

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDOS DO PROCESSO DE RESSECAMENTO DE UM  
REJEITO FINO DE MINÉRIO DE FERRO EM UMA  
ÁREA TESTE**

**AUTORA: DAVIELY RODRIGUES SILVA**

ORIENTADOR: Prof. PhD. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, março de 2003.

S586e Silva, Daviély Rodrigues.  
Estudos do processo de ressecamento de um rejeito fino de minério de ferro em uma área teste / Daviély Rodrigues Silva. – Ouro Preto : UFOP, 2003.  
xvi, 141p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Geotecnia. 2. Rejeitos industriais. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. II. Título.

CDU: 624.13



## **AGRADECIMENTOS**

---

Em todos os momentos da vida jamais devemos deixar de agradecer àqueles que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para que a conquista tivesse um brilho especial.

À Deus, por me conceder a oportunidade de realizar mais este sonho e conquistar o meu objetivo. Ao meu marido e ao meu filho por compreenderem minha ausência e me brindarem com o amor que necessito para refazer minhas forças. Aos meus familiares pelo apoio e carinho com que abraçaram juntamente comigo mais este projeto.

À SAMARCO por proporcionar o suporte necessário para a realização deste projeto em especial a equipe do Departamento de Geotecnia. À turma do Laboratório de Controle de Processo pela disponibilidade e atenção a mim dispensada.

Ao meu orientador por acreditar em minha capacidade e por sua dedicação, empenho e compreensão, sem os quais eu não conseguiria vencer mais esta etapa. Ao meu amigo Francisco por seu empenho em contribuir para que este trabalho fosse realizado, por sua disponibilidade e apoio nos momentos de necessidade.

À UFOP por acolher-nos, a mim e aos demais colegas, dando-nos o suporte necessário para que nossos esforços fossem recompensados. À minha turma de mestrado, em especial a amiga Maira pelo companheirismo desde o início, pois foi o estreitamento dos laços de amizade que contribuíram para que chegássemos vitoriosas ao final de mais esta etapa.

## ***RESUMO***

---

A crescente necessidade de se explorar os recursos minerais de forma a sustentar o progresso tecnológico tem feito da armazenagem dos rejeitos destas explorações um problema cada vez mais importante, sobre tudo por causa das enormes preocupações ambientais existentes nos nossos dias.

O dimensionamento dos reservatórios que recebem esses rejeitos, normalmente lamas muito moles, requer o conhecimento das características de deposição do material que se dá, usualmente, através de um processo acoplado de sedimentação e adensamento devido ao peso próprio. Com a exposição deste material às condições climáticas, ocorre o fenômeno do ressecamento. No final desse processo, a área de deposição do rejeito está pronta para ser reabilitada uma vez que este se encontra estável.

O trabalho investiga a influência das condições de contorno e do material no processo de ressecamento de rejeitos finos numa situação de campo, através da monitoração das variáveis climáticas e do material.

Para a concretização deste estudo, no caso do rejeito fino de mineração de ferro, construiu-se uma área teste onde este material foi depositado sob a forma de lama e cuja camada formada foi instrumentada e monitorada durante a ocorrência dos processos de sedimentação e adensamento e, principalmente, durante a fase de ressecamento. A utilização de uma estação meteorológica e as considerações de um modelo hidrológico de evaporação potencial comparada com evaporação efetiva foram muito importantes para a determinação da condição de contorno da superfície.

Na monitoração das variáveis do solo, uma técnica considerada de ponta no Brasil foi utilizada para medir diretamente o teor de umidade volumétrica. A técnica do TDR (Time Domain Reflectometry) e o seu desempenho foram analisados frente às técnicas normais de determinação desta variável.

Os resultados obtidos permitiram a determinação de propriedades constitutivas de ressecamento e a descrição do comportamento do material, que serão úteis em uma análise futura, seja para calibração de um modelo numérico, seja para definição de esquemas de disposição de rejeitos sujeitos ao ressecamento.

## ***ABSTRACT***

---

The growing need to explore natural resources to sustain technological progress has made tailings storage of those explorations a problem more and more important these days, especially because of tremendous environmental concerns.

The design of a impoundment that stores these tailings, usually at mud consistency, requires that depositional characteristics be known. This means that one has to have a good understanding of the coupled process of sedimentation and both self-weight and seepage consolidation. If the material is exposed to the climatic conditions, a desiccation phenomenon can also occur. At the end of this last process, the tailings deposition area is ready for rehabilitation work since it is probably in a stable condition.

This paper look through the influence of boundary conditions and material characteristics of fine tailings under field depositional conditions by monitoring climatic variables and material behavior.

To perform this study, in case of iron ore fine tailings, a test field was built where this material was deposited at mud consistency and its layer was instrumented and monitored during sedimentation, consolidation and, especially, desiccation stages. For determination of surface boundary condition, a weather station was used and a hydrologic model of potential evaporation, compared with effective evaporation, was also considered.

In monitoring soil variables, a very updated technique was used to directly measure volumetric water content. This technique is called time domain reflectometry (TDR), and performance of four sensors based on that principle was analyzed against conventional techniques.

The results obtained in this research allowed the determination of constitutive properties of desiccation and the description of material behavior, which will be useful in the future for calibration purpose of a numerical model and definition of design disposal schemes of desiccating tailings.

## ***SUMÁRIO***

---

página

### **Capítulo 1 – Introdução**

1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Objetivo e Justificativa.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3

### **Capítulo 2 - Revisão de Literatura**

2.1. Processo de Ressecamento.....	5
2.1.1. Processo.....	5
2.1.2. Formação e Característica das Trincas.....	7
2.1.3. Modelo Proposto por Abu-Hejleh e Znidarcic.....	8
2.2. Condições de Contorno.....	9
2.2.1. Evaporação.....	10
2.2.1.1. Modelos Matemáticos.....	13
2.2.1.2. Tanque de Evaporação.....	16
2.2.1.3. Lisímetros.....	17
2.2.2. Drenagem.....	18
2.3. Técnicas de Medida de Sucção e Teor de Umidade.....	19
2.3.1. Tensiômetro.....	19
2.3.2. Métodos Termogravimétricos.....	21
2.3.3. TDR (“Time Domain Reflectometry”).....	22
2.3.4. Método do Perfil Instantâneo.....	24

### **Capítulo 3 – Equipamentos e Técnicas Experimentais Utilizadas**

3.1. Características da Lama.....	27
3.2. Ensaio em Amostra Reduzida.....	29
3.3. Ensaio de Contração Livre (“shrinkage test”).....	35

3.4. Construção da Área Teste.....	36
3.5. Considerações sobre a Instrumentação.....	41
3.5.1. Simulação Numérica Preliminar.....	41
3.5.2. Estação Meteorológica e Modelo de Evaporação.....	45
3.5.3. Sensores do Solo.....	50
3.5.3.1. Time Domain Reflectometry (TDR).....	50
3.5.3.2. Sensor de Sucção.....	57
3.5.3.3. Sensor de Temperatura.....	58
3.5.4. Registrador de Dados (“Datalogger”).....	59
3.5.5. Medidor de Recalque.....	60
3.5.6. Piezômetro.....	61
3.5.7. Tanque de Evaporação.....	62
3.5.8. Tensiômetro.....	63
3.6. Montagem da Instrumentação da Área Teste.....	65
3.7. Coleta de Dados.....	69
3.7.1. Amostras da Área Teste.....	69
3.7.2. Dados da Estação Meteorológica.....	71
3.7.3. Dados dos Sensores.....	71
3.7.4. Dados do Recalque.....	72
3.7.5. Dados dos Piezômetros.....	72
3.7.6. Dados do Tanque de Evaporação.....	72
3.7.7. Dados dos Tensiômetros.....	72
3.7.8. Observações da Trincas.....	73
3.8. Retirada dos Sensores.....	76
3.9. Cronograma dos Eventos.....	77

## **Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados**

4.1. Variáveis do Solo.....	79
4.1.1. Contração.....	79
4.1.2. Recalque.....	81
4.1.3. Temperatura.....	83

4.1.4. Umidade Volumétrica.....	85
4.1.5. Umidade Gravimétrica.....	88
4.1.6. Densidade Natural.....	90
4.1.7. Densidade Real dos Grãos.....	91
4.1.8. Trincas.....	92
4.2. Variáveis das Condições de Contorno.....	98
4.2.1. Dados Meteorológicos.....	98
4.2.1.1. Temperatura Ambiente.....	98
4.2.1.2. Velocidade do Vento e Umidade Relativa do Ar.....	98
4.2.1.3. Chuva.....	102
4.2.1.4. Evaporação.....	103
4.2.2. Poropressão na Base.....	105
4.2.2.1. Piezômetros.....	105
4.2.2.2. Tensiômetros.....	107

## **Capítulo 5 - Discussão dos Resultados**

5.1. Contração.....	109
5.2. Recalque.....	111
5.3. Teor de sólidos e Índice de Vazios.....	113
5.4. Trincas.....	116
5.5. Piezômetro e Tensiômetro.....	119
5.6. Posição Final dos Sensores.....	121
5.7. Evaporação.....	122
5.8. Propriedades Constitutivas.....	126
5.8.1. Funcional $\alpha$ (“alpha function”).....	126
5.8.2. Função de Abertura e Propagação da Trinca (“cracking function”).....	128
5.8.3. Compressibilidade e Permeabilidade.....	130
5.9. Teste de Consistência de G, w e $\gamma$ .....	130
5.10. Desempenho dos TDR’s.....	132

## **Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões**

6.1. Considerações Finais.....	134
6.2. Conclusões.....	134
6.3. Sugestões.....	135
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>137</b>

## ***LISTA DE FIGURAS***

---

- Figura 2.1: Esquema dos estágios unidimensional e tridimensional no processo de ressecamento
- Figura 2.2: Características da contração com três fases
- Figura 3.1: Curva granulométrica
- Figura 3.2: Amostra exposta às condições atmosféricas
- Figura 3.3: Ensaio no laboratório e amostra com algumas trincas superficiais
- Figura 3.4: Teor de umidade gravimétrica do ensaio
- Figura 3.5: Planta indicando posição das trincas e ponto de coleta
- Figura 3.6: Evolução da altura de lama durante o ensaio
- Figura 3.7: Evaporação estimada
- Figura 3.8: Ensaio de contração livre
- Figura 3.9: Final do ensaio de contração livre
- Figura 3.10: Escavação atingindo a camada de lama
- Figura 3.11: Construção do dique que limita a área teste
- Figura 3.12: Vista do vertedouro
- Figura 3.13: Sistema de bombeamento da lama
- Figura 3.14: Vista do ponto de lançamento na área teste
- Figura 3.15: Drenagem da lâmina d'água
- Figura 3.16: Simulação do perfil de recalque
- Figura 3.17: Simulação do perfil de umidade volumétrica
- Figura 3.18: Simulação do perfil de teor de sólidos
- Figura 3.19: Simulação do perfil de índice de vazios
- Figura 3.20: Estação meteorológica
- Figura 3.21: Receptor dos dados da estação meteorológica – console
- Figura 3.22: Sensor que mede o teor de umidade volumétrica - TDR
- Figura 3.23: O efeito da condutividade elétrica na calibração
- Figura 3.24: Nova calibração dos TDR's (a) TDR1, (b) TDR2, (c) TDR3 e (d) TDR4
- Figura 3.25: Sensor que mede a sucção
- Figura 3.26: Sensor de temperatura

Figura 3.27: Registrador de dados – “Datalogger”

Figura 3.28: Painel solar e a caixa protetora

Figura 3.29: Régua graduada para medir o recalque

Figura 3.30: Vista dos dois piezômetros instalados

Figura 3.31: Tanque de evaporação

Figura 3.32: Instalação do tensiômetro na base de areia

Figura 3.33: Esquema do tensiômetro de mercúrio

Figura 3.34: Instrumentos instalados antes do enchimento da área teste

Figura 3.35: Saturação do sensor de sucção

Figura 3.36: Lançamento dos sensores

Figura 3.37: Término do bombeamento

Figura 3.38: Curva de enchimento da área teste

Figura 3.39: Vista do tensiômetro da base após o enchimento da área teste

Figura 3.40: Amostrador de caneco

Figura 3.41: Sistema de leitura dos tensiômetros

Figura 3.42: (a) Trinca *a* e (b) Trinca *b*

Figura 3.43: Evolução das aberturas de outras trincas, (a) 30/03/2002, (b) 02/04/2002, (c) 4/04/2002 e (d) 16/04/2002

Figura 4.1: Curva de contração

Figura 4.2: Variação da altura da camada devido aos processos de adensamento e ressecamento (recalque)

Figura 4.3: Temperatura do solo

Figura 4.4: Perfil de evolução do teor de umidade volumétrica com o tempo

Figura 4.5: Evolução do teor de umidade volumétrica por camada

Figura 4.6: Perfil do teor de umidade gravimétrica

Figura 4.7: Perfil de densidade natural

Figura 4.8: Densidade real dos grãos

Figura 4.9: Evolução das trincas *a* e *b*

Figura 4.10: Relação abertura versus profundidade das trincas

Figura 4.11: Trincas *a* e *b* no dia 92

Figura 4.12: (a) Trinca *a* no dia 94 e (b) Trinca *b* no dia 94

Figura 4.13: (a)Trinca *a* no dia 96 e (b)Trinca *b* no dia 96  
Figura 4.14: (a)Trinca *a* no dia 102 e (b)Trinca *b* no dia 102  
Figura 4.15: (a)Trinca *a* no dia 113 e (b)Trinca *b* no dia 113  
Figura 4.16: (a)Trinca *a* no dia 127 e (b)Trinca *b* no dia 127  
Figura 4.17: (a)Trinca *a* no dia 136 e (b)Trinca *b* no dia 136  
Figura 4.18: Temperatura ambiente  
Figura 4.19: Velocidade do vento  
Figura 4.20: Umidade relativa do ar  
Figura 4.21: Pluviometria  
Figura 4.22: Taxa de evaporação obtida através do modelo matemático da estação  
Figura 4.23: Leituras do classe A, da chuva e o cálculo da evaporação  
Figura 4.24: Leitura dos piezômetros  
Figura 4.25: Leitura dos tensiômetros

Figura 5.1: Volume total versus volume de água  
Figura 5.2: (a) recalque; (b) evaporação e (c) piezômetro  
Figura 5.3: Teor de sólidos  
Figura 5.4: Índice de vazios  
Figura 5.5: Influência da pluviometria na abertura das trincas  
Figura 5.6: Relação da profundidade com a abertura das trincas  
Figura 5.7: Leituras dos piezômetros e dos tensiômetros  
Figura 5.8: Deslocamentos dos TDR's  
Figura 5.9: (a) temperatura, (b) velocidade do vento, (c) umidade relativa, (d) evaporação, (e) precipitação  
Figura 5.10: Desempenho do classe A  
Figura 5.11: Função alfa  
Figura 5.12: Função de abertura e propagação de trinca (“cracking function”)  
Figura 5.13: Consistência de  $G$ ,  $w$  e  $\gamma$   
Figura 5.14: Desempenho dos TDR's

## ***LISTA DE TABELAS***

---

Tabela 3.1: Características da lama

Tabela 3.2: Composição Química

Tabela 3.3: Relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade

Tabela 3.4: Dados da amostra indeformada

Tabela 3.5: Equações de calibração

## ***LISTA DE SÍMBOLOS***

---

a - espaço

A - a área do reservatório (área do espelho d'água)

C - coeficiente que leva em conta os fatores que influem na evaporação, normalmente escrito, em alguns modelos, como uma função da velocidade do vento

$c'$  - coesão efetiva

e - índice de vazios

$e_{cr}$  - índice de vazios da abertura da trinca

$e_{min}$  - índice de vazios mínimo.

$e_{di}$  - pressão de vapor em kPa

$e_s$  - pressão parcial de vapor saturado à temperatura da superfície evaporante que é uma função da temperatura

$e_{si}$  - pressão de saturação do vapor de água na atmosfera

$e_v$  - pressão parcial do vapor d'água na camada de ar adjacente, normalmente tomada a dois metros acima da superfície

E - intensidade da evaporação

$E_s$  - poder evaporante à sombra (ou evaporação em condições isotérmicas)

EP - evaporação potencial

ER - evaporação real

$F_{di}$  - fator que introduz a influência do vento na evaporação

$F_{hi}$  - fator que introduz a influência do vento na evaporação

G - densidade dos grãos

i - intensidade da precipitação diretamente sobre o reservatório

k - permeabilidade

L - calor latente de vaporização da água, função da temperatura

$m_u$  - massa da amostra úmida

$m_s$  - massa da amostra seca

$m_w$  - massa da água

P - teor de sólidos

$P_b$  - pressão barométrica

$Q_{ent}$  - vazão de entrada do reservatório  
 $Q_{sai}$  - vazão de saída do reservatório  
 $R$  - constante universal dos gases  
 $RH$  - umidade relativa da superfície do ar próximo ao solo como uma função da sucção total  
 $R_{líq}$  - radiação efetiva de ondas curtas e longas, ou radiação líquida disponível  
 $R_{si}$  - radiação solar  
 $R_{ni}$  - radiação efetiva (“net radiation”)  
 $S$  - grau de saturação  
 $t$  - tempo  
 $T$  - temperatura absoluta (K)  
 $T_a$  - temperatura do ar  
 $T_i$  - temperatura do ar em °C  
 $Vol$  - volume de água contido no reservatório  
 $V_t$  - volume total da amostra  
 $V_w$  - volume da água da amostra  
 $V_d$  - volume seco  
 $V_s$  - volume de sólidos  
 $U$  - função linear da velocidade do vento  
 $U_2$  - velocidade do vento a 2 metros acima da superfície evaporante  
 $U_i$  - velocidade do vento  
 $w$  - umidade gravimétrica  
 $W_v$  - peso molecular da água  
 $\alpha$  - funcional que associa a deformação vertical e lateral durante a contração tridimensional  
 $\phi'$  - ângulo de atrito efetivo  
 $\gamma$  - constante psicrométrica ou constante de Bowen  
 $\gamma_d$  - peso específico seco  
 $\gamma_n$  - peso específico natural  
 $\eta$  - parâmetro que particiona a evaporação através da relação entre a taxa de evaporação nas paredes das trincas e a evaporação na superfície

$\lambda$  - variável que introduz o valor de calor latente de vaporização

$\theta$  - umidade volumétrica

$\rho$  - massa específica da água

$\rho_a$  - massa específica aparente do solo

$\sigma'$  - tensão efetiva

$\sigma_v$  - tensão vertical

$\psi$  - sucção total no solo

$\Delta$  - variável auxiliar, que representa a medida da variação da pressão de saturação do vapor com a variação da temperatura, num ponto em que a temperatura é igual à temperatura do ar

## ***CAPÍTULO 1***

---

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Considerações Gerais**

Desde o início da extração de itabirito (minério de ferro) da Mina do Germano (hoje exaurida), a SAMARCO deposita o seu rejeito na barragem do Germano. O fluxograma do beneficiamento do minério produz resíduos sob duas formas: os rejeitos arenosos e os rejeitos mais finos (lama). Ambos são lançados diretamente no reservatório da barragem constituindo uma descarga anual de  $6,50 \times 10^6$  e  $2,02 \times 10^6$  toneladas, respectivamente.

