	0,00	27,10	15,97	92,00	40,33	4,52
16/02/2008	0,40	23,70	15,64	99,00	52,21	4,52
17/02/2008	0,00	26,03	14,71	95,60	38,26	3,93
18/02/2008	0,00	26,10	15,10	93,50	50,74	4,11
19/02/2008	8,10	18,77	14,50	99,20	61,38	4,33
20/02/2008	0,00	24,83	15,64	93,10	52,28	3,00
21/02/2008	8,20	23,36	14,90	99,30	58,89	3,99
22/02/2008	6,50	22,90	16,17	98,90	67,50	4,10
23/02/2008	0,10	23,36	16,50	96,80	66,37	4,43
24/02/2008	9,20	22,16	14,75	99,60	74,70	2,87
25/02/2008	19,80	21,89	14,83	99,80	75,40	4,34
26/02/2008	0,00	24,36	14,38	99,60	58,69	5,65
27/02/2008	0,00	21,76	14,17	99,70	68,70	6,11
28/02/2008	0,00	22,96	12,51	99,90	58,89	5,43
29/02/2008	0,00	22,29	14,32	97,00	68,10	3,33
Média / Total	143,90	24,05	15,56	97,57	60,05	3,95
Mínima	0,00	18,17	12,51	91,20	38,26	2,24
Máxima	22,90	27,30	17,57	100,00	93,30	7,12
01/03/2008	16,80	18,17	15,90	100,00	96,70	4,86
02/03/2008	3,10	23,09	15,97	100,00	61,02	4,80
03/03/2008	0,00	25,30	16,44	100,00	50,74	3,67
04/03/2008	0,40	25,23	16,04	100,00	49,81	4,07
05/03/2008	0,00	27,10	15,57	96,60	37,19	2,86
06/03/2008	0,00	25,43	15,70	95,30	54,68	3,59
07/03/2008	0,20	26,50	15,90	97,60	51,94	4,53
08/03/2008	0,40	25,03	14,51	96,20	51,81	3,48
09/03/2008	0,00	23,16	16,64	99,80	60,36	2,83
10/03/2008	3,90	24,50	15,64	97,80	58,69	3,17

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
11/03/2008	10,10	23,63	15,77	99,80	65,03	2,92
12/03/2008	33,70	23,76	15,70	100,00	68,57	3,36
13/03/2008	3,10	23,10	15,64	100,00	70,80	4,27
14/03/2008	27,70	18,91	14,71	100,00	91,30	4,78
15/03/2008	45,30	22,96	14,23	100,00	74,10	4,49
16/03/2008	15,50	22,56	14,31	100,00	71,50	3,18
17/03/2008	0,00	24,30	16,04	99,70	56,02	4,99
18/03/2008	11,30	22,89	15,64	100,00	55,88	4,70
19/03/2008	9,40	22,63	14,84	100,00	56,62	4,41
20/03/2008	0,00	23,63	14,51	98,50	51,01	4,85
21/03/2008	0,00	23,96	15,18	98,20	47,74	4,30
22/03/2008	0,00	24,16	14,78	93,00	55,82	2,62
23/03/2008	35,50	24,56	15,84	99,20	56,28	3,20
24/03/2008	5,80	22,96	16,37	96,80	66,77	3,01
25/03/2008	4,40	23,36	15,24	99,70	60,49	3,98
26/03/2008	0,90	19,31	14,78	100,00	80,30	3,17
27/03/2008	0,60	22,50	14,24	100,00	68,37	3,15
28/03/2008	12,30	22,96	13,85	99,60	63,23	2,60
29/03/2008	0,00	24,43	15,57	99,80	58,57	2,84
30/03/2008	0,00	21,63	13,65	99,70	61,76	8,32
31/03/2008	0,00	19,51	12,18	100,00	66,78	6,53
Média / Total	240,40	23,27	15,21	98,95	61,93	3,98
Mínima	0,00	18,17	12,18	93,00	37,19	2,60
Máxima	45,30	27,10	16,64	100,00	96,70	8,32
01/04/2008	0,00	21,76	13,25	93,10	55,02	3,52
02/04/2008	0,00	22,76	13,38	94,00	45,53	2,61
03/04/2008	0,00	23,23	15,31	84,40	58,82	1,97
04/04/2008	3,90	22,03	15,37	100,00	68,37	2,78
05/04/2008	43,70	20,16	14,91	100,00	83,50	4,11
06/04/2008	17,90	17,84	15,31	100,00	100,00	4,00
07/04/2008	6,60	23,76	16,10	100,00	66,83	3,41
08/04/2008	116,40	24,43	16,17	100,00	62,29	2,64
09/04/2008	0,00	24,43	16,37	100,00	63,09	2,96
10/04/2008	3,10	25,36	16,70	100,00	61,89	2,06
11/04/2008	12,20	25,16	15,51	100,00	55,28	3,92
12/04/2008	0,00	25,16	17,78	84,80	45,67	2,18
13/04/2008	10,60	25,03	17,44	95,20	56,89	2,46
14/04/2008	0,30	24,90	16,37	97,80	65,50	4,10
15/04/2008	0,20	23,36	15,44	100,00	56,82	4,30
16/04/2008	0,10	22,69	14,78	100,00	65,63	5,99