Com o objetivo de determinar a vida útil do reservatório, elaborou-se o plano diretor de disposição de rejeitos do Germano onde um dos principais objetivos foi encontrar a solução para a disposição de lamas a longo prazo.

Para a disposição do rejeito arenoso tem-se dois locais: a nova barragem a jusante da barragem do Germano e a cava do Germano. Com essas duas áreas estima-se um tempo de lançamento até 2015. Para a lama optou-se pela disposição através do processo de secagem onde o tempo é estimado até 2025. Logo, o volume útil do reservatório do Germano deve ser preservado para a lama já que é o único local disponível para o lançamento da mesma.

Os rejeitos finos, após serem depositados por via sub-aérea, experimentam alguns processos físicos. Inicialmente, ocorre a formação de praia e a separação hidráulica das partículas na parte superior do delta. As partículas mais finas ou mais leves são carregadas para a parte inferior do delta, formando o lago de decantação. A sedimentação unidimensional e o adensamento por peso próprio são os processos que dominam no lago de decantação. A sedimentação ocorre na parte superior da camada recentemente depositada e o adensamento ocorre simultaneamente na base. Com a superfície do rejeito exposta, permite-se o processo de evaporação e ressecamento. Então, ocorre a contração unidimensional e posteriormente o início da formação e propagação das trincas e a contração tridimensional.

Para a implantação do processo de secagem é necessário um estudo aprofundado dos parâmetros de secagem: espessura de camadas, tempo de secagem e ciclo de dragagem/secagem.

## **1.2. Objetivo e Justificativa**

Este trabalho tem por finalidade contribuir para o conhecimento do comportamento do rejeito fino proveniente do beneficiamento do minério de ferro, quando submetido ao processo de secagem, tendo em vista o seu aproveitamento no projeto de cobertura da Barragem de Rejeitos do Germano, da SAMARCO Mineração S. A.

O estudo se insere numa pesquisa mais ampla, que envolve a aplicação de uma teoria de ressecamento desenvolvida por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995) para estudo do comportamento do solo sob ação deste fenômeno. No entanto, de nada vale essa abordagem mais racional sem um levantamento minucioso das propriedades do material e do seu comportamento diante das condições de contorno, principalmente climáticas. Esse conjunto de atividades forma o objetivo primeiro desse trabalho, que em muitos aspectos pode ser considerado de ponta, já que introduz alguns materiais e métodos que certamente podem vir a contribuir para o avanço da técnica neste campo.

Muitas são as variáveis que influenciam o fenômeno de ressecamento e que são contempladas pela teoria. Logo, este trabalho tem como um dos objetivos auxiliar na determinação das relações constitutivas requeridas pelo modelo. Por outro lado, em se tratando de um problema de valor de contorno, a completa definição das condições que atuam no mesmo é de suma importância. Nesse sentido a condição hidrológica de evaporação aparece na fronteira superior do problema. Esse assunto é complexo e está ligado às condições meteorológicas (evaporação potencial) e ao solo (evaporação real). Na outra fronteira, a condição de drenagem se impõe e, numa situação usual, deve-se lidar com poropressões negativas (sucção) e seu processo de medida.

A calibração de um modelo depende também de informações sobre a evolução dos perfis de umidade, índice de vazios, densidades e sucção, entre outros. Isso exige que se disponha de técnicas e procedimentos adequados para seu levantamento. Nesse sentido, além das soluções convencionais de amostragem, técnicas mais modernas

podem ser aplicadas, como o uso de sondas TDR's (Time Domain Reflectometry), de uso ainda pouco conhecido entre nós, principalmente para determinação direta do teor de umidade volumétrica.

Esta pesquisa portanto pode ser justificada pelos aspectos de avanços no conhecimento sobre o fenômeno e também pelas possibilidades de aplicação prática em projetos de disposição de rejeitos finos como os gerados no beneficiamento do minério de ferro, no caso específico da SAMARCO Mineração S.A., unidade de Germano, em Mariana, MG.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

O trabalho se organiza em capítulos como apresentado a seguir. O Capítulo 1 faz algumas considerações gerais sobre a disposição dos rejeitos da SAMARCO Mineração S.A. e sobre os processos físicos experimentados pelo rejeito fino ao serem lançados. Nele também são apresentados os objetivos e justificativas, bem como a estrutura da dissertação.

Dando continuidade, o Capítulo 2 apresenta a conceituação do processo de ressecamento e da formação das trincas bem como suas características. É mostrado um modelo proposto para o processo de ressecamento que é a referência para todo o trabalho experimental. As condições de contorno que governam o fenômeno também são comentadas nesta seção. Finalizando, relata-se sobre algumas técnicas de medida de sucção e teor de umidade.

A parte de procedimentos experimentais é vista no Capítulo 3. Em um primeiro momento, faz-se um resumo das características do material em estudo já conhecidas, para então serem apresentados os ensaios preliminares. Em seguida, comenta-se sobre a construção da área teste e faz-se algumas considerações sobre a instrumentação e sua montagem. O Capítulo 3 ainda apresenta como os dados foram coletados e como os sensores foram retirados. O cronograma dos eventos finaliza esta seção.

Os dois capítulos seguintes, 4 e 5, referem-se aos resultados obtidos e sua análise. No Capítulo 4 são apresentados e comentados os resultados das variáveis do solo e das condições de contorno de forma individualizada. O Capítulo 5 tem por objetivo melhor interpretar os resultados pelo cruzamento de informações dos diversos

fatores intervenientes, e com isso obter algumas relações constitutivas para o modelo de ressecamento, testar consistência das medidas e verificar o desempenho dos instrumentos.

Por fim, o Capítulo 6, intitulado como Conclusões e Sugestões, apresenta uma síntese de todas as análises e discussões efetuadas ao longo do trabalho, bem como algumas sugestões para a continuidade da pesquisa sobre o processo de ressecamento.

O processo de ressecamento é um assunto complexo e ainda em fase de desenvolvimento. Portanto, este estudo é fundamental para que se inicie um controle menos empírico desse fenômeno.

## ***CAPÍTULO 2***

---

### **REVISÃO DE LITERATURA**

#### **2.1. Processo de Ressecamento**

A evolução do processo de ressecamento é dependente das propriedades do solo e das condições de contorno. O aparecimento das trincas reflete a contração lateral do solo. Para descrever o fenômeno, existem modelos baseados na resistência dos materiais e modelos baseados na mecânica das fraturas.

##### **2.1.1. Processo**

O processo de ressecamento do solo é a expulsão da água por meio de evaporação e/ou drenagem e, devido a esta perda, ocorre a redução da estrutura volumétrica do solo. Este processo ocorre em dois estágios:

- unidimensional: quando ocorre a contração (recalque) vertical;
- tridimensional: quando a secagem continua e a redução de volume diminui surgindo tensões de tração lateralmente. Devido ao fato do solo não suportar estas tensões, ocorre a formação de trincas.

Esquemáticamente, este comportamento é apresentado na Figura 2.1.

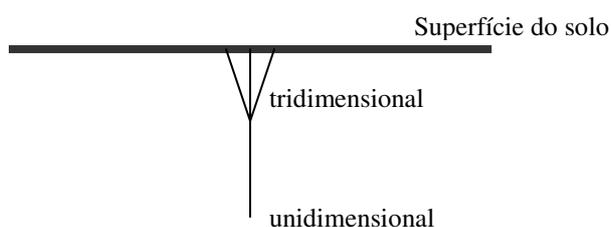


Figura 2.1: Esquema dos estágios unidimensional e tridimensional no processo de ressecamento

A contração do solo devido a perda de água (“shrinkage”) é um dos fenômenos importantes do solo e ocorre em solos coesivos. Haines (1923) notou que a contração ocorre em estágios. Ele também sugeriu que as características da contração estão relacionadas com a natureza e quantidade de argila.

Os estágios são: normal, residual e zero (Oliveira Filho, 1998). Na fase de contração normal a redução de volume é igual à perda de água. Na fase residual a redução volumétrica é menor do que o volume de água perdida aumentando o volume de ar. A fase de contração zero ocorre quando as partículas do solo atingem sua configuração mais densa e não há mais contração volumétrica. O solo se encontra em condição saturada até atingir o limite de contração.

Durante este processo, a consistência da argila varia de plástica, na fase normal, para não plástica. O limite de contração do solo é definido como a interseção das duas tangentes e indica até onde o solo pode contrair (de acordo com o trabalho de Atteberg). Baixos limites indicam maior capacidade de contração. A Figura 2.2 mostra a curva de contração típica.

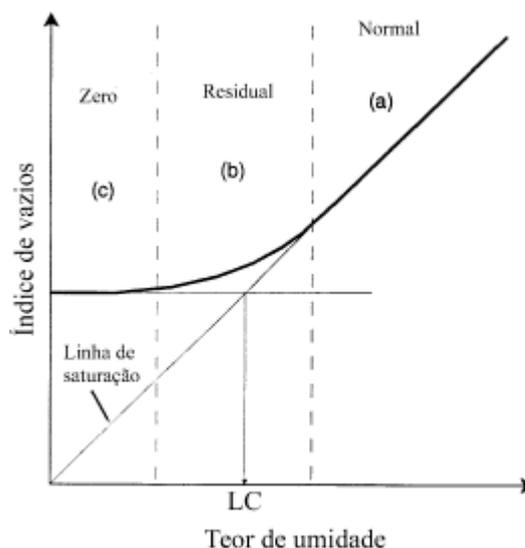


Figura 2.2: Características da contração com três fases

A magnitude do fenômeno depende da porcentagem de argila, tipo de argilo-mineral, forma de deposição geológica, arranjo das partículas, tensão de confinamento, grau de resistência ao tempo (clima) e troca catiônica, orientação das partículas do solo e teor de umidade inicial (Rao and Satyadas 1985).

A evaporação exerce uma função especial no processo de ressecamento. Quando se tem altas taxas de evaporação, forma-se na superfície uma porção de solo mais resistente e de baixa permeabilidade, conhecida como crosta. O surgimento desta crosta sobre o solo impede que este continue a secagem. A evaporação é uma condição de contorno importante e apresenta dois estágios:

- 1º estágio: solo se encontra em condições saturadas e com alta quantidade de água e a evaporação é controlada pelas condições meteorológicas.
- 2º estágio: o processo de secagem continua e é controlado pelas propriedades de fluxo do solo. Observações mostram que a evaporação acumulada durante este estágio é aproximadamente proporcional ao quadrado do tempo (Oliveira Filho, 1998).

Assim, para um entendimento do mecanismo do processo de ressecamento é importante medir a evolução dos dados meteorológicos, do recalque, da temperatura, da umidade e da sucção no solo.

Durante o processo de ressecamento ocorrem variações no índice de vazios, na umidade e na poropressão que provocam alterações nas características do solo tais como permeabilidade e compressibilidade. Durante o processo de ressecamento, as sucções são atribuídas, primeiramente, à evaporação potencial (Krizek, 1977).

### **2.1.2. Formação e Características das Trincas**

As trincas formam-se, como já se viu, devido à evaporação e/ou drenagem da água e conseqüente contração do solo. Com as mudanças de umidade, procede-se a contração e a geração de tensões de tração. Se estas tensões forem maiores que a resistência do solo ocorrem as trincas. Este fenômeno é mais intenso na superfície e diminui com a profundidade. Na superfície a sucção matricial é maior.

A tensão de tração em uma determinada trinca pode ser reduzida pela presença de trincas adjacentes. As trincas maiores são menos afetadas por esta interação, desde que a tensão de tração requerida para a sua propagação seja menor do que a requerida para a propagação de trincas menores. A redução de tensões é maior nas trincas menores do que nas maiores. Logo, o crescimento de trincas menores é retardado e eventualmente impedido pelo crescimento das trincas maiores adjacentes. Todas as

trincas se interceptam em um ângulo de aproximadamente  $90^0$  e formando polígonos aproximadamente quadrangulares (Oliveira Filho, 1998).

A evolução das trincas primárias e seus espaçamentos dependem do material e do nível de sucção. Existe um campo de tensões principais maiores e menores. As trincas surgem normais às tensões principais maiores. Uma vez formadas as trincas primárias, ocorre a rotação do campo de tensões de  $90^0$  e surgem as trincas secundárias que por sua vez são normais às trincas primárias.

Segundo Morris et al.(1992), a morfologia das trincas é dependente da mineralogia do solo e das condições climáticas (temperatura, chuva) e vegetação de cobertura. Trincas profundas e largas estão associadas com solos plásticos e altas temperaturas durante a estação seca quando o nível da água diminui.

O processo de abertura de trincas verticais ocorre aproximadamente até 1m de profundidade, podendo ter inclinações. A largura da trinca aumenta linearmente com a diminuição da umidade do solo, principalmente na fase da contração normal (“normal shrinkage”). Na fase de contração residual esta relação diminui, chegando finalmente na fase de contração zero, onde ela não é mais afetada.

### **2.1.3. Modelo Proposto por Abu-Hejleh e Znidarcic**

O modelo para o processo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995) é baseado em três estágios:

- contração unidimensional: pode ser tratado como uma extensão do adensamento unidimensional;
- início da formação das trincas e propagação com o alívio de tensões;
- contração tridimensional.

A equação governadora do processo é uma equação diferencial de derivadas parciais de segunda ordem, não linear, do tipo parabólica, com o índice de vazios ( $e$ ) como variável dependente em coordenadas lagrangeanas. Tem-se, ainda, como variáveis independentes o espaço ( $a$ ) e o tempo ( $t$ ). A Equação 2.1 descreve matematicamente o processo.

$$\frac{\partial}{\partial a l} \left[ K - \frac{K}{\gamma_w} \frac{e \gamma_w + \gamma_s}{1+e} \left( 1 - \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e_{cr}} \frac{de_{cr}}{d\sigma'_v} \right) - \frac{K}{\gamma_w} \frac{\alpha(1+e_{cr})}{1+e} \left( \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial a l} \right) \right] - \eta v \frac{\partial \alpha}{\partial a l} = \frac{1}{\alpha(1+e_{cr})} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.1)$$

Para a solução desta equação é necessário o conhecimento de algumas funções constitutivas: relações de compressibilidade (“ $\sigma'$  –  $e$ ”) e permeabilidade (“ $k$  –  $e$ ”) sob condição de contração unidimensional e tridimensional; propriedade constitutiva relativa ao início e propagação das trincas (“ $\sigma'_v$  –  $e_{cr}$ ”); um funcional  $\alpha$  que associa a deformação vertical e lateral durante a contração tridimensional  $e$ ; um parâmetro  $\eta$  que particiona a evaporação através da relação entre a taxa de evaporação nas paredes das trincas e a evaporação na superfície. Existem técnicas específicas para a determinação de todas essas propriedades do material.

As informações do ensaio de contração livre são necessárias para a determinação da função  $\alpha$  (Abu-Hejleh, 1993). Neste ensaio, a amostra de solo é deixada contrair livremente verticalmente e lateralmente sem a presença de nenhuma força externa. Ambas as deformações, lateral e vertical, são medidas.

Para a obtenção da solução numérica do processo, existe o programa CONDES0 (Yao e Znidarcic, 1997), que é um algoritmo para análise do adensamento a grandes deformações unidimensional e o ressecamento de solos finos usando o método das diferenças finitas. Ele prevê os perfis de índice de vazios, poropressão e curva de recalque com o tempo, dentre outros.

Muitos modelos computacionais têm sido utilizados para analisar a capacidade de disposição de um local e o tempo para que isto ocorra. Porém, para que esta análise seja feita é necessário apurar a validade dos dados de entrada, especialmente das relações constitutivas.

## 2.2. Condições de Contorno

Para o estudo do processo de ressecamento é necessário conhecer as propriedades do solo e as condições de contorno que envolvem o fenômeno para que se possa calibrar um modelo. As propriedades características do material são constantes e o que varia são as condições de contorno.

### 2.2.1. Evaporação

Evaporação é o processo natural pelo qual há transformação em vapor d'água da água presente no solo e nos cursos d'água, lagos e mares. A transpiração é a perda de água para a atmosfera em forma de vapor, decorrente de ações físicas e fisiológicas dos vegetais. É a “evaporação” devido à ação fisiológica dos vegetais. A evapotranspiração representa o conjunto das duas ações acima definidas.

A evaporação é o processo atmosférico que mais influencia na ocorrência do ressecamento do solo. Na natureza, a fonte de energia responsável por este processo é o sol. Além da radiação solar, outras variáveis exercem influência no processo da evaporação, destacando-se as temperaturas da água e do ar, a pressão de vapor e o vento.

A ação do vento e a convecção térmica geram a turbulência que afasta o vapor das camadas em contato com a superfície da água. Assim, o vento atua no fenômeno da evaporação renovando o ar em contato com a superfície da água (ou com a vegetação), afastando do local as massas de ar que já tenham grau de umidade elevado.

Ao aumento da temperatura da água está associado o aumento da energia vibracional das suas moléculas e, conseqüentemente, o aumento da taxa de escape das moléculas na fase líquida para a fase vapor. Por isso, o aumento da temperatura da água correlaciona-se diretamente com o aumento da taxa de evaporação.

O aumento da altitude, ou redução da pressão barométrica, tem como conseqüência um pequeno aumento na evaporação.

A evaporação potencial (EP) é considerada a máxima taxa de evaporação que ocorreria em uma superfície livre de água sob dadas condições climáticas. O valor da evaporação potencial pode ser determinado utilizando-se o tanque de evaporação.

Tem-se desenvolvido vários métodos para a determinação do potencial de evaporação porém, todos eles envolvendo irrigação e onde o balanço anual de água é positivo (chove mais do que evapora). Entretanto, para áreas áridas, semi-áridas e não irrigadas, a disponibilidade de água pode limitar a evaporação e a evaporação real pode ser bem menor que a potencial. Como a sucção aumenta, maiores quantidades de energia são requeridas para retirar a água do solo para a atmosfera. Ainda, com o

crescimento da sucção, ocorre uma diminuição da permeabilidade o que inibe a perda de água a partir do solo.

Holmes (1961) mostrou que a evaporação real (ER) é igual a EP para solos arenosos e argilosos quando o teor de umidade é alto ou próximo à capacidade de campo. A relação ER/EP para cada tipo de solo começa a declinar quando o teor de umidade diminui até o ponto de murcha permanente para plantas que é de aproximadamente 1500 kPa de sucção. A taxa de evaporação real da superfície do solo em relação a taxa de evaporação potencial é uma função da água disponível, da textura do solo e da taxa de secagem.

Wilson et al. (1997) mostrou uma boa correlação entre a evaporação normalizada, ER/EP, e a sucção total. Esta correlação independe do tempo, do teor de umidade e da textura do solo. A relação ER/PE é aproximadamente constante e igual a 1 para valores de sucção total menores que aproximadamente 3000 kPa. A taxa de evaporação real começa a diminuir quando a sucção total atinge este valor. A relação ER/EP é igual a zero para um valor de sucção ligeiramente maior que 100000 kPa. Este ponto de evaporação igual a zero é controlado pela umidade relativa do ar, ou seja, quando a umidade relativa do solo entra em equilíbrio com a umidade relativa do ar acima do solo.

Valores de sucção do solo relativamente menores do que os mostrados acima são mais comuns. Os solos não saturados apresentam valores de sucção mátrica que não excedem a 500 kPa. Entretanto, os solos na superfície possuem valores extremamente elevados de sucção.

A relação entre umidade relativa e sucção é dado por Edlefsen e Anderson (1943) através da Equação 2.2.

$$RH = e^{\frac{\psi W_v}{RT}} \quad (2.2)$$

Onde:

RH = umidade relativa da superfície do ar próximo ao solo como uma função da sucção total

$\psi$  = sucção total no solo (kPa)

$W_v$  = peso molecular da água (0,018 kg/mol)

$R$  = constante universal dos gases (8,314 J/mole/K)

$T$  = temperatura absoluta (K)

Wilson et al. (1997) fornecem uma expressão para determinar a evaporação real  $ER$ , como uma função da evaporação potencial e da sucção do solo. Esta expressão assume a forma segundo a Equação 2.3.

$$ER = EP \left( \frac{1 - e^{-\frac{\psi W_v}{RT}}}{1 - RH} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

$ER$  = evaporação real do solo (mm/dia)

$EP$  = evaporação potencial (mm/dia)

$RH$  = umidade relativa do ar acima da superfície do solo

Wilson et al. (1994) mostram que sob condições climáticas idênticas, a taxa de evaporação em solos não saturados é menor do que a taxa de evaporação em solos saturados ou em águas. Através de um programa de ensaios em laboratório, utilizou-se um recipiente contendo água para medir a taxa de evaporação potencial e outro contendo solo para medir a taxa de evaporação real. Monitorava-se a variação de massa de cada recipiente para determinar a taxa de evaporação.

Na hidrologia aplicada a agricultura, a evaporação não é esperada a profundidades maiores que 2,0m (Hillel,1980). A diferença é que engenheiros geotécnicos estão geralmente interessados em variações de umidade que promovem a longo prazo movimentos no solo e mudanças na resistência ao cisalhamento, enquanto que hidrologistas da agricultura estão interessados em uma quantidade de água muito maior para sustentar a necessidade de crescimento das culturas.

A evapotranspiração de gramas e árvores aumentam a perda de água do solo. As árvores com suas áreas de folhas maiores podem, dependendo da espécie, evapotranspirar mais do que a grama ou que uma cultura anual. Sob superfícies

vegetadas e não vegetadas ocorrem diferenças na sucção. Verificou-se que a sucção sob a grama é aparentemente maior do que sob árvores (Blight, 1997).

### 2.2.1.1. Modelos Matemáticos

A aplicação da equação do balanço hídrico (conservação da massa) para um lago ou um reservatório permite o cálculo da evaporação quando todas as demais variáveis envolvidas são conhecidas. Para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , a equação do balanço escreve-se como a Equação 2.4,

$$i \cdot A + Q_{ent} - Q_{sai} - E \cdot A = \frac{\Delta Vol}{\Delta t} \quad (2.4)$$

onde  $Q_{ent}$  e  $Q_{sai}$  são as vazões de entrada e saída do reservatório, respectivamente,  $i$  é a intensidade da precipitação diretamente sobre o reservatório,  $E$  é a intensidade da evaporação,  $Vol$  é o volume de água contido no reservatório ( $\Delta Vol = Vol_{final} - Vol_{inicial}$ ) e  $A$  é a área do reservatório (área do espelho d'água).

Para se quantificar a evaporação também existem modelos matemáticos obtidos a partir das leis de transferência de massa e do balanço de energia.

Os modelos denominados de transferência de massa, também chamados modelos aerodinâmicos, baseiam-se na Lei de Dalton (1928) e são descritos segundo a Equação 2.5.

$$E = C \times (e_s - e_v)$$

(2.5)

Onde:

$E$  = intensidade da evaporação;

$e_s$  = pressão parcial de vapor saturado à temperatura da superfície evaporante que é uma função da temperatura;

$e_v$  = pressão parcial do vapor d'água na camada de ar adjacente, normalmente tomada a dois metros acima da superfície; e

C = coeficiente que leva em conta os fatores que influem na evaporação, normalmente escrito, em alguns modelos, como uma função da velocidade do vento.

A pressão de saturação do vapor  $e_s$  pode ser avaliada pela expressão empírica de Tetens apresentada na Equação 2.6, onde tem-se  $e_s$  em mm-Hg e a temperatura T em  $^{\circ}\text{C}$ .

$$e_s = 4,58 \times 10^{7,5T / (237,3 + T)} \quad (2.6)$$

Na literatura encontram-se disponíveis várias expressões para a intensidade da evaporação que introduzem o efeito do vento no parâmetro C. Porém, o uso destas equações é limitado pela dificuldade de obtenção das variáveis envolvidas. Outras equações semi-empíricas foram estabelecidas para algumas regiões e condições específicas com base na equação aerodinâmica e no ajuste de regressão das variáveis envolvidas. Estas equações são escritas normalmente como a Equação 2.7.

$$E = (a + b \cdot U) \cdot (e_s - e_v) \quad (2.7)$$

O coeficiente C da lei de Dalton é posto como uma função linear da velocidade do vento (U). Esta velocidade é normalmente tomada a uma determinada altura acima da superfície líquida (em geral, a 2,0 m da superfície). Os coeficientes a e b são obtidos empiricamente para o local de estudo.

Os modelos baseados no balanço de energia consideram os diferentes processos que afetam a temperatura da água e a evaporação. O que dificulta a utilização de certas expressões é o fato de não se conhecer a temperatura da superfície evaporante. O método de Penman considera o caso hipotético da temperatura do ar igual à temperatura da superfície evaporante. Relacionando-se algumas equações, tem-se a expressão de Penman para a evaporação citada na Equação 2.8.

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{R_{liq}}{\rho L} + E_s}{\left(\frac{\Delta}{\gamma} + 1\right)} \quad (2.8)$$

Onde:

$E$  = intensidade da evaporação, em cm/dia;

$\rho$  = massa específica da água, em g/cm<sup>3</sup> ( $\rho \cong 1$  g/cm<sup>3</sup>);

$L$  = calor latente de vaporização da água, função da temperatura, em cal/g ( $L$  entre 580 e 590 cal/g);

$R_{liq}$  = radiação efetiva de ondas curtas e longas, ou radiação líquida disponível, em cal/(cm<sup>2</sup>.dia);

$E_s$  = poder evaporante à sombra (ou evaporação em condições isotérmicas), em cm/dia;

$\Delta$  = variável auxiliar, que representa a medida da variação da pressão de saturação do vapor com a variação da temperatura, num ponto em que a temperatura é igual à temperatura do ar, em mm-Hg/°C;

$\gamma$  = constante psicrométrica ou constante de Bowen, igual a aproximadamente 0,49 mm-Hg/°C

Tem-se, ainda, que:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{(de_s / dT)_{T=T_a}}{\gamma} = \frac{38640 \times 10^{7,5T / (237,3+T)}}{(237,3+T)^2} \quad (2.9)$$

para  $T = T_a$  = temperatura do ar, em °C.

Segundo Penman, o poder evaporante à sombra,  $E_i$ , pode ser estimado como:

$$E_i = 0,035 \cdot \left(0,5 + \frac{U_2}{160}\right) \cdot (e_s - e_v) \quad (2.10)$$

Com  $E_i$  em cm/dia para  $U_2$ , a velocidade do vento a 2 metros acima da superfície evaporante em km/dia, e as pressões de vapor  $e_s$  e  $e_v$  em mm-Hg.

### **2.2.1.2. Tanque de Evaporação**

O tanque de evaporação fornece uma medida direta da evaporação. Estes tanques são recipientes achatados, metálicos em forma de bandeja e de seção quadrada ou circular, contendo água em seu interior e instalados sobre o solo nas proximidades da massa de água (ou flutuando sobre esta) cuja intensidade de evaporação se quer medir. As características normais de tanque de evaporação são:

- diâmetro ou lado do quadrado: de 0,90 m a 2,00 m;
- altura do recipiente: de 0,25 m a 1,00 m;
- altura da borda livre do recipiente (sobre o nível de água interno): de 5,00 cm a 10,00 cm.

O tanque de evaporação mais usado em nível mundial é o tanque classe A. Este tanque tem forma circular com diâmetro de 1,22 m, altura de 25,4 cm, mantendo a borda livre variando entre 5,00 e 7,50 cm. A quantidade de água evaporada é medida diariamente por uma ponta limnimétrica com extremidade em gancho.

A evaporação medida pelo tanque supera a que ocorre na superfície de um reservatório. Este fato, evidenciado na prática e também comprovado teoricamente, se deve à diferença de temperatura da água nos dois casos. O pequeno volume de água no evaporímetro e o metal exposto ao sol contribuem para substanciais variações de temperatura da água, à medida que se altera a temperatura do ar e a radiação solar. A grande massa de água em um lago e o efeito estabilizador das correntes de convecção e do solo, em volta do reservatório, têm como consequência uma amplitude menor na variação das temperaturas. 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.

Evet et al (1995) observaram em ensaios realizados no campo com tanques de plástico e de ferro, que os tanques de ferro provocaram mais evaporação do que os de plástico. Isto é devido ao fato de que o ferro conduz mais calor e conseqüentemente produz mais evaporação. O uso de vasos de argila ou cimento não são recomendados porque eles são porosos e absorverão umidade, afetando a quantificação da variável

utilizada, a evaporação. Os vasos de plástico são de acesso mais fácil, são mais fáceis de transportar, além de serem mais baratos.

### **2.2.1.3. Lisímetros**

Um lisímetro consiste de um corpo de solo ou rejeito que é representativo do corpo principal. Os lisímetros têm sido utilizados em muitos estudos de balanço da água e do solo. As vantagens dos lisímetros são que eles podem ser feitos para representar as condições reais de campo. As desvantagens são que têm alto custo para construção e observação e levam um longo tempo para atingirem os resultados. Deve-se tomar o cuidado para que as condições de contorno sejam reais para que não se obtenham resultados falsos (Blight, 1997).

Usualmente, o lisímetro é constituído por uma caixa estanque (volume mínimo de 1 m<sup>3</sup>, contendo o terreno que se quer estudar), que se enterra no solo e se mantém aberta na parte superior. A amostra do solo recebe as precipitações, que são medidas na vizinhança. A caixa dispõe de um dreno no fundo que conduz a água para um sistema de medição. A evaporação, durante um certo período, pode ser determinada se são conhecidas a precipitação, a quantidade de água drenada e a variação de água acumulada no lisímetro, no mesmo período. A maior restrição ao uso do lisímetro reside na pequena área ou volume que representa.

O resultado da experiência em quatro lisímetros, todos com área de 4,5 x 4,5 m<sup>2</sup> e dois de 3,0 m e os outros dois de 5,5 m de profundidade, realizados em um aterro é descrito a seguir para indicar o tipo de resultado que pode ser obtido e a diferença entre evaporação potencial e real (Blight, 1997).

Os lisímetros foram construídos em solo natural e seus lados e bases foram selados com geomembranas impermeáveis. Havia uma camada drenante na base de cada lisímetro drenando o líquido para um reservatório de onde ele podia ser removido através de bombeamento. Os lisímetros foram preenchidos com lixo doméstico compactado e havia uma cobertura com camadas de solo para simular as seções de um aterro. Primeiramente, os lisímetros atingiram a sua total capacidade de armazenar umidade através da formação de um lago na superfície do solo de cobertura e permitindo que a infiltração ocorresse até que o líquido que drena através do material

aparecesse nos reservatórios de drenagem. A água na superfície do solo de cobertura foi removida, permitiu-se a drenagem através do lixo e todo líquido nos reservatórios foi removido. A superfície de dois lisímetros, um de 3,0 e outro de 5,5 m de profundidade, foi coberta com uma geomembrana para impedir a perda de água por evaporação e os outros dois foram deixados expostos à evaporação.

Após um período em que a evaporação foi ocorrendo, água foi sendo adicionada nas superfícies dos lisímetros até o líquido nos reservatórios aparecer novamente. A diferença entre a água adicionada aos lisímetros cobertos e não cobertos com a geomembrana necessária para que o líquido apareça, somada à precipitação menos a “pan evaporation” foi tomada como a evaporação perdida  $E$  no período do experimento. O experimento foi então repetido.

Foi interessante notar que a evaporação perdida no período de secagem do lisímetro de 5,5m de altura foi duas vezes maior que a evaporação perdida no de 3,0m. O material seca durante a estação de seca e umedece novamente durante a estação úmida. Portanto, a quantidade absoluta de evaporação depende da profundidade do material e da quantidade de água disponível para ser evaporada. A evaporação por metro de profundidade de lixo por dia nos lisímetros variou de 0,16 a 0,25 mm/m/dia.

Sendo  $ER$  a evaporação perdida na célula e  $EP$  o “pan evaporation” a relação  $ER/EP$  não é intrinsecamente constante pois depende da quantidade de água disponível para ser evaporada. No caso dos lisímetros de 3,0 e 5,5 m de altura, menos água foi disponibilizada para evaporar e, portanto,  $ER/EP$  para o lisímetro de 3,0m foi menor do que o de 5,5 m. Estes ensaios em lisímetros mostram a diferença entre a evaporação real  $ER$  a evaporação potencial  $EP$ .

### **2.2.2. Drenagem**

Neste trabalho, o conceito de drenagem é tomado como o tradicional que é o seguinte: drenagem corresponde a criar uma fronteira onde a água pode ser removida pelo processo de fluxo gravitacional ou induzido. A peculiaridade do processo de fluxo gravitacional é que é criado pela própria gravidade. Neste caso, a posição do nível d'água é importante. Quanto mais rebaixado estiver em relação a base maior será a

sucção na mesma e mais eficiente o processo. O processo de fluxo induzido é criado por algum esquema artificial.

### **2.3. Técnicas de Medida de Sucção e Teor de Umidade**

A revisão bibliográfica desta seção baseou-se nos métodos que efetivamente foram utilizados no trabalho. Não se trata de uma revisão completa sobre as técnicas possíveis para se medir a sucção e o teor de umidade e sim, das mais viáveis para o projeto em questão. A seguir, é apresentada uma introdução sobre sucção e umidade.

A sucção é a máxima pressão que o solo, em dadas condições, pode usar para absorver água. Ou ela pode ser relatada como a energia necessária para remover uma molécula de água do material poroso.

A sucção do solo é geralmente dividida em duas componentes: matricial, que está relacionada com a combinação do tipo de partícula e o arranjo estrutural, e osmótica, relacionada com a concentração de sais na água do solo. A sucção total é soma da matricial e a osmótica.

Um sensor para medir a sucção do solo deve interagir com a água do solo. Esta interação pode ser através de um contato físico do sensor com o solo ou não. Esta interação deveria ser mantida até que os dois sistemas, solo e sensor, estejam em equilíbrio. É importante distinguir entre o equilíbrio do sensor com o solo e o equilíbrio do próprio sensor.

Existem alguns métodos disponíveis para se medir o teor de umidade do solo, apresentando todos limitações, ou de precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos. As opções pelos métodos variam, principalmente, de acordo com os objetivos e disponibilidade instrumentais.

#### **2.3.1. Tensiômetro**

O tensiômetro é um instrumento de transmissão de poropressão negativa, via absorção capilar, para um sistema de medida. Ele geralmente contém uma cápsula porosa, água e um sistema de medida de pressão. O sistema de medida pode ser um manômetro ou um transdutor de pressão elétrico ou mecânico. A água no interior do

sistema tem a mesma pressão negativa que a água no solo. A troca de água é do sistema para o solo. Geralmente, valores de sucção superiores a 80 kPa não podem ser medidos. Valores acima deste não podem ser medidos devido à cavitação que ocorre dentro do tensiômetro. Dependendo da técnica utilizada para saturar o sistema, sucções superiores a 1 MPa podem ser medidas. Estes tensiômetros são chamados de Tensiômetros de Alta Capacidade (Marinho, 2000).

A interpretação dos dados é mais simples do que os outros métodos. Ele pode ser usado no campo e no laboratório. Ele pode ser incorporado na maioria dos equipamentos de ensaios de solos. O uso do tensiômetro de alta capacidade pode fornecer, continuamente, medidas de sucção matricial. Nos tensiômetros comuns o sistema cavita a -1 atm de pressão. Dependendo do material poroso usado e do solo ensaiado, pode ocorrer osmose.

O tempo de resposta do aparelho, refere-se a um período de tempo entre o fluxo de água e o equilíbrio do sistema, pois a água do tensiômetro moverá em direção ao interior do solo pela cápsula porosa. Este procedimento ocorrerá em um determinado período de tempo, que é variável conforme as características de cada aparelho e tipo de solo. Em relação ao aparelho, o principal fator é a especificação da cápsula porosa, pois na maioria dos casos, as medidas de espessura das paredes e porosidade mudam de uma cápsula para outra. O fator solo influencia no que diz respeito às características de condutividade hidráulica de cada terreno. Geralmente, os instrumentos instalados mais próximos da superfície respondem de maneira mais rápida, devido as interferências externas serem maiores (Santos, 2001).

O teor de umidade pode ser utilizado para determinar o valor da sucção total no solo. A curva característica do solo é usada para determinar o valor de sucção total correspondente a cada medida de teor de umidade durante a evaporação. Esta curva é importante na engenharia geotécnica devido ao fato de mostrar a quantidade de água retida no solo para variados valores de sucção total. (Watson, 1967; Stannard, 1992; Ridley and Burland, 1994; Marinho e Pinto, 1997)

### 2.3.2. Métodos Termogravimétricos

Consistem em pesar as amostras úmidas e secas. Obtém-se a amostra seca através de pesagem em estufa a 105<sup>0</sup>C até peso constante. O teor de umidade pode ser expresso pela relação apresentada na Equação 2.11.

$$w = \frac{m_{\mu} - m_s}{m_s} = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.11)$$

Onde:  $m_{\mu}$  = massa da amostra úmida

$m_s$  = massa da amostra seca

$m_w$  = massa da água

Em porcentagem ter-se-á:

$$w\% = \frac{m_w}{m_s} 100 \quad (2.12)$$

que representa o teor de umidade do solo com base em peso seco.

O teor de umidade pode ser expresso com base em volume ( $\theta$ ), o que oferece algumas vantagens em determinadas condições. Neste critério ter-se-á:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.13)$$

Onde:  $V_w$  = volume da água da amostra

$V_t$  = volume total da amostra

Sendo a massa específica da água ( $\rho$ ) igual a relação  $m_w/V_w$  e a massa específica aparente do solo ( $\rho_a$ ) igual a  $m_s/V_t$ , ter-se-á:

$$V_t = \frac{m_s}{\rho_a} \qquad V_w = \frac{m_w}{\rho} \qquad (2.14)$$

logo,

$$\theta = \frac{m_w / \rho_w}{m_s / \rho_a} = \frac{m_w \rho_a}{m_s \rho} \qquad (2.15)$$

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \qquad (2.16)$$

O método termogravimétrico, também denominado gravimétrico padrão, serve de referência para os demais métodos. É simples, absoluto e utiliza equipamentos não onerosos. Por outro lado, é trabalhoso e demorado.