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
17/04/2008	0,00	24,30	14,51	100,00	60,29	2,71
18/04/2008	0,00	22,96	15,91	100,00	60,12	3,91
19/04/2008	0,00	23,03	14,12	97,60	56,48	5,59
20/04/2008	0,00	22,29	14,84	100,00	69,57	4,01
21/04/2008	0,00	23,63	15,71	99,10	58,09	2,79
22/04/2008	0,00	23,29	15,58	97,80	65,70	2,47
23/04/2008	5,40	23,43	16,11	100,00	59,23	3,27
29/04/2008	0,00	25,50	16,65	81,60	40,99	2,99
30/04/2008	0,00	22,29	14,04	100,00	58,11	4,90
Média / Total	220,40	23,31	15,51	97,02	61,59	3,43
Mínima	0,00	17,84	13,25	81,60	40,99	1,97
Máxima	116,40	25,50	17,78	100,00	100,00	5,99
01/05/2008	0,00	16,50	12,31	100,00	84,00	7,54
02/05/2008	0,10	19,51	12,58	100,00	70,70	3,22
03/05/2008	0,00	22,76	13,91	100,00	53,28	3,82
04/05/2008	0,00	23,70	15,05	98,80	57,09	2,88
05/05/2008	0,00	22,23	16,30	96,80	58,89	3,87
06/05/2008	0,00	20,91	11,65	98,90	49,49	5,65
07/05/2008	0,00	20,23	11,51	87,10	44,48	2,94
08/05/2008	0,00	21,24	11,31	85,90	33,85	3,03
09/05/2008	0,00	22,36	12,78	82,00	39,59	3,98
10/05/2008	0,00	18,77	11,31	98,10	64,32	5,60
11/05/2008	0,00	17,57	11,11	98,80	70,10	6,19
12/05/2008	0,00	15,57	9,97	100,00	70,60	5,50
13/05/2008	0,00	17,24	9,57	98,50	61,98	4,07
14/05/2008	0,00	18,84	10,58	89,50	56,70	2,66
15/05/2008	0,00	19,76	12,05	92,80	63,12	1,74
16/05/2008	0,00	21,43	13,78	88,80	46,41	2,32
17/05/2008	0,00	18,57	13,65	100,00	69,06	2,91
18/05/2008	0,00	20,69	12,78	100,00	59,22	3,11
19/05/2008	0,00	22,69	13,98	90,60	45,15	1,56
20/05/2008	0,00	22,31	14,58	96,10	45,80	4,24
21/05/2008	0,00	22,96	13,65	87,50	43,53	2,51
22/05/2008	0,00	22,43	14,52	84,50	44,67	2,01
23/05/2008	0,00	22,49	13,65	86,20	39,53	2,12
24/05/2008	0,00	22,16	14,58	76,00	43,00	3,02
25/05/2008	0,00	21,76	13,32	78,20	44,87	3,30
26/05/2008	0,00	23,09	14,71	68,74	39,86	3,28
27/05/2008	0,00	22,83	14,91	88,80	42,46	3,42
28/05/2008	0,00	21,63	13,58	94,90	50,54	2,78

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
29/05/2008	0,00	22,49	12,98	83,60	42,06	2,80
30/05/2008	0,30	22,83	15,11	94,00	52,81	2,93
31/05/2008	0,00	16,30	11,51	100,00	82,60	6,63
Média / Total	0,40	20,77	13,01	91,78	53,86	3,60
Mínima	0,00	15,57	9,57	68,74	33,85	1,56
Máxima	0,30	23,70	16,30	100,00	84,00	7,54
01/06/2008	0,00	19,31	11,38	100,00	65,45	3,45
02/06/2008	0,00	18,84	11,31	100,00	62,18	3,87
03/06/2008	0,10	19,49	11,24	100,00	58,09	3,22
04/06/2008	0,10	21,36	11,38	100,00	46,00	3,12
05/06/2008	0,00	21,63	13,38	99,90	48,41	3,16
06/06/2008	0,00	22,49	13,91	90,50	38,32	2,54
07/06/2008	0,00	22,49	14,25	74,00	40,46	3,00
08/06/2008	0,00	22,29	13,38	80,80	40,99	3,38
09/06/2008	0,00	22,36	13,38	89,70	50,41	3,18
10/06/2008	0,00	22,83	13,85	91,70	33,58	3,71
11/06/2008	0,00	23,56	15,11	81,20	40,66	2,73
12/06/2008	0,00	21,83	13,92	80,70	46,47	3,23
13/06/2008	0,00	22,96	13,05	82,50	29,91	2,67
14/06/2008	0,00	22,09	12,58	89,80	48,87	3,16
15/06/2008	0,00	21,76	13,98	76,00	41,53	3,99
16/06/2008	0,00	21,17	12,04	100,00	56,69	3,38
17/06/2008	0,00	15,50	10,84	100,00	80,50	3,02
18/06/2008	0,20	21,49	10,84	100,00	40,53	2,09
19/06/2008	0,00	20,76	12,58	98,80	51,94	2,17
20/06/2008	0,00	20,89	12,71	92,30	46,34	2,75
21/06/2008	0,00	22,76	15,04	67,00	39,59	2,89
22/06/2008	0,00	23,56	15,51	79,60	40,73	2,35
23/06/2008	5,00	20,09	12,97	100,00	65,77	3,19
24/06/2008	0,10	16,90	12,58	100,00	77,50	2,83
25/06/2008	6,50	19,11	10,58	100,00	65,05	3,77
26/06/2008	0,00	15,90	8,71	100,00	66,32	6,05
27/06/2008	0,00	17,17	9,37	100,00	56,04	3,10
28/06/2008	0,10	16,50	9,11	99,60	64,38	2,97
29/06/2008	0,00	19,36	10,31	98,80	56,56	2,53
30/06/2008	0,00	20,02	11,24	90,20	27,44	2,25
Média / Total	12,10	20,55	12,35	92,10	50,89	3,12
Mínima	0,00	15,50	8,71	67,00	27,44	2,09
Máxima	6,50	23,56	15,51	100,00	80,50	6,05

VALE	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
01/07/2008	0,00	21,02	12,98	82,40	27,91	2,88
02/07/2008	0,00	21,09	11,51	98,30	37,12	3,48
03/07/2008	0,00	18,77	12,85	93,40	45,28	2,52
04/07/2008	0,00	20,84	11,65	98,90	34,59	4,02
05/07/2008	0,00	19,49	10,24	98,40	44,21	4,16
06/07/2008	0,00	18,76	10,64	96,40	48,81	3,48
07/07/2008	0,00	19,02	10,05	90,70	38,54	3,55
08/07/2008	0,00	18,42	8,78	90,90	37,99	2,32
09/07/2008	0,00	17,70	7,92	95,10	46,48	4,26
10/07/2008	0,00	17,70	10,38	99,30	52,70	4,86
11/07/2008	0,00	17,04	9,91	100,00	61,38	7,02
12/07/2008	0,00	16,84	9,24	100,00	44,82	7,07
13/07/2008	0,00	17,84	8,04	94,40	33,19	5,24
14/07/2008	0,00	18,57	8,25	92,60	41,40	4,16
15/07/2008	0,00	18,23	9,17	86,70	43,48	4,67
16/07/2008	0,00	17,97	8,58	94,50	48,15	4,09
17/07/2008	0,00	19,62	9,38	81,00	38,07	3,45
18/07/2008	0,00	20,96	10,78	75,10	32,05	3,00
19/07/2008	0,00	23,63	14,18	60,58	23,84	2,52
20/07/2008	0,00	22,96	13,85	69,61	26,64	3,02
21/07/2008	0,00	20,89	12,38	73,30	39,46	3,77
22/07/2008	0,00	20,63	10,44	84,20	44,47	3,43
23/07/2008	0,00	23,03	13,12	73,50	38,27	2,48
24/07/2008	0,00	24,30	15,18	57,92	22,50	2,30
25/07/2008	0,00	24,16	15,51	53,78	25,77	3,28
26/07/2008	0,00	21,96	11,85	100,00	44,35	5,86
27/07/2008	0,00	21,02	10,78	100,00	33,32	3,21
28/07/2008	0,00	21,83	11,38	85,10	21,30	3,83
29/07/2008	0,00	21,49	10,98	70,20	16,89	3,48
30/07/2008	0,00	22,16	10,51	74,10	25,57	2,75
31/07/2008	0,00	21,69	12,65	70,40	34,59	2,99
Média / Total	0,00	20,31	11,07	85,19	37,20	3,78
Mínima	0,00	16,84	7,92	53,78	16,89	2,30
Máxima	0,00	24,30	15,51	100,00	61,38	7,07
01/08/2008	0,00	21,63	13,45	73,80	39,13	3,17
02/08/2008	0,00	23,03	12,31	76,00	35,85	4,78
03/08/2008	0,00	23,03	15,77	68,19	35,79	6,80
04/08/2008	0,00	21,43	14,44	78,10	56,28	2,35
05/08/2008	26,90	22,43	12,35	100,00	59,91	3,44
06/08/2008	0,00	22,63	14,63	93,40	56,02	3,31