Evidentemente, o método de secagem em estufa a 105<sup>0</sup>C não retira toda umidade do solo, pois a fração coloidal retém água estrutural e adsorvida. À medida que a temperatura aumenta, o solo perde mais e mais água sem que se conheça os limites e magnitudes das perdas advindas da água adsorvida e estrutural. Logo, há a necessidade de se especificar a temperatura máxima de secamento.

Determina-se o tempo mínimo de secamento colocando-se uma amostra em estufa até que mostrasse sinais visíveis de seca, pesando-se em seguida a cada minuto até que atingisse peso constante. Esta amostra, submetida ao aquecimento em estufa convencional a 105<sup>0</sup>C por 24 horas não deve ter o peso modificado.

### 2.3.3. TDR (“Time Domain Reflectometry”)

A utilização do TDR para a medida do teor de umidade volumétrica teve início na agricultura, onde os pesquisadores buscavam métodos mais eficazes para controle da água no solo (Davis & Annan, 1977). Porém, sua aplicação tem se diversificado e o emprego desta técnica na Geotecnia vem se expandindo.

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) funciona com o mesmo princípio do radar. Ela mede a velocidade de propagação de um pulso eletromagnético

ou, o tempo que o um pulso emitido leva para retornar ao sistema. A velocidade de propagação está relacionada com a constante dielétrica do meio.

Mitchell (1993) chama a atenção que uma possível consideração da importância da constante dielétrica do fluido possa ser encarada como uma simples especulação acadêmica, pois, em geral, os poros do solo estão preenchidos por água. Entretanto, Mitchel (1993) salienta que os solos podem estar em contato com fluidos de variadas composições químicas, seja de forma deliberada, como por exemplo, quando camadas argilosas são utilizadas para impermeabilizar reservatórios de rejeitos, ou ainda de forma acidental, como na ocorrência de vazamentos. Nestes casos não mais teríamos a água como fluido, e sim chorume, óleos, solventes, etc. Ressalta-se que a constante dielétrica destes materiais são diferentes da constante dielétrica da água. Mesmo a água apresenta variação na constante dielétrica, esta variação se dá com uma variação na temperatura. Para uma temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$ , a constante dielétrica da água é de aproximadamente 88; já para uma temperatura de  $66^{\circ}\text{C}$  constata-se que o valor da constante dielétrica é reduzida para algo em torno de 66.

O TDR é geralmente utilizado para medir a umidade e o utilizado para medir a sucção requer a incorporação de um material poroso. O equilíbrio é alcançado via fluxo capilar entre o solo e o material poroso. Usando uma curva de calibração a sucção pode ser aferida. Devido a presença do material poroso a calibração é independente das características do solo. Os resultados podem ser afetados pela histerese e a sucção máxima obtida é da ordem de 200 kPa. (Andrews, J.R., 1994; Cook e Fredlund, 1998).

Esta técnica possibilita medir a variação de umidade ao longo de um perfil (Kujala & Ravaska, 1994), acompanhar a umidade de uma cortina impermeabilizante de aterro sanitário feito durante um ano (Benson et al., 1994), estimar a sucção do solo através da correlação da curva característica (Phene et al., 1988) e monitorar o deslizamento de encostas (Kanes & Beck, 1996).

Segundo alguns autores que realizaram experiências com o TDR e obtiveram as leituras manualmente, é desejável que a aplicação do TDR seja feita através de processos automatizados que eliminam o fator de erro devido ao operador.

#### 2.3.4. Método do Perfil Instantâneo

O método do perfil instantâneo é definido como o método onde o perfil de água transiente e a sucção são usados em conjunto com a lei de Darcy para calcular a condutividade hidráulica. Todos os métodos de perfil instantâneo consistem na indução de fluxo transiente no solo e na medida dos perfis de quantidade de água e/ou sucção. A água é adicionada e removida através da extremidade da amostra. Sensores para medir a quantidade de água e a sucção (matricial ou total) são inseridos no solo em dois ou mais pontos da amostra. A técnica do TDR é a mais indicada para medir a quantidade de água (Malicki et al., 1992; Meerdink et al., 1996; Hudson et al. 1996). A sucção é medida usando tensiômetros (sucção matricial < 80 kPa) ou psicrômetros (sucção total > 100 kPa). É possível obter resultados satisfatórios utilizando apenas dois pontos de medida.

A água é removida da amostra através da aplicação de evaporação ou de sucção. A evaporação é induzida permitindo que a água evapore através de uma das extremidades da amostra que é exposta à atmosfera. Uma vez iniciado o processo de secagem, a condutividade hidráulica do solo próximo à extremidade diminui e a evaporação é retardada (Wind, 1968). Se a taxa de evaporação é tão baixa a ponto de impedir a continuidade do ensaio, ela pode ser substituída pelo sopro de ar através da superfície utilizando um ventilador. A aplicação de sucção para solos finos é impraticável, pois impede o fluxo. A adição de água pode ser feita através de um sistema de gotejo mas é mais conveniente utilizar uma bomba de fluxo (Daniel, 1982; Abu-Hejleh et al., 1993; Meerdink et al., 1996; Hudson et al., 1996).

A partir das informações coletadas durante o ensaio, obtém-se os gráficos de sucção versus posição ao longo da coluna e quantidade de água volumétrica versus posição. O processo completo consiste na desaturação e saturação do solo. Comparações entre condutividades hidráulicas medidas utilizando o método do perfil instantâneo e outros métodos não é comum, mas geralmente tem mostrado boa concordância.

As vantagens deste ensaio são a rapidez e a simplicidade, obtenção simultânea da condutividade hidráulica e curva característica solo-água, reutilização das informações para a mesma medida de quantidade de água e adaptação do ensaio para

amostras indeformadas. As desvantagens do método são os erros introduzidos no processo de umedecimento, o pobre controle do balanço de massa e a contribuição do fluxo de vapor que é ignorado nas análises. O impacto dos erros no balanço de massa pode ser reduzido utilizando procedimentos de correção descritos por Wind (1968). Já as correções no fluxo de vapor não são feitas tão facilmente, mas Tamari et al. (1993) mostram que os fluxos de vapor são geralmente muito pequenos e podem ser desconsiderados. Outra desvantagem do método é que o estado de tensões não pode ser controlado.

A aplicação no campo do método do perfil instantâneo é similar ao que é usado no laboratório. Na maioria dos casos, as informações são coletadas durante a drenagem da saturação inicial do solo. Entretanto, o fluxo vertical ascendente induzido pela evaporação é também utilizado, particularmente em solos finos.

Uma área de solo é selecionada para teste. Bermas ou outros métodos alternativos para conter a água são construídos para cobrir a superfície do solo com água. Antes da inundação, o solo é instrumentado com medidores de água e/ou sucção. Se apenas a quantidade de água ou a sucção pode ser medida então, o outro pode ser obtido através da curva característica solo-água.

Pode-se utilizar para medir a quantidade de água, os sensores de nêutron ou os sensores TDR. Os sensores de nêutron são mais utilizados em depósitos naturais com o mínimo distúrbio do solo. Os sensores TDR são mais difíceis de instalar sem que ocorra algum distúrbio. Logo, são mais utilizados em aterros onde eles possam ser instalados durante a construção sem causar distúrbios. Os tensiômetros são normalmente usados para medir sucção, porém em solos finos, podem ser requeridos os psicrômetros por causa da alta sucção que se desenvolve.

O procedimento de evaporação de campo é similar ao de laboratório (Khire et al., 1995; Meerdink et al., 1996). Entretanto, o método de campo deveria ser apenas utilizado em situações onde a drenagem da base do solo a ser investigado é nula. O ideal é que se tenha um fluxo descendente insignificante depois que o solo é saturado e a água da superfície é removida. A vegetação também deve ser removida antes da inundação para que a evaporação seja apenas um mecanismo de remoção de água do solo.

A primeira vantagem do método é que um grande volume de solo não perturbado é ensaiado. Outras vantagens são que várias medidas de condutividade

hidráulica são feitas para várias profundidades, a capacidade para medir a condutividade hidráulica *in situ* para alta sucção matricial, e a capacidade para diferenciar camadas com diferentes propriedades hidráulicas não saturadas. As desvantagens são o alto custo e a complexidade dos instrumentos, o longo período de tempo requerido para a coleta dos dados e erros introduzidos pelo cálculo das médias da condutividade hidráulica.

## CAPÍTULO 3

### EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS UTILIZADAS

Este capítulo apresenta as características do solo em estudo bem como todo procedimento utilizado para se obter um conjunto de informações necessárias para a análise do processo de ressecamento. Fez-se, inicialmente, uma simulação numérica a partir do programa CONDES0 (Yao e Znidarcic, 1997), para se ter uma orientação no tocante ao programa experimental.

#### 3.1. Características da Lama

Algumas propriedades do rejeito fino (lama) em estudo foram determinadas em outros momentos que não o deste trabalho. Elas são apresentadas a seguir no intuito de enriquecer as informações sobre este material.

Os ensaios de granulometria realizados em campanhas de estudo dos rejeitos da Samarco mostram que o material é composto por partículas muito finas. Onze amostras foram coletadas no canal de lama da Barragem do Germano e forneceram as médias mostradas na Figura 3.1.

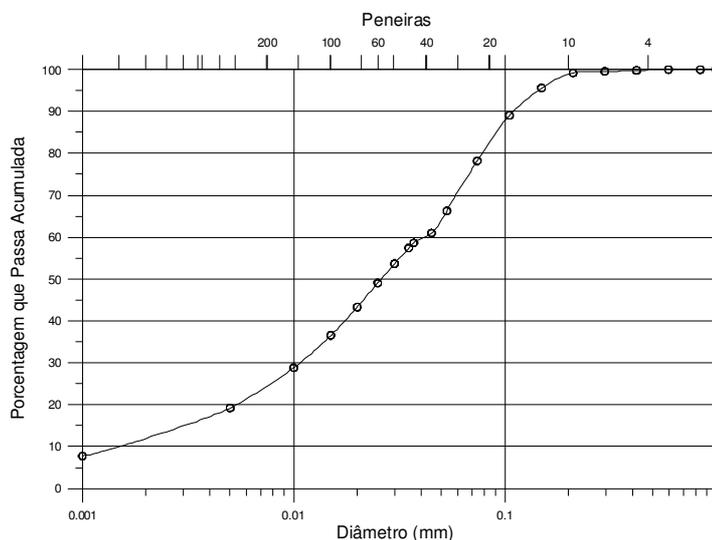


Figura 3.1: Curva granulométrica

Conclui-se que, este material possui uma fração granulométrica de 1% de areia média, 29% de areia fina, 59% de silte e 11% de argila, segundo a ABNT.

Outros ensaios de caracterização também foram realizados, fornecendo os parâmetros indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características da lama

Teor de Sólidos	20,0 %
Índice de Vazios	0,55 a 1,3
Peso Específico Úmido	19,4 a 25,5 kN/ m <sup>3</sup>
Peso Específico Seco	15,9 a 20,3 kN/ m <sup>3</sup>
Densidade dos Grãos	3,40

O teor de sólidos encontrado foi o correspondente à condição de lançamento e o índice de vazios e os pesos específicos úmidos e secos foram obtidos de amostras da lama já adensada (Plano Diretor, 1999).

Análises químicas realizadas com amostras da lama (Laboratório da SAMARCO MINERAÇÃO S.A, 2001) indicaram a presença dos elementos químicos apresentados na Tabela 3.2, com suas respectivas porcentagens de ocorrência.

Tabela 3.2: Composição Química

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46,25 % (Fe-32,35 %)
SiO <sub>2</sub>	49,89 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,26 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,105% (P-0,046 %)
PPC	2,495 %

A realização de ensaios do tipo CU (consolidado e não drenado) possibilitaram o traçado de envoltórias de resistência que forneceram um valor de coesão efetiva ( $c'$ ) igual a 55,2 kPa e de ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) igual a 43<sup>0</sup> (Plano Diretor, 1999).

Os ensaios de adensamento induzido por percolação realizados com amostras de lama coletadas no canal de lançamento e no reservatório do dique auxiliar (Ensaio Geotécnicos da Lama, 2001 e Botelho, 2001), possibilitaram o traçado das curvas de

compressibilidade e permeabilidade da lama, fornecendo, respectivamente, os valores do índice de vazios  $e$ , em função de tensões efetivas  $\sigma'$  (kPa), e do coeficiente de permeabilidade  $K$  (m/s), em função do índice de vazios. As relações constitutivas obtidas se encontram na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade

Amostra	Compressibilidade	Permeabilidade
Canal	$e = 1,69.(\sigma'+0,09)^{-0,14}$	$K = 0,48 \times 10^{-7} \cdot e^{2,99}$
Reservatório	$e = 1,74.(\sigma'+0,12)^{-0,13}$	$K = 0,62 \times 10^{-7} \cdot e^{2,99}$

### 3.2. Ensaio em Amostra Reduzida

Para se ter uma prévia do comportamento do material a ser estudado, realizou-se um ensaio em amostra reduzida. Utilizou-se uma caixa de vidro de 30x30x30 cm cuja face superior era aberta. Passou-se vaselina nas paredes internas da caixa para simular a redução de resistência a tração que surge no solo, especialmente nas laterais. Isto cria condições para que as trincas se desenvolvam nas extremidades.

Inicialmente, coletou-se uma amostra de lama, aproximadamente 10 litros, no canal que conduz o rejeito à barragem. Despejou-se este volume de lama diluída na caixa de vidro e a amostra, imediatamente, foi exposta às condições atmosféricas. A Figura 3.2 ilustra o início do ensaio.

No 5<sup>o</sup> dia realizou-se o sifonamento para a retirada da água decantada. Neste dia, tinha-se uma altura de 5,20 cm de lama. No 10<sup>o</sup> dia, a parte mais superficial da amostra já se encontrava desprendida das paredes da caixa devido às trincas periféricas. Neste mesmo dia colocou-se uma tampa de plástico sobre a caixa para proteger a amostra das chuvas. No 11<sup>o</sup> dia, a amostra estava totalmente desprendida das paredes da caixa atingindo, desta forma, o fundo. Apareceram, também, neste dia, as primeiras trincas superficiais que são aqui denominadas de trincas internas como mostra a Figura 3.3.

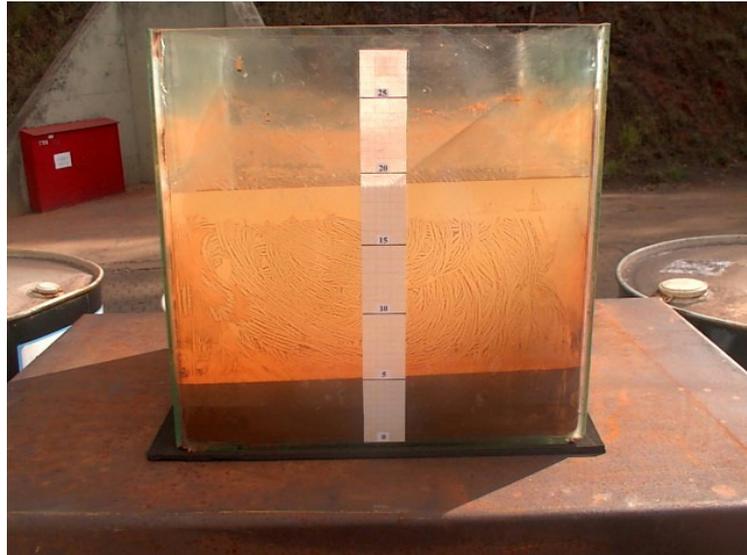


Figura 3.2: Amostra exposta às condições atmosféricas



Figura 3.3: Ensaio no laboratório e amostra com algumas trincas superficiais

Após a ocorrência de uma forte chuva no 11º dia, o plástico que protegia a amostra rasgou e a amostra ficou sob uma camada de 1,10 cm de água. A água foi sifonada e com o ocorrido, o ensaio passou a ser realizado no laboratório.

No 15º dia, realizou-se uma amostragem para o cálculo do teor de umidade gravimétrica a diferentes profundidades. O peso desta amostra era de 33,10 g. Estas amostras foram retiradas em um único ponto, próximo da borda e os resultados estão apresentados na Figura 3.4. Neste dia, verificou-se, também, o aparecimento de novas trincas superficiais como mostra o esquema da Figura 3.5.

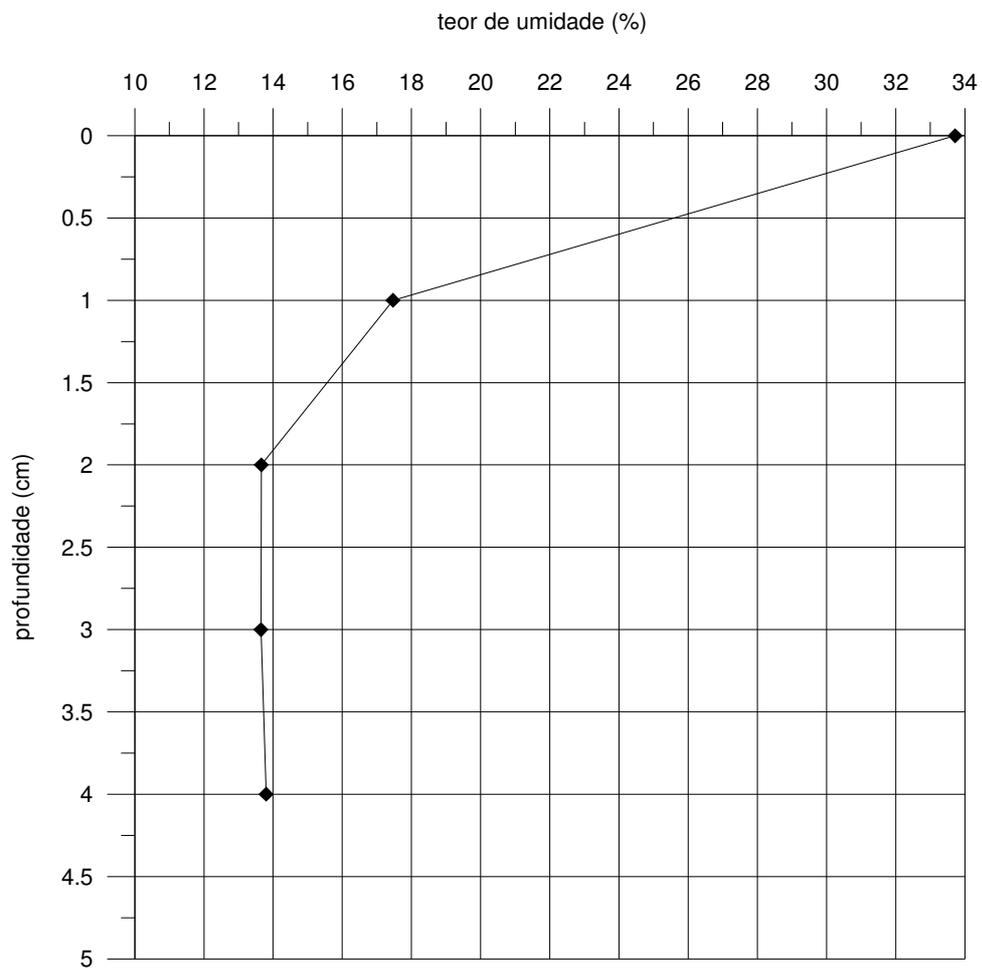


Figura 3.4: Teor de umidade gravimétrica do ensaio

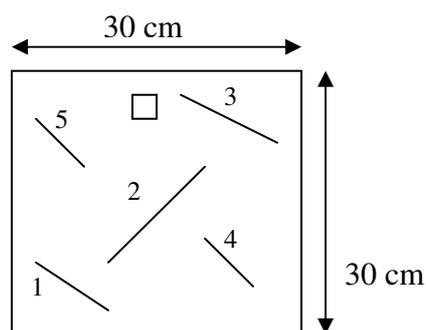


Figura 3.5: Planta indicando posição das trincas e ponto de coleta

Devido ao fato de haver variação muito pequena ou quase nenhuma da altura e do peso de lama, o ensaio foi encerrado no 25<sup>o</sup> dia. No 30<sup>o</sup> dia, coletou-se uma amostra indeformada e obteve-se a massa específica e o teor de umidade médio (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Dados da amostra indeformada

<b>Diâm. (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Tara (g)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Amostra (g)</b>	<b>Massa Específica Úmida (g/cm<sup>3</sup>)</b>
9,79	3,80	33,90	286,05	613,20	<b>2,03</b>
<b>Observação</b>				<b>Umidade (%)</b>	<b>Massa Esp. Seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Fundo				4,8	<b>1,83</b>
Superfície				13,4	
Superfície				14,4	
Média				10,9	

Eram realizadas leituras regulares da altura da lama e da água e do peso do conjunto. A Figura 3.6 apresenta a evolução da altura da lama durante o período do ensaio, dando uma idéia do comportamento do material nas fases de sedimentação/adensamento e ressecamento. Já a Figura 3.7, permite uma estimativa de taxa de evaporação. Para o período até o 11<sup>o</sup> dia (coma amostra exposta ao ar livre) a

taxa é de 2,1 mm/dia. Nos dias subseqüentes, ela cai bastante chegando a 0,7 mm/dia na situação em que a mostra se encontra abrigada dentro do laboratório.