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
07/08/2008	0,00	22,96	13,24	97,90	50,61	2,82
08/08/2008	0,00	23,23	15,44	83,40	48,27	3,01
09/08/2008	0,00	22,56	13,84	92,10	56,62	3,64
10/08/2008	0,00	21,83	13,77	92,60	53,28	4,32
11/08/2008	0,00	21,76	12,24	100,00	57,22	3,73
12/08/2008	0,00	22,49	12,25	94,60	36,99	3,00
13/08/2008	0,00	23,36	13,12	79,80	33,72	3,19
14/08/2008	0,00	21,83	11,91	80,90	43,33	3,66
15/08/2008	0,00	20,69	11,44	96,40	40,13	3,90
16/08/2008	0,00	22,49	11,38	92,50	40,59	3,24
17/08/2008	0,00	21,56	11,58	89,90	38,26	3,26
18/08/2008	0,00	22,23	11,78	76,00	39,53	3,65
19/08/2008	0,00	21,69	11,51	78,00	42,73	3,57
20/08/2008	0,00	21,69	11,58	89,40	44,20	3,83
21/08/2008	0,00	22,09	11,65	80,40	42,60	3,08
22/08/2008	0,00	22,63	12,51	71,00	30,45	3,57
23/08/2008	0,00	19,49	11,85	93,90	46,02	5,95
24/08/2008	0,00	21,16	11,78	99,70	46,87	4,95
25/08/2008	0,00	22,29	10,98	99,30	38,66	3,57
26/08/2008	0,00	24,30	14,05	78,00	28,31	2,11
27/08/2008	0,00	25,16	15,78	59,98	25,44	3,07
28/08/2008	0,00	25,63	13,24	76,20	26,51	2,75
29/08/2008	0,00	27,10	15,44	68,86	16,69	2,85
30/08/2008	32,70	21,29	10,18	100,00	52,43	7,70
31/08/2008	0,60	15,90	9,17	100,00	70,90	5,95
Média / Total	60,20	22,31	12,73	85,82	43,01	3,81
Mínima	0,00	15,90	9,17	59,98	16,69	2,11
Máxima	32,70	27,10	15,78	100,00	70,90	7,70
01/09/2008	0,00	20,63	9,04	100,00	42,80	4,42
02/09/2008	0,00	23,63	12,18	78,10	23,97	2,91
03/09/2008	0,00	24,30	11,71	69,48	18,09	2,64
04/09/2008	0,00	25,90	15,58	50,70	24,77	2,01
05/09/2008	0,00	26,50	16,44	53,24	20,10	3,70
06/09/2008	0,00	28,50	16,30	56,04	21,23	3,28
07/09/2008	0,00	29,76	15,50	68,53	19,76	3,29
08/09/2008	0,00	26,03	15,64	96,00	41,33	5,16
09/09/2008	0,00	24,03	14,37	99,20	44,40	5,39
10/09/2008	0,00	25,63	13,31	99,50	44,13	3,66
11/09/2008	0,00	26,23	14,71	84,60	30,25	3,52
12/09/2008	0,00	27,23	14,71	81,20	18,29	3,41

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
13/09/2008	0,00	28,24	16,37	72,10	20,83	4,61
14/09/2008	0,00	27,23	16,17	76,90	29,38	4,97
15/09/2008	1,80	24,50	13,63	99,20	53,88	4,41
16/09/2008	18,80	18,24	13,04	100,00	71,60	3,70
17/09/2008	4,90	16,50	10,84	100,00	94,20	4,57
18/09/2008	0,00	11,51	9,17	100,00	94,10	8,13
19/09/2008	0,10	14,57	7,97	100,00	78,00	6,40
20/09/2008	0,00	16,70	9,77	100,00	77,70	2,94
21/09/2008	21,90	15,17	11,51	100,00	94,50	5,40
22/09/2008	0,10	20,16	10,70	100,00	40,53	4,84
23/09/2008	0,00	22,56	10,31	79,90	23,30	3,66
24/09/2008	0,00	21,36	9,04	96,70	44,33	6,99
25/09/2008	0,00	21,02	10,11	99,50	51,48	5,53
26/09/2008	10,50	18,44	10,09	100,00	71,60	4,20
27/09/2008	0,80	18,24	10,91	100,00	76,40	3,74
28/09/2008	0,00	22,36	11,44	100,00	33,52	5,22
29/09/2008	0,00	22,23	9,97	98,30	47,00	6,61
30/09/2008	0,00	23,70	12,45	95,50	54,28	3,09
Média / Total	58,90	22,37	12,43	88,49	46,86	4,41
Mínima	0,00	11,51	7,97	50,70	18,09	2,01
Máxima	21,90	29,76	16,44	100,00	94,50	8,13
01/10/2008	0,00	27,57	15,90	87,40	37,79	3,88
02/10/2008	3,10	19,71	14,70	98,60	61,98	4,68
03/10/2008	0,00	24,23	16,44	89,00	58,69	2,88
04/10/2008	0,00	27,43	17,77	84,80	41,80	3,35
05/10/2008	0,00	29,69	17,24	88,20	14,69	4,44
06/10/2008	0,00	28,89	16,17	99,70	31,71	6,01
07/10/2008	0,00	23,56	15,17	100,00	52,55	4,95
08/10/2008	0,00	17,57	11,11	100,00	85,60	7,93
09/10/2008	1,20	12,05	10,18	100,00	100,00	7,88
10/10/2008	0,10	20,49	9,64	100,00	57,42	5,23
11/10/2008	0,00	20,22	11,31	100,00	57,42	4,71
12/10/2008	0,00	22,29	12,65	95,50	54,75	5,35
13/10/2008	0,00	26,43	13,91	99,10	39,59	3,87
14/10/2008	0,00	26,43	14,51	91,80	40,33	2,77
15/10/2008	0,00	29,35	16,64	83,30	27,90	2,46
16/10/2008	1,40	30,56	17,51	84,60	25,03	3,47
17/10/2008	14,10	26,23	16,04	99,90	55,75	4,49
18/10/2008	25,50	24,36	14,57	100,00	62,76	4,86
19/10/2008	0,90	18,84	14,50	100,00	67,39	5,58

VALE	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
20/10/2008	11,90	19,10	14,30	100,00	79,10	5,37
21/10/2008	0,00	21,89	13,97	100,00	60,69	5,20
22/10/2008	0,00	22,96	14,11	100,00	55,82	3,86
23/10/2008	0,00	24,50	14,91	82,30	45,13	3,97
24/10/2008	0,00	26,90	15,31	76,80	33,32	3,47
25/10/2008	0,00	28,10	16,91	64,05	29,11	2,88
26/10/2008	0,00	29,03	18,17	59,84	27,30	2,88
27/10/2008	0,00	29,57	19,51	54,95	23,97	3,18
28/10/2008	0,00	29,29	17,24	99,40	38,06	4,42
29/10/2008	0,00	25,90	16,57	100,00	56,82	3,99
30/10/2008	0,00	27,10	15,97	100,00	48,41	4,35
31/10/2008	20,90	24,83	16,44	100,00	62,03	4,23
Média / Total	79,10	24,68	15,14	91,59	49,45	4,41
Mínima	0,00	12,05	9,64	54,95	14,69	2,46
Máxima	25,50	30,56	19,51	100,00	100,00	7,93
01/11/2008	2,20	21,83	15,77	100,00	69,77	3,90
02/11/2008	0,00	23,56	14,97	100,00	65,30	3,08
03/11/2008	5,00	26,63	16,90	98,20	44,40	3,49
04/11/2008	27,40	28,50	14,28	99,80	41,46	4,13
05/11/2008	3,70	24,70	15,03	100,00	65,03	3,18
06/11/2008	0,00	27,43	17,44	94,10	46,34	4,48
07/11/2008	10,60	20,91	15,43	100,00	81,40	2,64
08/11/2008	4,90	24,30	15,57	100,00	64,70	3,46
09/11/2008	1,90	26,17	17,77	96,60	47,87	2,89
10/11/2008	9,40	20,76	15,43	100,00	71,50	3,64
11/11/2008	0,00	21,69	15,10	100,00	72,40	6,27
12/11/2008	0,00	21,83	14,31	100,00	69,84	3,28
13/11/2008	21,40	18,17	15,64	100,00	90,90	3,70
14/11/2008	59,70	16,90	13,84	100,00	90,60	3,60
15/11/2008	0,00	26,30	13,91	100,00	42,46	3,26
16/11/2008	0,00	27,43	18,04	85,40	40,93	3,54
17/11/2008	7,00	24,70	16,04	100,00	59,29	4,00
18/11/2008	1,40	19,70	14,57	100,00	80,90	3,12
19/11/2008	0,90	19,91	13,18	100,00	79,70	6,46
20/11/2008	0,10	18,91	11,78	100,00	75,10	5,94
21/11/2008	0,00	18,04	10,78	100,00	70,70	6,02
22/11/2008	0,60	16,70	12,38	100,00	83,80	5,16
23/11/2008	0,70	20,96	12,51	100,00	69,50	5,07
24/11/2008	5,30	20,36	13,05	100,00	69,17	5,26
25/11/2008	0,10	21,36	13,37	100,00	61,89	5,29