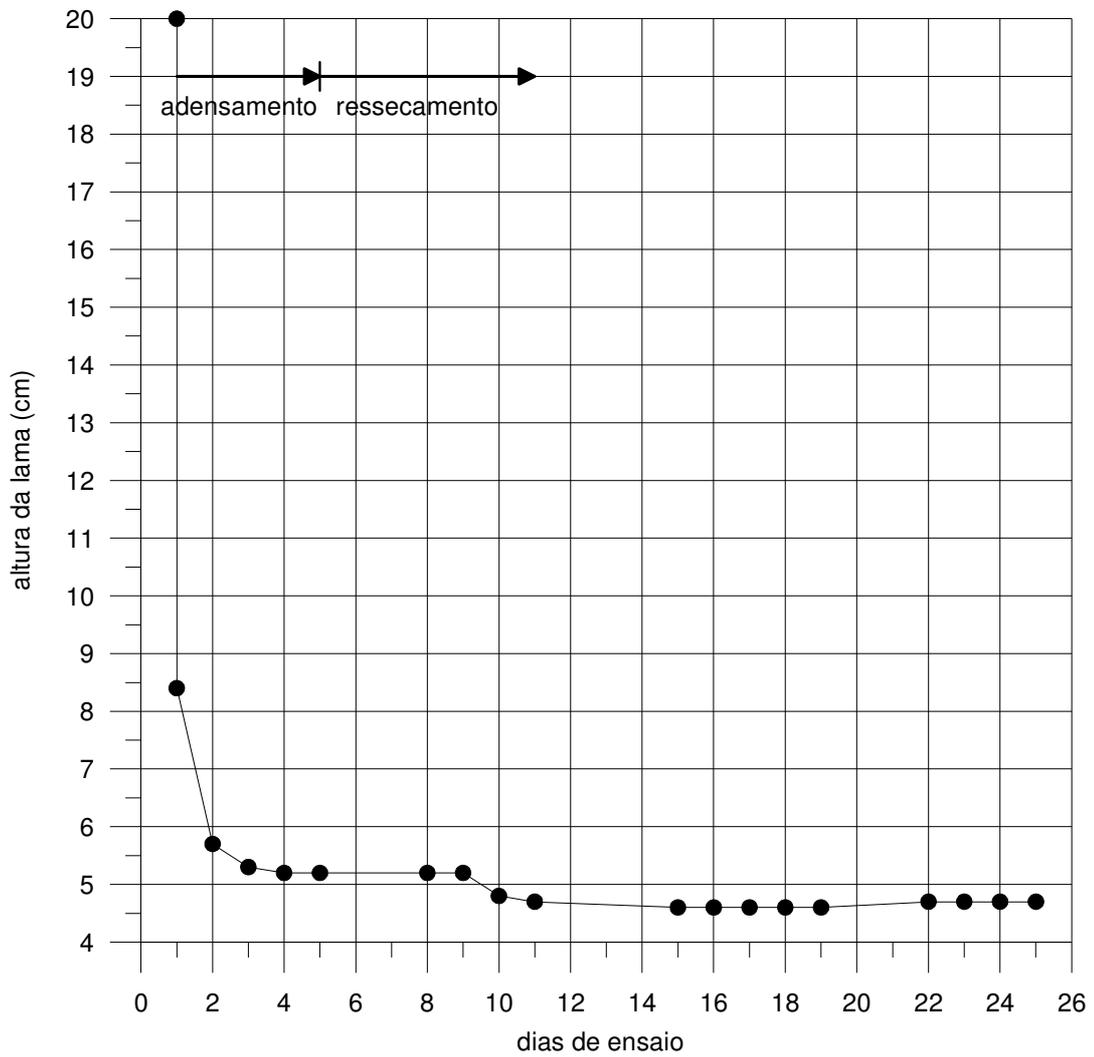


Figura 3.6: Evolução da altura de lama durante o ensaio

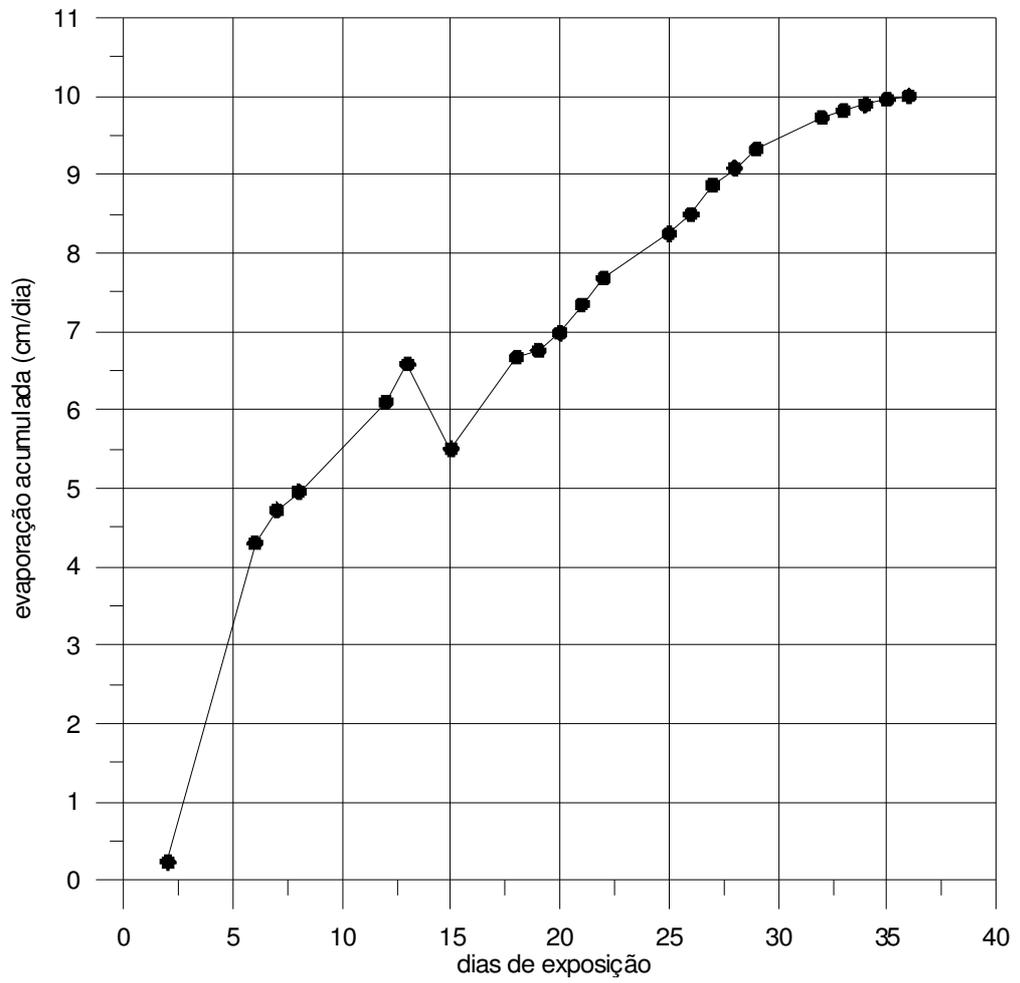


Figura 3.7: Evaporação estimada

### 3.3. Ensaio de Contração Livre (“shrinkage test”)

A partir do ensaio de contração livre, obtém-se a curva tradicional de contração, de onde é possível determinar o limite de contração e o funcional  $\alpha$  requerido na teoria de ressecamento (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995). O equipamento utilizado na realização do ensaio era composto de um anel de ferro, de 20,3 cm de diâmetro interno e com 4,65 cm de altura, soldado sobre uma placa de ferro de 35x35 cm. Havia um colarinho de ferro removível de 16,5 cm de altura que se encaixava sobre o anel. Passou-se vaselina no fundo e nas paredes internas do anel.

Para a realização do ensaio, coletou-se uma amostra de lama diluída no canal que conduz o rejeito à barragem. Este material foi colocado no equipamento sendo que sua altura era de aproximadamente 8 cm. No 8<sup>o</sup> dia, com a sedimentação e o adensamento praticamente concluídos, fez-se o sifonamento para a retirada da água decantada. Em seguida foi retirado o colarinho, ficando o material somente na área do anel como mostra a Figura 3.8. No dia seguinte, realizaram-se as primeiras leituras de variação de diâmetro, altura e peso da amostra.



Figura 3.8: Ensaio de contração livre

No 14º dia, notou-se a separação da lama da parede do anel. As observações e as leituras foram realizadas até 23º dia. O ensaio foi encerrado devido ao fato de que a variação de volume da amostra era muito pequena e a amostra estava praticamente seca. A Figura 3.9 ilustra o final do ensaio.



Figura 3.9: Final do ensaio de contração livre

A amostra, então, foi submetida a uma secagem em estufa a 110°C para a determinação da massa seca. De posse de todas estas informações, obteve-se a curva característica de contração sendo possível determinar o limite de contração e o  $e_{min}$ , índice de vazios mínimo.

### 3.4. Construção da Área Teste

Construiu-se uma área teste na barragem do Germano para que nela fosse realizado o monitoramento de campo necessário para o estudo da lama. Ela abrange uma área de aproximadamente 4854,00 m<sup>2</sup> e se localiza na porção norte da barragem próxima ao dique auxiliar.

Inicialmente, pensou-se em lançar rejeito silicoso nesta região para que este depois de seco pudesse ser utilizado como material para a construção do dique que

delimita a área. Devido a problemas operacionais isto não foi possível. Assim, utilizou-se o rejeito silicoso que já se encontrava ali depositado. Com esta nova idéia, teve-se que diminuir o tamanho da área inicialmente pensada, pois como se tem apenas uma camada de aproximadamente 2m de rejeito silicoso sobre lama alguns locais não deram suporte para as máquinas operarem como mostra a Figura 3.10.



Figura 3.10: Escavação atingindo a camada de lama

Utilizou-se uma retroescavadeira e um trator para a construção do dique como mostra a Figura 3.11. O dique possui 3,0 m de altura e sua crista tem 1,5 m de largura formando um talude de aproximadamente 1V/1,5H. A declividade obtida no interior desta área foi de 2%.



Figura 3.11: Construção do dique que limita a área teste

Construiu-se uma passarela até, aproximadamente, o centro da área teste para que lá fossem instalados os instrumentos. Fez-se uma escada para que se tivesse acesso à lama para coleta de amostras. Em dois pilares de madeira que dão sustentação à passarela, foi passada graxa, para diminuir a tensão de tração do solo ao redor dos mesmos, pois ali se pensava em estudar a abertura e propagação das trincas de contato.

Encontra-se, também, nesta área, um vertedouro situado no lado oposto ao do lançamento da lama como mostra a Figura 3.12. Ele possui uma base quadrada de 0,40 m de lado e altura de 2,0 m, sendo que a saída de água é controlada por "stop logs" retangulares de 0,38 x 0,40 m. Um tubo de PVC de 250 mm de diâmetro conduz a água que passa sobre o "stop log" para jusante do dique.



Figura 3.12: Vista do vertedouro

O enchimento desta área foi realizado no período de 05 de outubro a 08 de novembro de 2001, através do bombeamento de lama do reservatório a montante do dique auxiliar da barragem do Germano. Para esta operação, colocou-se uma balsa no reservatório para a instalação de uma bomba, que bombeava a lama para a área teste através de um mangote de 150 mm de diâmetro. Esta bomba era alimentada por um gerador a diesel de 440 V. À medida que o teor de sólidos da lama bombeada diminuía, o que era verificado pela queda da leitura da corrente que alimentava a bomba, a posição da balsa era modificada no reservatório. Também foram instalados vários flutuadores para evitar que o mangote afundasse na lama do reservatório (Figura 3.13). Os fatores que alongaram o período do bombeamento foram os vários entupimentos e rompimentos do mangote e alguns problemas com a bomba, que não era muito adequada para o bombeamento de lama. Com o fim do bombeamento, no dia 08 de novembro, o nível de água e lama na área teste era de 134,0 cm (Figura 3.14).



Figura 3.13: Sistema de bombeamento da lama



Figura 3.14: Vista do ponto de lançamento na área teste

Para que o processo de secagem se inicie é necessário que não haja lâmina d'água sobre o material. Portanto, uma camada de água permaneceu na área até que tudo estivesse definitivamente pronto para o acompanhamento de todas as variáveis pertinentes ao estudo. No dia 25 de março de 2002 toda água foi drenada através do

vertedouro e assim, iniciava-se a secagem da lama como ilustrado na Figura 3.15. Todo recalque ocorrido a partir desta data é por secagem e não mais por adensamento.



Figura 3.15: Drenagem da lâmina d'água

### **3.5. Considerações sobre a Instrumentação**

#### **3.5.1. Simulação Numérica Preliminar**

Para a instalação dos instrumentos foi realizada uma análise numérica preliminar do processo de ressecamento utilizando o programa CONDES0 já comentado no Capítulo 2, levando-se em consideração as condições de contorno existentes e as características do solo. Dessa forma, a posição, a altura e a profundidade de locação dos sensores foram definidas tendo-se em conta essas análises. O critério adotado para posicioná-los foi a observação dos pontos onde haviam variações significativas do comportamento nos perfis obtidos a partir da simulação. As Figuras 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 apresentam os resultados obtidos nas análises numéricas.