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE SUPERVISÃO DE MONITORAMENTOS AMBIENTAIS - SPAM GERÊNCIA DE MEIO AMBIENTE - GAMAL SUMÁRIO METEOROLÓGICO - ESTAÇÃO PICO					
Data	**Precipitação Total (mm)**	**Temperatura do Ar (°C)**		**Umidade Relativa do Ar (UR%)**		**Vento**
		máxima	**mínima**	**máxima**	**mínima**	**Velocidade média m/s**
26/11/2008	0,70	20,43	14,18	100,00	72,60	5,01
27/11/2008	4,00	20,04	13,71	100,00	76,50	4,20
28/11/2008	23,80	22,43	13,44	100,00	64,30	5,04
29/11/2008	0,20	21,36	13,97	100,00	64,43	3,98
30/11/2008	0,20	21,63	14,51	100,00	66,90	3,66
Média / Total	191,20	22,12	14,56	99,14	66,66	4,22
Mínima	0,00	16,70	10,78	85,40	40,93	2,64
Máxima	59,70	28,50	18,04	100,00	90,90	6,46
01/12/2008	0,00	25,57	14,31	92,50	47,00	2,89
02/12/2008	0,00	28,76	16,97	100,00	34,51	3,16
03/12/2008	1,50	21,69	15,84	100,00	69,71	5,89
04/12/2008	0,00	25,23	14,32	99,20	35,19	3,70
05/12/2008	0,60	23,83	14,18	100,00	58,15	4,37
06/12/2008	0,00	20,83	14,18	100,00	72,70	3,45
07/12/2008	0,00	23,03	14,24	100,00	60,56	3,76
08/12/2008	11,80	24,30	14,38	100,00	56,62	3,10
09/12/2008	0,60	25,43	14,58	100,00	44,33	2,32
10/12/2008	0,00	26,83	14,91	100,00	34,18	2,47
11/12/2008	1,30	23,90	16,50	96,50	58,89	2,95
12/12/2008	47,40	23,56	15,70	100,00	64,90	3,22
13/12/2008	36,00	21,50	14,64	100,00	77,40	2,95
14/12/2008	6,60	19,91	14,64	100,00	88,10	3,50
15/12/2008	64,20	17,64	15,97	100,00	100,00	5,57
16/12/2008	64,80	16,97	14,83	100,00	100,00	7,39
17/12/2008	54,20	17,84	14,37	100,00	100,00	5,59
18/12/2008	22,10	19,11	14,44	100,00	98,90	3,39

II. ANEXO

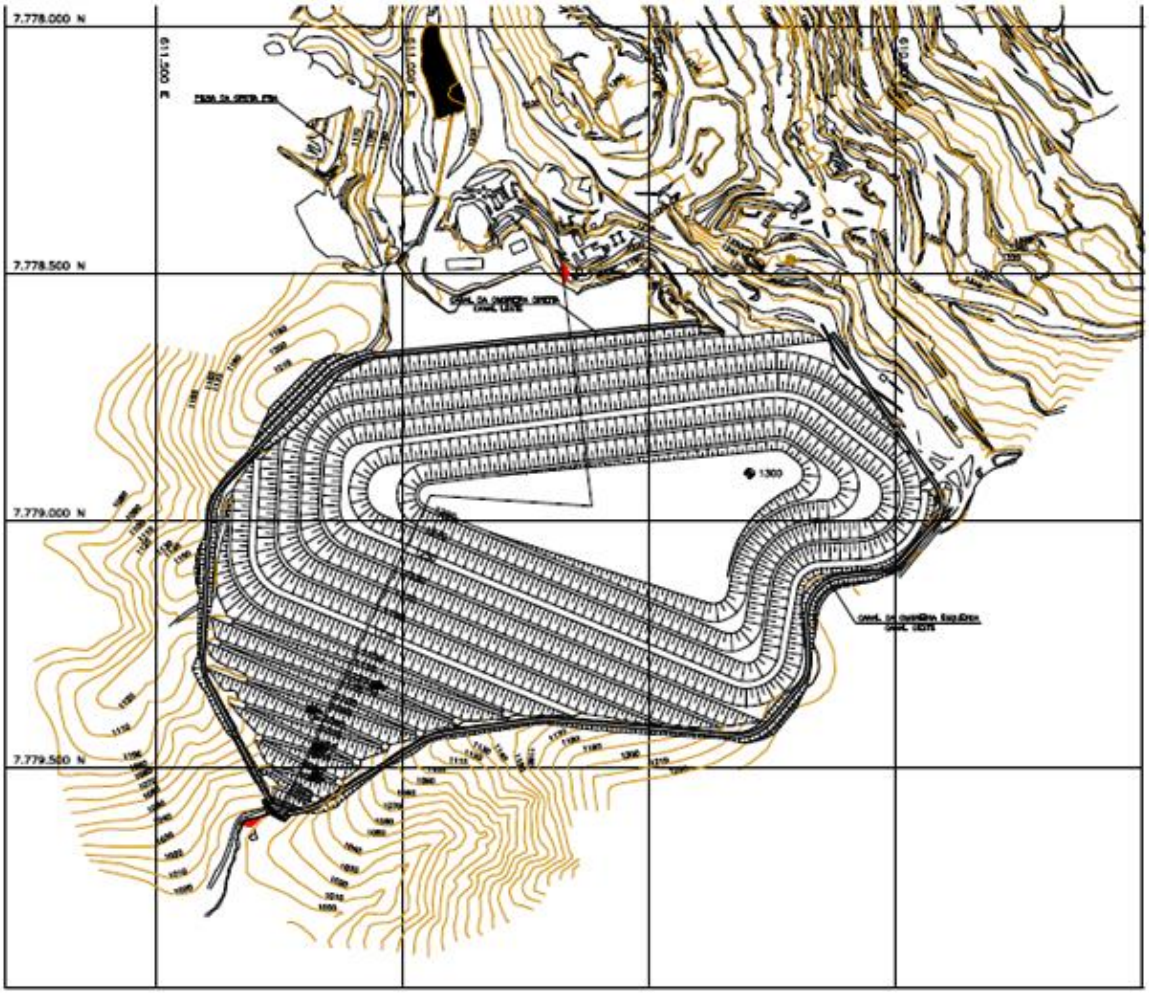
DADOS DE INSTRUMENTAÇÃO
(INA's – INDICADORES DE NÍVEL D'ÁGUA)

	DIRETORIA DE FERROSOS SUL - DIFL / VALE GERÊNCIA DE GEOTECNIA E HIDROGEOLOGIA - GAGHL COMPLEXO VARGEM GRANDE – MINA DO TAMANDUÁ PILHA DE ESTÉRIL CAPÃO DA SERRA DADOS DE INSTRUMENTAÇÃO – INA (INDICADOR DE NÍVEL D'ÁGUA)						
Descrição	**Ângulo de Instalação (º)**	**Cota de Topo (m)**	**Coordenadas**		**Data da Medição**	**Valor da Medição (m)**	**Nível de Água (m)**
			Norte	**Leste**			
INA 07	90,00	1.020,00	7.779.542,00	611.194,00	05/06/08	14,60	1.005,40
INA 08	90,00	1.036,00	7.779.512,00	611.197,00	05/06/08	21,79	1.014,21
INA-11	90,00	1.064,87	7.779.435,35	611.201,11	05/06/08	40,49	1.024,38
INA-13	90,00	1.103,61	7.779.384,63	611.074,96	05/06/08	44,77	1.058,84