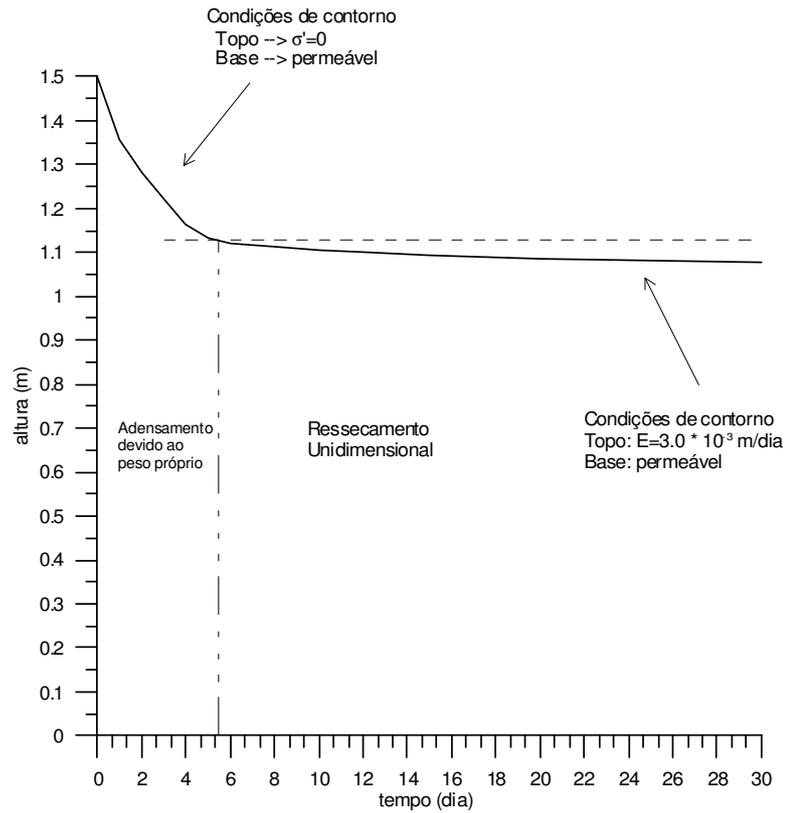


Figura 3.16: Simulação do perfil de recalque

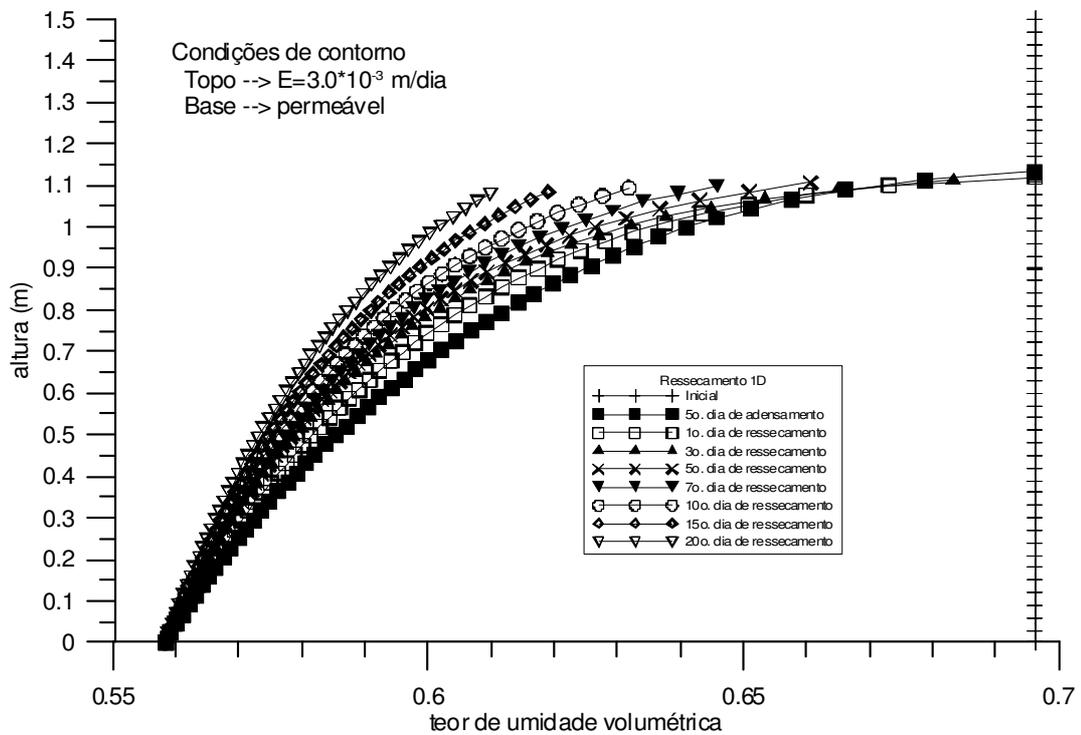


Figura 3.17: Simulação do perfil de umidade volumétrica

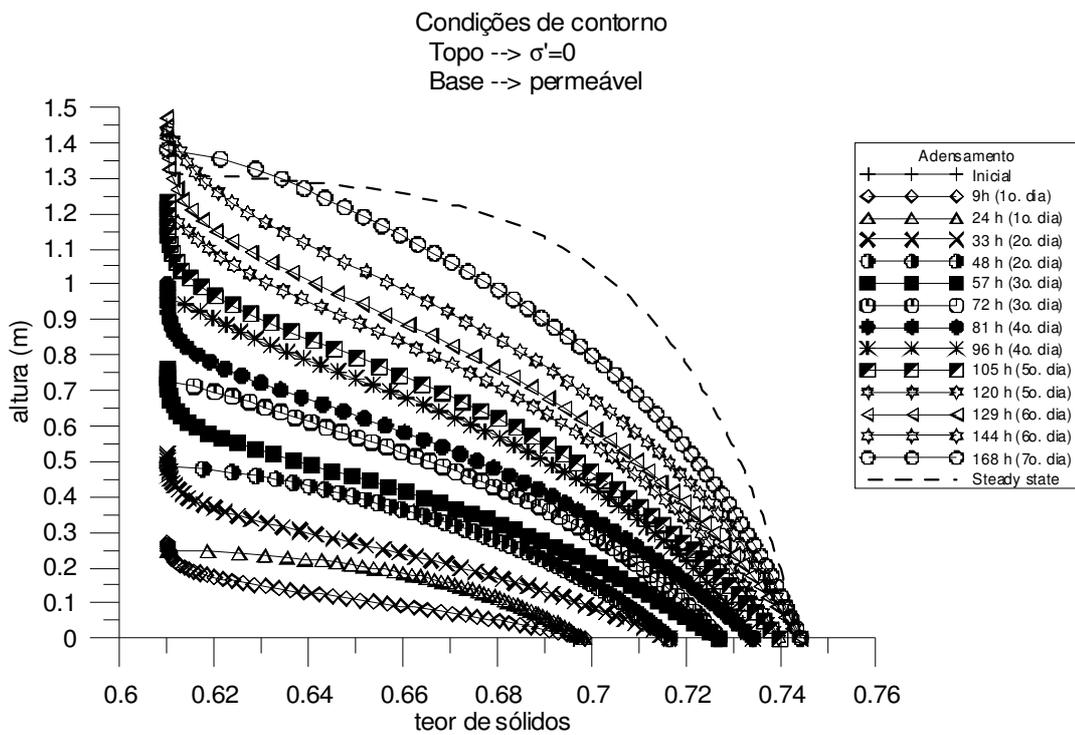
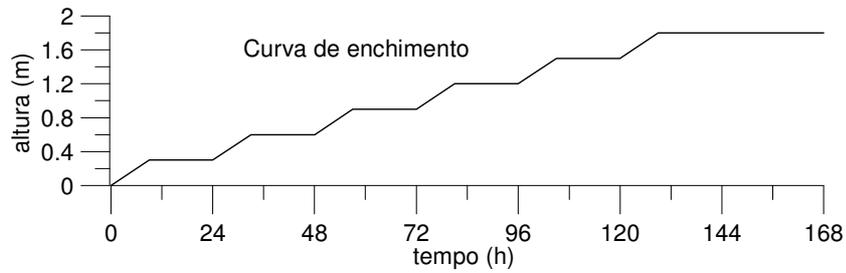


Figura 3.18: Simulação do perfil de teor de sólidos

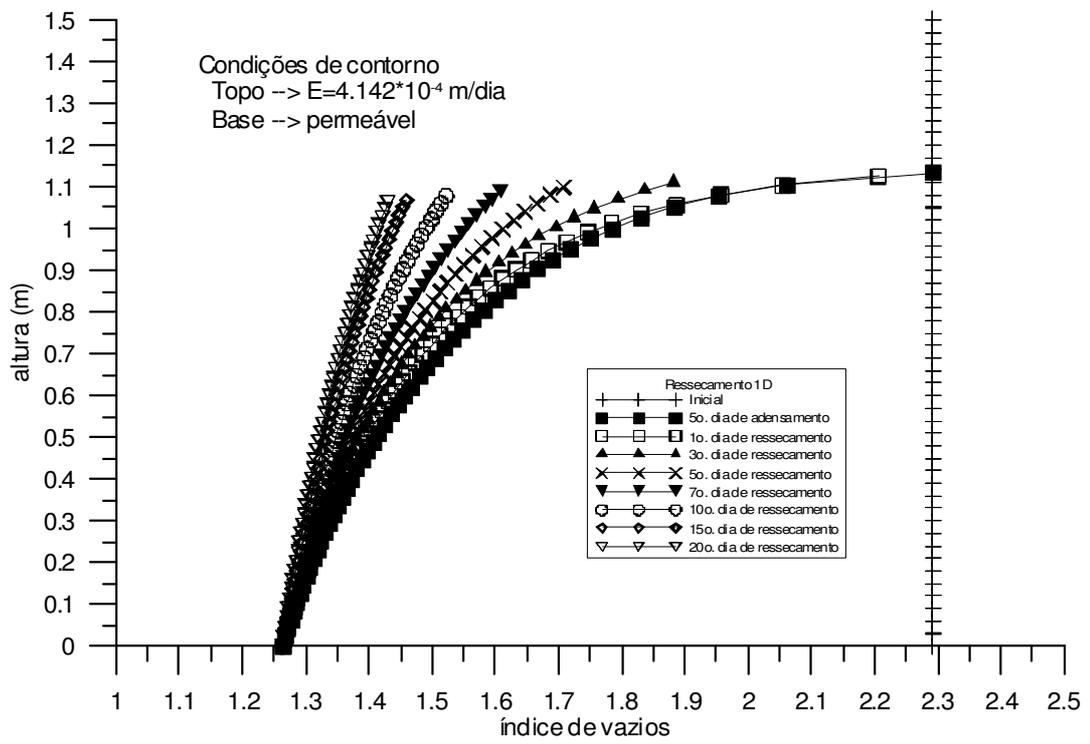


Figura 3.19: Simulação do perfil de índice de vazios

### 3.5.2. Estação Meteorológica e Modelo de Evaporação

A estação meteorológica utilizada é fabricada pela Davis Instruments ®. Este equipamento encontra-se disponível em dois modelos: sistema a cabo e sistema via rádio. A opção escolhida foi o sistema via rádio devido a maior flexibilidade para se obter os dados. A estação contém um conjunto de sensores capaz de obter dados sobre a chuva, temperatura, umidade do ar, velocidade e direção do vento e radiação solar (Figura 3.20). Acompanha a estação um "console" com teclado e visor que permite consultar os dados no momento da leitura assim como seu histórico, e fornecer a previsão do tempo (Figura 3.21). Está incluído também um "datalogger" que registra os dados e que pode ser descarregado num "notebook" gerando relatórios e gráficos. A capacidade de armazenamento depende do intervalo de leitura imposto pelo usuário. Para o caso específico adotou-se um intervalo de 30min, cuja capacidade de armazenar é de aproximadamente 53 dias. A instalação e utilização dos equipamentos é relativamente simples, desde que sejam obedecidas as etapas mostradas no manual. A calibração pode ser feita para a maioria das variáveis. Se o valor de alguma variável estiver muito alto ou muito baixo pode-se corrigir o desvio através do procedimento de calibração.

O relatório fornecido pela estação mostra as seguintes informações:

- Velocidade do vento (m/s)

O anemômetro mede a velocidade do vento e a direção para o qual ele está soprando. O console informa a direção do vento dominante a cada 10 minutos e registra a última leitura.

- Temperatura (°C)

O sensor mede a temperatura externa do ar e a temperatura interna no console.

- Temperatura aparente sob o efeito do vento ("wind chill") (°C)

O sensor mede a temperatura do ar considerando a influência da velocidade do vento. O nosso corpo é envolvido por uma camada de ar morno devido à transferência

de calor que ocorre através da pele. Se não há movimento do ar esta camada permanece próxima ao corpo e oferece uma certa proteção contra o frio. Entretanto, se há movimento, esta camada é afastada e você pode sentir frio. Acima de 33<sup>0</sup>C o movimento do vento não tem efeito na temperatura aparente logo, esta temperatura é a mesma da temperatura externa. O console calcula a “wind chill” baseada na média dos dez minutos da velocidade do vento.

- Temperatura aparente sob o efeito da umidade relativa do ar (“heat index”) (°C)

O sensor mede a temperatura aparente considerando o efeito da temperatura e da umidade relativa para determinar como o ar é realmente sentido.

- Umidade Relativa (%)

O sensor mede a umidade relativa do ar e a umidade interna do console. Umidade é a quantidade de vapor de água no ar. Entretanto, a quantidade de vapor de água que o ar pode conter varia com a temperatura e a pressão do ar. A umidade relativa leva em conta esses fatores e reflete a quantidade de vapor de água no ar como uma porcentagem da quantidade que o ar pode conservar. Logo, é a razão entre a quantidade de vapor de água e a sua capacidade. A umidade relativa é um fator importante para se determinar a evaporação, pois umidade baixa tem uma alta capacidade de aumentar o vapor de água.

- “Dew-point” (°C)

É a temperatura utilizada para prevê a formação de orvalho, geadas e nevoeiros. Alto valor de “dew-point” indica alta quantidade de vapor de água e também uma provável chance de ocorrer chuvas e tempestades.

- THSW (Temperature-Humidity-Sun-Wind)

Informa como é a nossa percepção da temperatura. Utiliza a umidade, a temperatura e os efeitos da radiação solar e do vento para calcular a temperatura aparente.

- Chuva (mm)

O pluviômetro mede o total de chuvas registrando-as sob quatro formas: valor instantâneo, chuvas diárias, chuva mensal e chuva anual.

- Pressão barométrica (hPa)

O peso do ar na nossa atmosfera exerce uma pressão na superfície da Terra. Esta pressão é conhecida como pressão atmosférica e varia com a altitude. Para compensar esta variação e facilitar a comparação entre locais com diferentes altitudes a pressão atmosférica é ajustada a uma pressão ao nível do mar equivalente, a pressão barométrica. A estação mede a pressão atmosférica e a transforma em pressão barométrica.

- Radiação solar ( $W/m^2$ )

O sensor mede a radiação solar global, uma medida da intensidade da radiação do sol que alcança uma superfície horizontal. Inclui a componente direta do sol e a componente refletida do restante do céu. É a quantidade de radiação solar incidente no sensor de radiação solar num dado tempo.

- Evaporação

É a medida da quantidade de vapor de água que retorna para o ar numa dada área. É a combinação da evaporação com a transpiração. A estação utiliza a temperatura do ar, a umidade relativa, a quantidade de vento que passa num determinado ponto durante um tempo específico (velocidade x tempo) e a radiação solar para estimar a evaporação.



Figura 3.20: Estação meteorológica

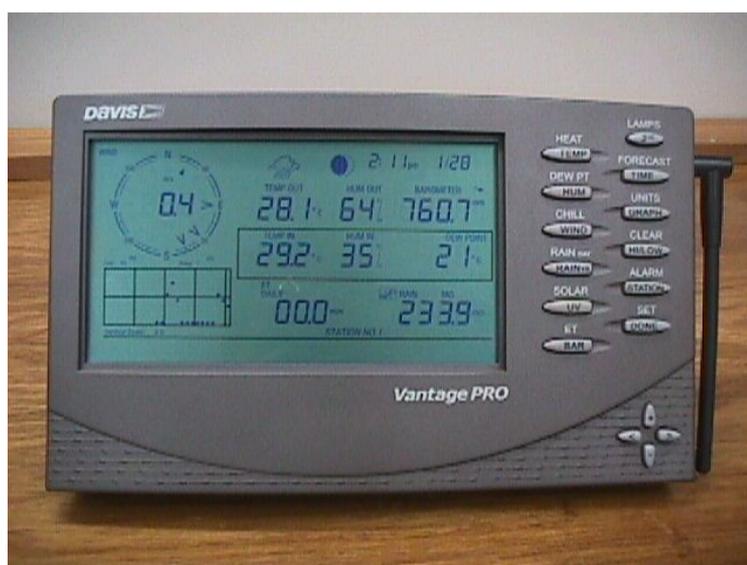


Figura 3.21: Receptor dos dados da estação meteorológica – console

O modelo utilizado pela estação para estimar a evaporação (ET) baseia-se na Equação 3.1 que segue:

$$ET = \sum E_i \quad (\text{mm}) \quad \text{para } i = 1 \text{ a } 24 \text{ horas} \quad (3.1)$$

Para o calculo de  $E_i$  adota-se uma equação para ser utilizada durante o dia e outra equação para ser utilizada durante a noite. São elas:

$$E_i = W_i \cdot R_{ni} + (1 - W_i) \cdot (e_{si} - e_{di}) \cdot F_{di} \quad \text{para } R_{ni} > 0 \quad (3.2)$$

$$E_i = W_i \cdot R_{ni} + (1 - W_i) \cdot (e_{si} - e_{di}) \cdot F_{ni} \quad \text{para } R_{ni} \leq 0 \quad (3.3)$$

As variáveis usadas nas equações para cada dia são as seguintes:

$e_{si}$  = pressão de saturação do vapor de água na atmosfera

$T_i$  = temperatura do ar em °C

$e_{di}$  = pressão de vapor em kPa

$U_i$  = velocidade do vento em m/s

$R_{si}$  = radiação solar em W/m<sup>2</sup>

$R_{ni}$  = radiação efetiva (“net radiation”) = f( $R_{si}$ ,  $T_i$ ) em mm

$$W_i = \frac{\Delta_i}{(\Delta_i + \gamma_i)} \quad (3.4)$$

$$\Delta_i = \left( \frac{e_{si}}{T_{ki}} \right) \left( \frac{6790,4985}{T_{ki}} - 5,02808 \right) \quad \text{em } \text{kPa}/^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$e_{si} = 0,6108 \cdot \exp \left[ \frac{(17,27 \cdot T_i)}{(T_i + 237,3)} \right] \quad \text{em } \text{kPa} \quad (3.6)$$

$T_{ki} = 273,16 + T_i$  em Kelvin

$\gamma_i = 0,000646 \cdot (1 + 0,000946 \cdot T_i) \cdot P_b$  em kPa/°C

$F_{di} = 0,030 + 0,0576 \cdot U_i$  em mm/kPa

$F_{ni} = 0,125 + 0,0439 \cdot U_i$  em mm/kPa

$R_{ni}$  em mm de evaporação equivalente é determinado pela divisão da variável que introduz o valor de calor latente de vaporização  $\lambda$ , onde:

$$\lambda = 694,5 \cdot (1 - 0,000946 \cdot T_i) \quad \text{em } W/m^2 \text{ mm} \quad (3.7)$$

A pressão barométrica  $P_b$  é estimada a partir da elevação  $z$  acima do nível do mar usando a equação abaixo:

$$P_b = 101,3 - 0,01152 \cdot z + 5,44 \cdot 10^{-7} \cdot z^2 \quad \text{em } kPa \quad (3.8)$$

### 3.5.3. Sensores do Solo

Devido a necessidade de confiabilidade nas respostas e dados dos sensores optou-se pelos equipamentos da Campbell Scientific ® , pois conhecia-se experiências de outros trabalhos onde estes instrumentos são recomendados.

#### 3.5.3.1. Time Domain Reflectometry (TDR)

O modelo de TDR utilizado neste trabalho foi o CS615 da Campbell Scientific® (Figura 3.22). Este equipamento mede o teor de umidade volumétrica do solo a partir do princípio da propagação das ondas eletromagnéticas de acordo com a variação da constante dielétrica. As informações fornecidas por este sensor são obtidas através da sua conexão com o “datalogger” CR10X, também da Campbell.

O TDR consiste de duas hastes de aço inoxidável conectadas a um sistema de circuito. Este sistema possui quatro cabos condutores conectados para a sua alimentação, para capacitar o equipamento e para monitorar o pulso de saída. O sistema de circuito é encapsulado com epoxy formando uma caixa retangular.

As hastes possuem 30,0 cm de comprimento, 3,2 mm de diâmetro e estão distantes uma da outra de 3,2 cm. Elas funcionam como um guia das ondas e devem ser mantidas sempre paralelas. A média da constante dielétrica nos 30,0 cm de comprimento é o valor utilizado pelo equipamento. Se o TDR for instalado na posição

vertical, ter-se-á informação sobre uma camada de 30 cm. Se instalado na posição horizontal à superfície, ter-se-á a umidade frente a outros fluxos de água vertical. Se instalado a um ângulo de  $30^{\circ}$  com a superfície horizontal dará uma indicação de umidade nos 15 cm do solo.



Figura 3.22: Sensor que mede o teor de umidade volumétrica - TDR

A propagação do campo eletromagnético na configuração do CS615 é predominantemente afetada pela mudança da constante dielétrica, devido a alteração da umidade, mas o TDR também é afetado pela condutividade elétrica do meio. A condução elétrica provocada pelos íons livres no solo resultam na atenuação do sinal e conseqüente alteração nos resultados.

A quantidade de matéria orgânica e argila no solo podem alterar a resposta do TDR que adota um método dependente da constante dielétrica. A energia eletromagnética introduzida pelo equipamento atua para reorientar ou polarizar as moléculas de água, que são polares. Se outras forças estão atuando nas moléculas de água polar, a força exercida pelo sinal aplicado será, provavelmente, menor para polarizá-las. Isto faz com que alguma água fique “escondida” do equipamento. Matéria orgânica e a maioria das argilas são altamente polares e algumas argilas absorvem água intersticialmente e então, inibem a polarização.

O comprimento do cabo não tem limitações quando em aplicações típicas. A “performance” do equipamento pode ser degradada se for usado um outro tipo de cabo senão o fornecido.

O CS615 é sensível à temperatura. O fabricante indica que para temperaturas entre 10<sup>0</sup>C e 30<sup>0</sup>C não são necessárias correções no valor da umidade.

Existem duas propriedades do solo que afetam a resposta do CS615 para variações na umidade. Alta quantidade de argila (maior que 30%) ou alta condutividade elétrica (maior que 1 dS m<sup>-1</sup>) podem requerer que a calibração seja ajustada ou gerada para um solo específico.

A Figura 3.23 abaixo, mostra o efeito da condutividade elétrica na calibração. Valores iguais e menores que 1 dS m<sup>-1</sup> a calibração mostrada para 0,8 dS m<sup>-1</sup> trabalha bem. Para valores de condutividade elétrica até 5 dS m<sup>-1</sup> a resposta do CS615 é boa. Estas curvas foram obtidas a uma temperatura de 20<sup>0</sup>C. A Tabela 3.5 mostra as equações das curvas.

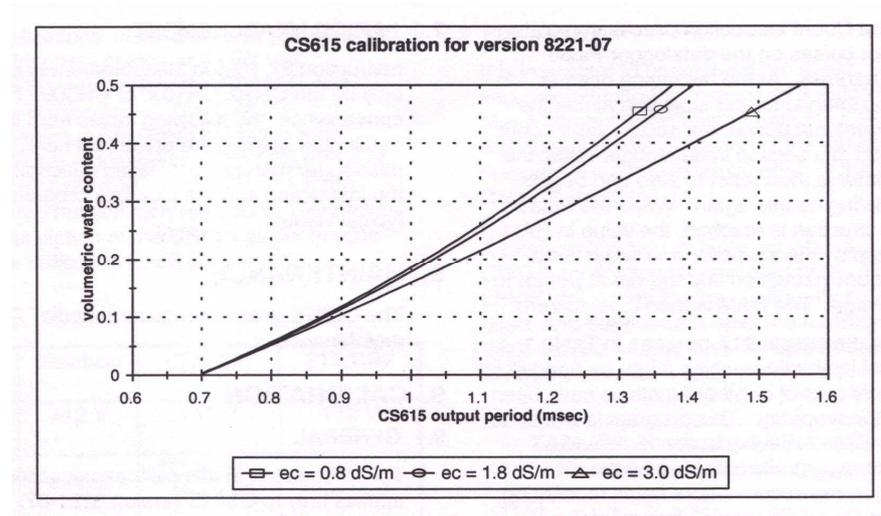


Figura 3.23: O efeito da condutividade elétrica na calibração

Tabela 3.5: Equações de calibração

Condutividade Elétrica (dS m <sup>-1</sup> )	Calibração
≤1,0	$\theta_v(\tau) = -0,187 + 0,037\tau + 0,335\tau^2$
1,8	$\theta_v(\tau) = -0,207 + 0,097\tau + 0,288\tau^2$
3,0	$\theta_v(\tau) = -0,298 + 0,361\tau + 0,096\tau^2$

A curva de calibração a ser utilizada pode ser aproximada a uma das descritas na Figura 3.23 se a condutividade elétrica do solo é conhecida ou determinada diretamente através de medidas com o CS615 e a umidade real é independentemente determinada. Altos teores de argila têm um efeito similar sobre a calibração mas a magnitude é dependente do tipo de argila.

Uma calibração expedida dos TDRs foi realizada antes que os mesmos fossem alocados na área teste. Com um dos TDRs previamente conectado ao “datalogger”, encheu-se um balde com lama e este foi imerso no material. Imediatamente teve-se a resposta do sensor. Uma amostra foi coletada neste balde para a determinação da umidade volumétrica. O valor obtido do sensor foi bastante coerente com o da amostra utilizando a curva de calibração de 0,8 dS/m:

- Condutividade elétrica: 0,242 dS/m
- Umidade volumétrica lida: 0,86
- Umidade volumétrica medida: 0,86 (média de três determinações)

Neste momento, a preocupação maior era com a funcionalidade do equipamento, pois este não tinha histórico de eficiência quando em um material com teor de ferro considerável. Para este caso não ocorreu interferência. A partir da medida da condutividade elétrica da lama adotou-se uma das curvas de calibração indicada pelo fabricante.

Uma calibração mais minuciosa foi realizada no final do período de monitoramento da área teste. Assim, ao finalizar a coleta de dados na área teste desenterraram-se todos os sensores e partiu-se para a calibração dos TDRs. Numa primeira tentativa, cortou-se o fundo de dois tambores de ferro e estes foram divididos ao meio. Obteve-se, então, quatro anéis que foram cravados na areia e preenchidos com lama. Ao se chegar a meia altura, aproximadamente 11,5 cm, lançava-se um TDR em cada anel e prosseguia-se com o enchimento. Amostras foram coletadas no primeiro e terceiro dias e do sexto ao décimo dia, totalizando sete dias e sete amostras.

Com a resposta dos sensores, efetuaram-se os cálculos a partir da equação de calibração para condutividade elétrica menor que 1 dS m<sup>-1</sup> para encontrar o período de

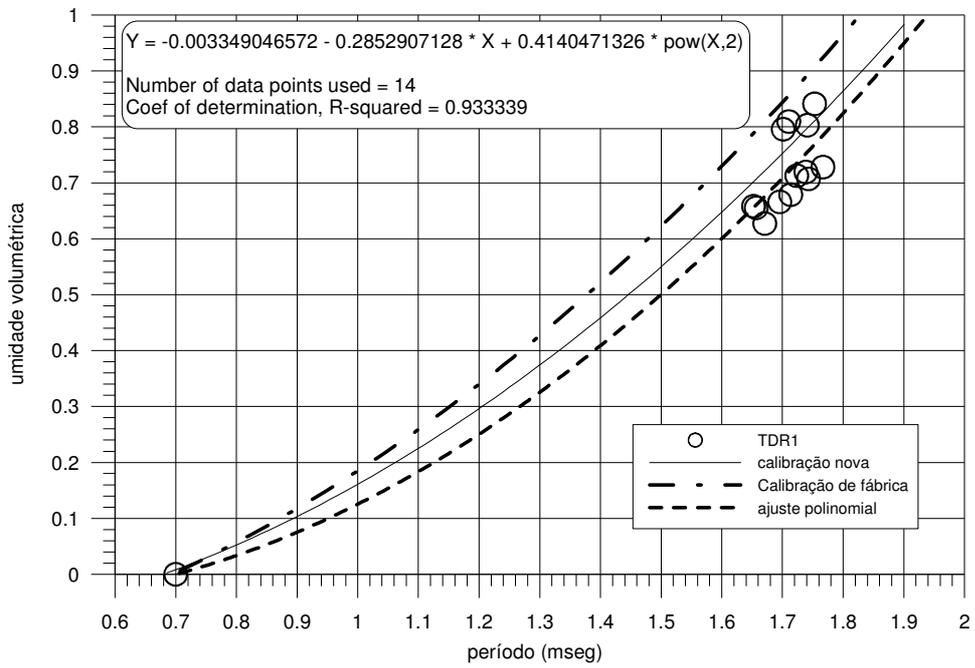
resposta  $\tau$ . A umidade gravimétrica obtida no laboratório foi transformada em umidade volumétrica a partir da Equação 3.9.

$$\theta_v = \frac{G_w}{1 + G_w} \quad (3.9)$$

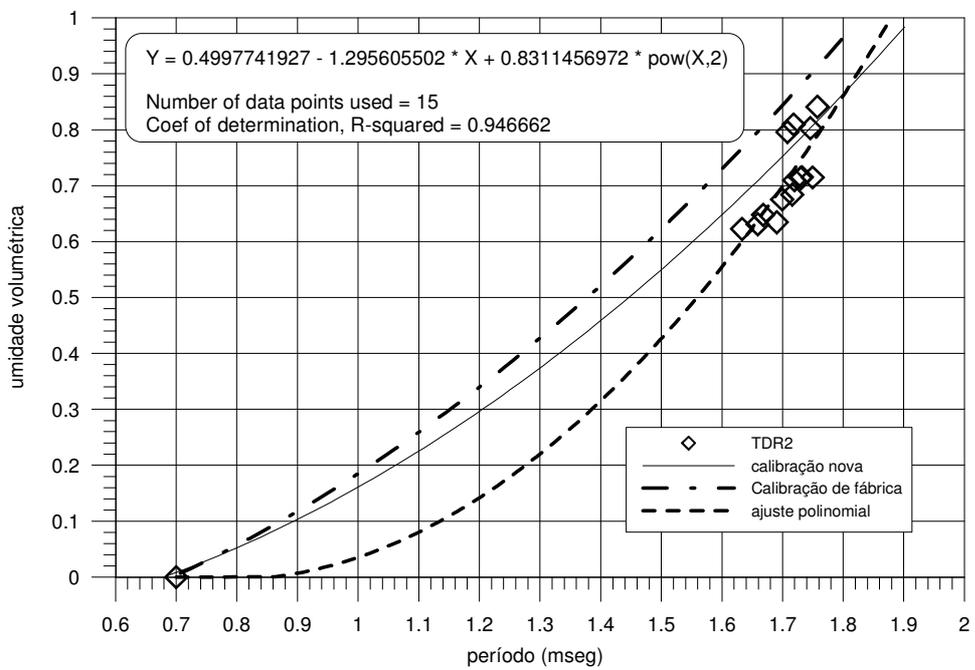
Com estes valores, traçou-se a nova curva de calibração. O resultado não foi satisfatório e, portanto, decidiu-se por outra tentativa de calibração. Esta decisão também foi pelo fato de algumas partes dos sensores terem ficado expostas ao ar devido ao aparecimento de trincas. Isto reduz a veracidade das medidas, segundo o manual do equipamento.

Procedeu-se da mesma forma anterior, porém, com coleta de amostras em dias consecutivos e em maior número e sempre que se iniciava uma trinca ela era fechada. Ao avaliar os dados obtidos, observou-se a não coerência entre os dados dos sensores e os obtidos no laboratório. Enquanto um não variava com o tempo para um dos sensores o outro variava consideravelmente. O não funcionamento dos sensores pode ser atribuído ao fato de estar-se trabalhando próximo a um material condutor (os tambores). Isto poderia estar afetando a eficiência do sensor por se tratar de um método onde as propriedades eletromagnéticas são muito importantes.

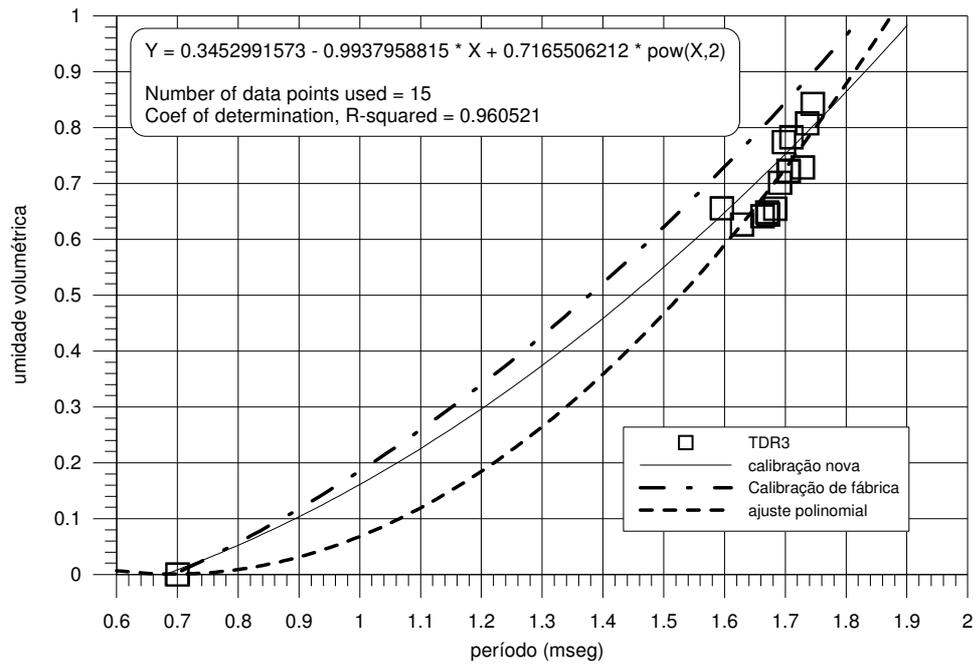
Decidiu-se, então, pela construção de um vala de 1,5 x 0,5 x 0,5 m. Esta vala foi preenchida até, aproximadamente, 0,2 m, os quatro TDR's foram lançados e então foram cobertos com lama. As amostras eram coletadas entre os TDR's. Com os dados dos sensores e das amostragens, foram obtidas novas curvas de calibração para os sensores que são mostradas na Figura 3.24



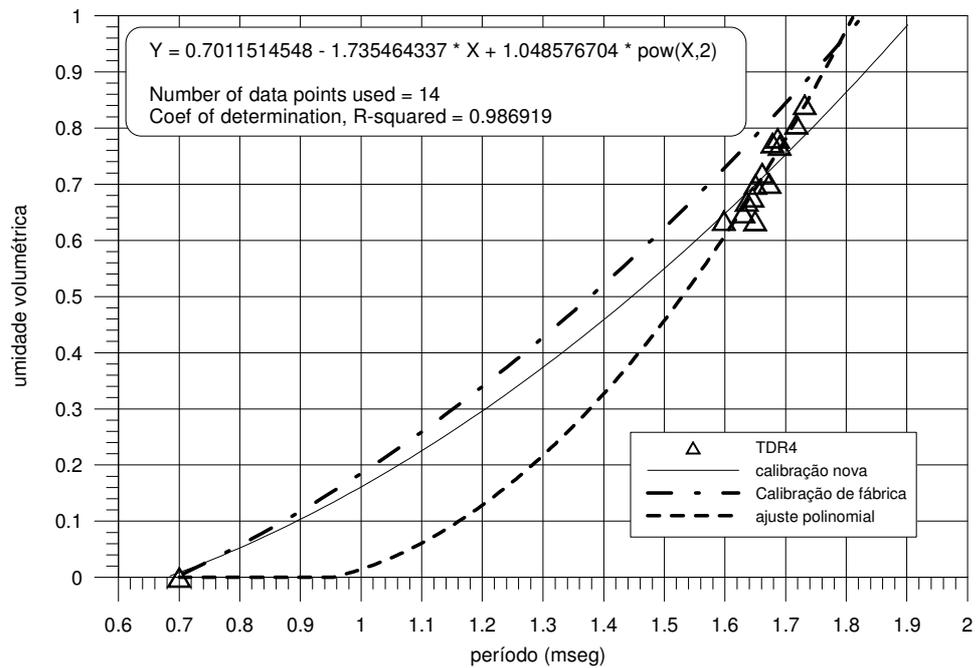
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.24: Nova calibração dos TDR's (a) TDR1, (b) TDR2, (c) TDR3 e (d) TDR4

### 3.5.3.2. Sensor de Sucção

O sensor utilizado para medida de sucção foi de bloco poroso de gesso do tipo elétrico, modelo 227 Delmhorst da Campbell Scientific ® (Figura 3.25). Sua dimensão aproximada é de 2,3 mm de diâmetro e 3 cm de altura. Ele indica com razoável acurácia o déficit de água para os valores compreendidos entre 0 e 10 bar (0 e 1000 kPa). As informações fornecidas por este sensor são obtidas através da sua conexão com o “datalogger” CR10X, também da Campbell.

O bloco cilíndrico é composto de um molde de gesso ao redor de dois eletrodos concêntricos que confina o fluxo para o interior do bloco. O gesso localizado entre o eletrodo e o solo cria uma defesa contra sais que podem afetar a condutividade elétrica. O sensor possui capacitores no cabo que bloqueiam o fluxo direto do mesmo para o “datalogger”. A diferença de potencial entre o “datalogger” e o sensor pode causar uma rápida deterioração do sensor.

Os blocos de gesso duram tipicamente entre um e dois anos. Solos salinos ou ácidos tendem a degradar o bloco, diminuindo a sua longevidade. Para maximizar a sua vida útil é recomendado que no inverno ele seja retirado do campo porque, se ele for deixado em profundidade nesta estação, depois ele pode estar sujeito a uma ação química do solo. As medidas são afetadas pela salinidade do solo, incluindo sais fertilizantes.

É recomendado que os blocos passem por dois ciclos de umedecimento e secagem antes de serem instalados. Para cada ciclo o bloco deve ser imerso na água por uma hora e deixado secar.

O local de instalação é muito importante, pois o sensor mede o que ele “vê”. Evitar depressões onde a água empoçará depois de uma chuva e proximidade com mudanças de inclinação é apropriado.



Figura 3.25: Sensor que mede a sucção

### 3.5.3.3. Sensor de Temperatura

A medida de temperatura foi realizada por um sensor termistor, modelo 107 da Campbell Scientific ® (Figura 3.26). O cabo utilizado apresenta condicionador de sinais. O equipamento opera na faixa de  $-5^{\circ}$  a  $+95^{\circ}\text{C}$ , com acurácia tipicamente menor que  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . O elemento possui invólucro de alumínio em revestimento epóxi branco. Este sensor foi desenvolvido para medir a temperatura do ar, do solo e da água. Na maioria das suas aplicações, a calibração não é necessária.



Figura 3.26: Sensor de temperatura

### 3.5.4. Registrador de Dados (“Datalogger”)

Para obter os dados necessários provenientes dos sensores do solo, foi adquirido um coletor de dados CR10X, um painel de conexões, um módulo de alimentação, uma bateria, um painel solar e uma caixa protetora dos equipamentos (Figuras 3.27 e 3.28). Com este conjunto era possível coletar informações de algumas variáveis que influenciam o estudo do processo de ressecamento. A frequência de registro definida foi de 15 em 15 minutos e uma média diária às 24:00 horas. A varredura dos dados ocorre de 10 em 10 segundos. Com este intervalo estabelecido, o coletor tinha uma capacidade máxima de armazenar os dados de 13 dias.



Figura 3.27: Registrador de dados – “Datalogger”



Figura 3.28: Painel solar e a caixa protetora

### **3.5.5. Medidor de Recalque**

Para se ter a informação de recalque foram instalados dois medidores: uma régua e uma trena. A régua era de madeira, pintada e graduada de 10 em 10 centímetros até 1,5 metros. Esta régua foi instalada, aproximadamente, no centro da área teste e sua dimensão era adequada para que se pudesse visualizá-la da passarela construída (Figura 3.29). Para se ter uma maior precisão instalou-se, também, uma trena de 2 metros em um dos apoios da passarela. Esta trena foi fixada no apoio de madeira mais próximo da escada da passarela para facilitar a leitura.



Figura 3.29: Régua graduada para medir o recalque

### 3.5.6. Piezômetro

Foram instalados dois piezômetros do tipo Casagrande para se determinar a medida do nível de água na camada de rejeito arenoso que constitui a base da área teste (Figura 3.30). Eles são constituídos por tubos de PVC de 25 mm de diâmetro, de 3,98 m de altura, onde 0,50 m de cada tubo foi perfurado e coberto com Bidim OP40 para a constituição da célula do piezômetro.



Figura 3.30: Vista dos dois piezômetros instalados

### **3.5.7. Tanque de Evaporação**

Construiu-se um tanque de evaporação com as dimensões similares a de um tanque classe A dos estudos hidrológicos. Este era de ferro com 122 cm de diâmetro e 25,4 cm de altura (Figura 3.31). Construiu-se um tablado de madeira para sustentação e nivelamento do tanque. Ele foi instalado em um dos diques de areia que circundam a área teste e preenchido com água limpa até uma altura de 19 cm.