III. ANEXO

ARRANJO GERAL DA PILHA DE ESTÉRIL CAPÃO DA SERRA

ARRANJO GERAL DA PILHA DE ESTÉRIL CAPÃO DA SERRA



IV. ANEXO

DADOS METEOROLÓGICOS DA CIDADE DE SÃO PAULO REFERENTES AOS MESES DE DEZEMBRO/2009 E JANEIRO/2010

DADOS METEOROLÓGICOS – SÃO PAULO - SP ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MIRANTE SANTANA – A701 REGISTRO: 01/03/2010 LATITUDE: -23,4964º - LONGITUDE: -46,6200º - ALTITUDE: 792,06 METROS						
Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do Ar (°C)		Umidade Relativa do Ar (UR%)		Vento
		máxima	mínima	máxima	mínima	Velocidade média (m/s)
01/12/2009	0,00	24,54	23,60	79,04	74,38	1,57
02/12/2009	0,20	24,93	23,82	78,63	72,33	1,87
03/12/2009	21,80	24,08	22,87	79,50	72,54	2,62
04/12/2009	3,80	20,54	19,59	83,88	78,92	3,11
05/12/2009	3,40	18,54	17,94	83,25	79,79	4,01
06/12/2009	0,00	20,58	19,66	78,67	74,71	2,93
07/12/2009	16,40	21,50	20,78	87,04	82,58	1,64
08/12/2009	92,20	20,77	20,08	91,83	89,25	1,31
09/12/2009	0,00	20,33	19,55	84,00	80,08	2,55
10/12/2009	0,00	21,82	20,81	78,17	73,58	2,87
11/12/2009	1,00	24,05	22,98	76,04	70,33	2,19
12/12/2009	13,60	24,22	22,82	79,13	71,83	3,37
13/12/2009	11,20	18,90	18,31	88,63	84,50	2,56
14/12/2009	0,00	18,79	18,16	78,63	74,46	2,56
15/12/2009	0,00	22,17	20,94	79,54	73,92	2,46
16/12/2009	53,80	23,12	21,55	80,38	73,33	1,97
17/12/2009	40,20	22,87	21,45	73,79	66,29	2,20
18/12/2009	5,00	21,07	20,20	84,08	79,75	1,51
19/12/2009	0,00	21,98	20,88	75,50	70,42	2,77
20/12/2009	0,00	23,33	22,09	72,08	66,17	2,76
21/12/2009	0,00	24,95	23,56	68,58	61,71	1,97
22/12/2009	0,00	25,43	22,40	64,42	56,17	2,06
23/12/2009	0,00	24,50	23,22	69,54	63,04	1,48
24/12/2009	0,40	24,13	23,05	76,00	69,88	1,72
25/12/2009	0,00	23,83	22,90	72,29	67,17	1,95
26/12/2009	4,80	24,50	23,16	80,04	73,54	1,76
27/12/2009	9,80	24,85	23,76	80,71	75,00	2,09
28/12/2009	30,40	23,33	22,40	84,13	79,83	2,31
29/12/2009	37,00	23,24	22,40	86,50	81,88	1,86
30/12/2009	5,00	23,53	23,49	82,71	76,58	2,07
31/12/2009	0,00	24,68	23,63	74,88	69,50	2,23
01/01/2010	6,80	21,77	21,02	88,92	84,42	2,33
02/01/2010	36,20	22,67	21,54	86,50	81,38	1,08
03/01/2010	0,80	24,76	23,72	81,42	75,75	1,43
04/01/2010	0,56	24,95	23,60	78,42	71,04	2,00
05/01/2010	20,80	25,86	24,14	76,38	66,96	1,76
06/01/2010	33,40	24,10	22,82	77,42	69,79	2,41
07/01/2010	0,20	23,75	22,95	80,17	74,88	2,13
08/01/2010	30,20	23,13	22,12	87,92	82,46	1,75

DADOS METEOROLÓGICOS – SÃO PAULO - SP ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MIRANTE SANTANA – A701 REGISTRO: 01/03/2010 LATITUDE: -23,4964º - LONGITUDE: -46,6200º - ALTITUDE: 792,06 METROS						
Data	Precipitação Total (mm)	Temperatura do Ar (°C)		Umidade Relativa do Ar (UR%)		Vento
		máxima	mínima	máxima	mínima	Velocidade média (m/s)
09/01/2010	0,20	25,03	23,74	77,92	72,33	1,68
10/01/2010	0,60	26,86	25,73	68,63	62,46	2,66
11/01/2010	29,20	26,39	24,90	70,63	62,50	1,84
12/01/2010	0,00	25,38	24,26	66,46	60,46	1,81
13/01/2010	2,80	26,06	24,71	65,04	58,58	2,56
14/01/2010	1,40	24,22	23,52	74,08	68,79	2,02
15/01/2010	5,60	21,66	20,98	81,25	75,63	2,18
16/01/2010	9,20	22,54	21,46	77,58	71,38	2,55
17/01/2010	14,20	24,05	23,11	76,08	69,54	1,70
18/01/2010	12,40	24,23	22,96	78,13	71,67	1,90
19/01/2010	31,40	24,65	23,37	74,92	67,92	2,46
20/01/2010	14,00	24,93	23,90	72,42	67,04	2,50
21/01/2010	46,00	25,33	23,37	79,50	73,13	1,88
22/01/2010	7,20	22,49	21,33	81,83	77,58	2,15
23/01/2010	10,20	23,96	21,27	84,75	78,63	1,45
24/01/2010	27,40	22,72	20,38	87,63	81,46	1,42
25/01/2010	16,20	23,14	21,08	87,00	82,17	1,38
26/01/2010	52,40	22,98	20,54	88,67	83,63	1,16
27/01/2010	1,60	23,86	21,71	80,25	73,04	2,17
28/01/2010	44,40	22,81	21,75	85,71	79,96	1,28
29/01/2010	10,00	21,64	20,89	87,04	81,21	1,82
30/01/2010	0,00	22,34	21,66	83,38	79,13	1,26
31/01/2010	1,00	24,23	22,99	79,63	72,92	1,45