Figura 3.31: Tanque de evaporação

### 3.5.8. Tensiômetro

Os tensiômetros utilizados foram de mercúrio e construídos especialmente para o local. Eles eram constituídos por um tubo de PVC de 13 mm de diâmetro externo, tendo na extremidade inferior, uma cápsula de cerâmica, e na superior, uma tampa de borracha. Abaixo do topo, 5 cm, foi feita uma conexão por uma mangueira transparente de 3 mm de diâmetro a um recipiente com mercúrio (aproximadamente 20 ml). Este recipiente é fixo em um suporte de madeira e a transparência da mangueira é para verificar a presença de bolhas de ar. O tubo era suficientemente longo para que o elemento ficasse acima da superfície do solo (Figura 3.32).

A referência para a montagem do tensiômetro e a cápsula cerâmica utilizada, já sob medida para esta finalidade, foram indicações de um estudo realizado anteriormente (Santos, 2001) e a Figura 3.33 ilustra o esquema de montagem.

À medida que o solo seca, o tensiômetro fornece água, aumentando a sucção parcial, dentro do conjunto, que se lê no manômetro. Um funcionamento adequado do aparelho requer continuidade hidráulica desde a membrana porosa até o manômetro. A presença de ar no equipamento pode diminuir a sua eficiência e por isso foi utilizada

água deaerada. O desnível entre a conexão da mangueira e o nível de mercúrio era de 2 cm.



Figura 3.32: Instalação do tensiômetro na base de areia

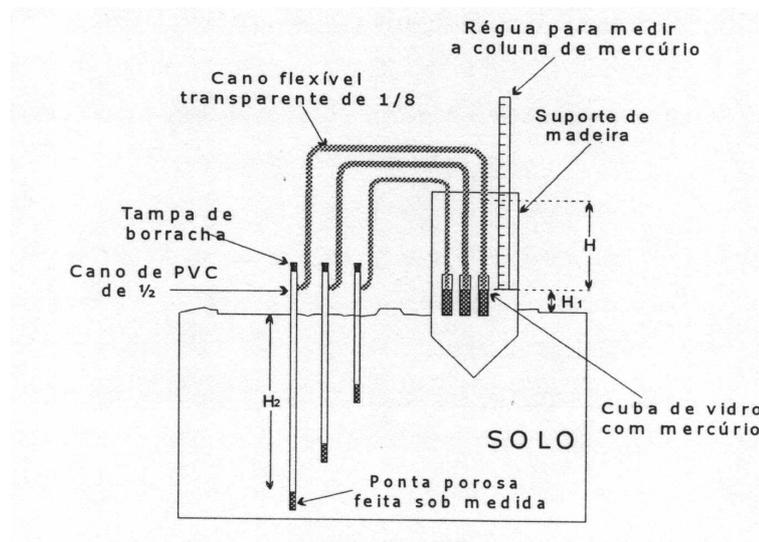


Figura 3.33: Esquema do tensiômetro de mercúrio

### 3.6. Montagem da Instrumentação da Área Teste

Na área teste foram instalados os instrumentos necessários para a obtenção de dados referentes ao processo de secagem (Figura 3.34). O mastro com a estação meteorológica está em frente à escada da passarela, os sensores em um dos lados da passarela e os tensiômetros do outro. Inicialmente, instalou-se somente um tensiômetro na base de areia. Os piezômetros foram instalados um de cada lado da passarela. A régua graduada encontrava-se em frente à escada e a trena fixada em um dos apoios da passarela.

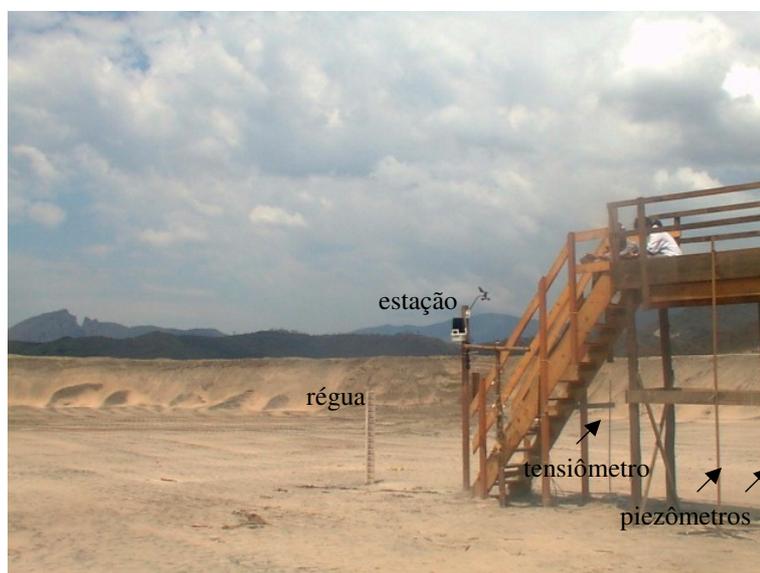


Figura 3.34: Instrumentos instalados antes do enchimento da área teste

Para a montagem da estação meteorológica contou-se com a participação de dois professores da área de Hidrologia da Universidade Federal de Ouro Preto, que manifestaram interesse em conhecer o equipamento e auxiliaram para a escolha do melhor local e a altura necessária para a instalação. A estação foi instalada a 2 m da suposta superfície prevista de lama e em um local onde se tinha o mínimo de influência que pudessem mascarar ou alterar os dados.

Utilizou-se a régua graduada de madeira e a trena metálica de 1,5 e 2,0 m de altura, respectivamente, para a verificação da altura de lama e água durante o bombeamento e para o acompanhamento da evaporação e recalque durante o processo de secagem.

Os dois piezômetros do tipo Casagrande, um de 3,98 m e outro de 3,975 m de altura, foram cravados às profundidades de 0,72 e 0,715 m, respectivamente.

Durante dois dias o técnico da empresa que forneceu os sensores e o “datalogger” esteve dando assistência para a montagem do equipamento. Após todas as conexões feitas e testadas, iniciou-se o bombeamento para a área teste que até então se encontrava vazia.

Os sensores de sucção, ou seja, os blocos de gesso foram saturados antes de serem utilizados. Eles ficavam imersos em água durante 24 horas e então, estavam prontos para serem lançados na lama (Figura 3.35).



Figura 3.35: Saturação do sensor de sucção

No 13<sup>o</sup> dia de bombeamento a lama atingiu uma altura de 57,40 cm e o primeiro conjunto de sensores foi lançado. Chama-se de conjunto um sensor de sucção, um de temperatura e um de umidade (TDR). Os TDR's foram lançados na posição horizontal.

No 19<sup>o</sup> dia, com uma altura de 70 cm o segundo conjunto foi liberado (Figura 3.36). No 22<sup>o</sup> dia, com uma altura de 81 cm, o terceiro conjunto foi liberado, e no 34<sup>o</sup> dia, com uma altura de 106 cm, o quarto conjunto foi lançado. Após a instalação de todos sensores bombeou-se lama para a área teste até uma altura de 134 cm (Figura 3.37). Na Figura 3.38, se encontra o gráfico curva de enchimento da área teste.

Os TDRs foram lançados em posições contrárias para se ter a distância mínima entre eles recomendada no manual evitando assim, interferências.

O termo lançamento de sensores empregado aqui significa que os sensores ficaram imersos na massa de solo, com liberdade de acompanhar os recalques da camada e provavelmente sem movimento relativo em relação ao solo circundante. Assim, os sensores não ocuparam posições fixas. A única exceção foram os tensiômetros cuja altura de instalação foi mantida fixa ao longo do processo de secagem.

Instalaram-se os outros dois tensiômetros na lama com a cápsula de cerâmica no local onde se queria medir a sucção. A altura de instalação está apresentada no Capítulo 4. A cápsula de cerâmica foi saturada antes de ser utilizada (Figura 3.39).

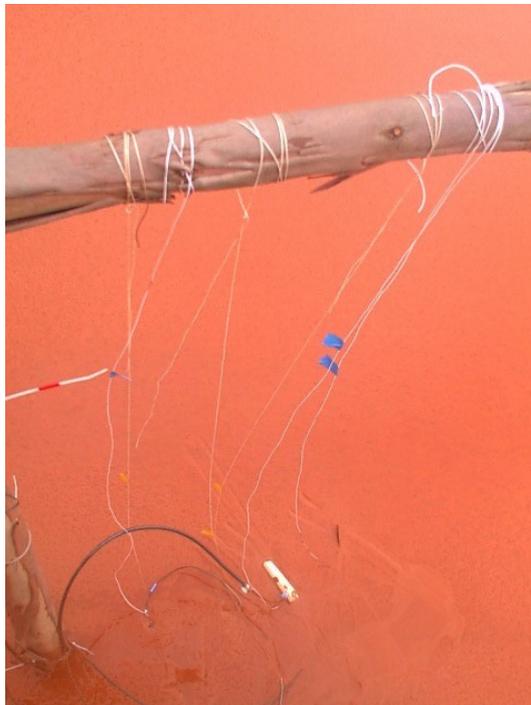


Figura 3.36: Lançamento dos sensores



Figura 3.37: Término do bombeamento

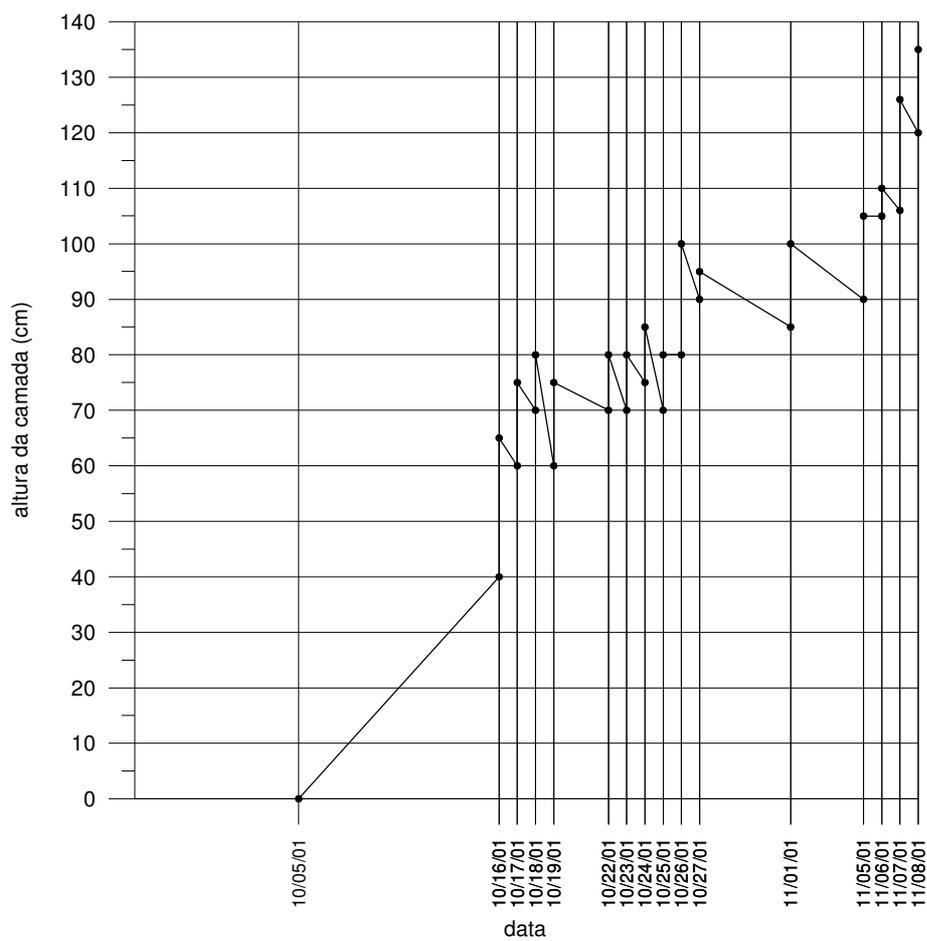


Figura 3.38: Curva de enchimento da área teste



Figura 3.39: Vista do tensiômetro da base após o enchimento da área teste

Após alguns dias de ressecamento instalou-se o tanque de evaporação para que a evaporação potencial pudesse ser verificada.

### **3.7. Coleta de Dados**

#### **3.7.1. Amostras da Área Teste**

Para coletar as amostras da área teste foram necessários dois tipos de amostradores: uma para fase onde a lama estava mais líquida (amostrador de caneco) e outro para a fase mais consistente (amostrador de pistão). Teve-se, então, que montar um amostrador de caneco (Figura 3.40). Só foi possível coletar amostras na primeira fase duas vezes, pois a consistência da lama estava aumentando consideravelmente e o caneco já não mais era apropriado para o serviço. Estas amostras foram coletadas na região próxima ao local de instalação dos sensores.

Os resultados das amostras coletas estão apresentados no Capítulo 4 e se referem aos dias 21/11/2001 e 6/12/2001.

Por esse motivo, passou-se a utilizar o amostrador de pistão de 8,2 cm de diâmetro e 36,8 cm de altura, do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto. A descrição completa deste instrumento é dada em Gomes e Oliveira Filho (1999). As primeiras amostras com o pistão foram coletadas após um dia de ressecamento, ou seja, após um dia em que a água superficial foi totalmente removida e a superfície da lama ficou exposta às condições atmosféricas.

A coleta era feita a partir da passarela, pois não se tinha suporte para coletar diretamente no solo. Cada amostragem era feita em um local diferente, pois o local onde se retirava o material ficava deformado e a próxima amostra poderia fornecer informações alteradas. Utilizou-se um área de 5,0x1,5 m próximo ao local de instalação dos sensores somente para coleta de amostras.

As amostras, depois de extrudadas e feitas as medidas para o cálculo da densidade, eram levadas, todas em sacos plásticos bem fechados, para o laboratório da SAMARCO. Lá, procedia-se com o ensaio de teor de umidade gravimétrica. Com os resultados, tinha-se o perfil de umidade e densidade de cada amostragem.



Figura 3.40: Amostrador de caneco

### **3.7.2. Dados da Estação Meteorológica**

Os dados da estação meteorológica podiam ser visualizados instantaneamente através do “console” que se encontrava na área teste ou através do software específico fornecido pela Davis Instruments.

As informações da estação eram armazenadas em um “datalogger” que se encontrava conectado ao “console”. Para se obter os dados em arquivos eletrônicos era necessário descarregar o “datalogger” em um “notebook” e então trabalhá-los.

Todos os dados importantes para o trabalho podiam ser coletados através do “notebook” exceto as informações de evaporação. A versão atualizada do software ainda não era comercializada, logo estes dados eram coletados manualmente através do “console”.

Em uma ocasião do período de monitoramento, a continuidade da coleta dos dados foi comprometida devido à reposição da bateria do console. Porém, as informações foram suficientes para manter a qualidade deste trabalho.

### **3.7.3. Dados dos Sensores**

As informações dos sensores eram obtidas conectando-se um “notebook” ao “datalogger” e descarregando este último. Os dados fornecidos eram os seguintes:

- Ano;
- Dia;
- Hora;
- Temperatura, sucção e umidade média no intervalo de 15 minutos;
- Sucção e umidade máxima no intervalo de 15 minutos;
- Sucção e umidade mínima no intervalo de 15 minutos;
- Sucção e umidade referente àquela hora (pontual);
- Média diária da temperatura, sucção e umidade média no intervalo de 15 minutos;
- Média diária da sucção e umidade máxima no intervalo de 15 minutos;
- Média diária da sucção e umidade mínima no intervalo de 15 minutos;

Os dados eram então tratados numa planilha Excel e utilizados para as análises pertinentes.

#### **3.7.4. Dados do Recalque**

Os dados do recalque eram obtidos visualmente, fazendo-se a leitura da régua e da trena. As informações da trena, por estar mais acessível, foram as efetivamente utilizadas.

#### **3.7.5. Dados dos Piezômetros**

Os dados dos piezômetros são obtidos através da leitura do nível da água no tubo de PVC. Para isto, utiliza-se um fio graduado com um pio elétrico na extremidade que será inserida no tubo. Desce-se o fio até encontrar a água, quando o pio emite um som e então é medida a profundidade do nível de água tendo como referência a boca do tubo.

#### **3.7.6. Dados do Tanque de Evaporação**

As informações obtidas no tanque referem-se à evaporação potencial. Para tanto, foram marcados quatro pontos equidistantes na borda circular do mesmo e as leituras do nível de água eram obtidas nesses pontos com a utilização de um paquímetro.

#### **3.7.7 – Dados dos Tensiômetros**

O procedimento para a leitura da sucção no solo através dos tensiômetros era como o seguinte:

- Tirava-se a tampa do tubo de PVC e completava-o com água deaerada e tampava-o novamente;
- Com o uso de uma seringa, injetava-se água deaerada no tubo através da tampa, até que a mangueira que conectava o tubo ao manômetro ficasse completamente preenchida e sem bolhas de ar;

- Com a mangueira ainda sangrando, mergulhava-o no recipiente contendo mercúrio;
- Aguardava-se um tempo até que a coluna de mercúrio dentro da mangueira estabilizasse;
- Media-se a altura que o mercúrio atingiu na mangueira tendo como leitura zero o nível de mercúrio no recipiente;

Adotou-se o mesmo procedimento para os três tensiômetros (Figura 3.41).

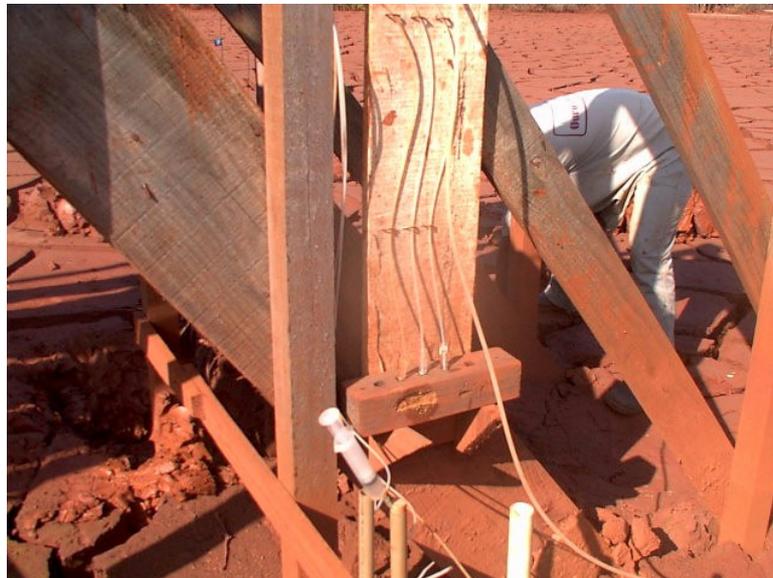


Figura 3.41: Sistema de leitura dos tensiômetros

### 3.7.8. Observações das Trincas

Com o processo de ressecamento ocorrendo, foram escolhidas duas trincas primárias no estágio inicial, aleatoriamente, para que sua evolução fosse observada. As medidas de largura e profundidade eram obtidas diretamente com o uso de uma trena. Colocou-se uma segunda escada na passarela para se ter um melhor acesso a essas

trincas. Procurava-se fazer essas medidas em torno do mesmo ponto da trinca (Figura 3.42).

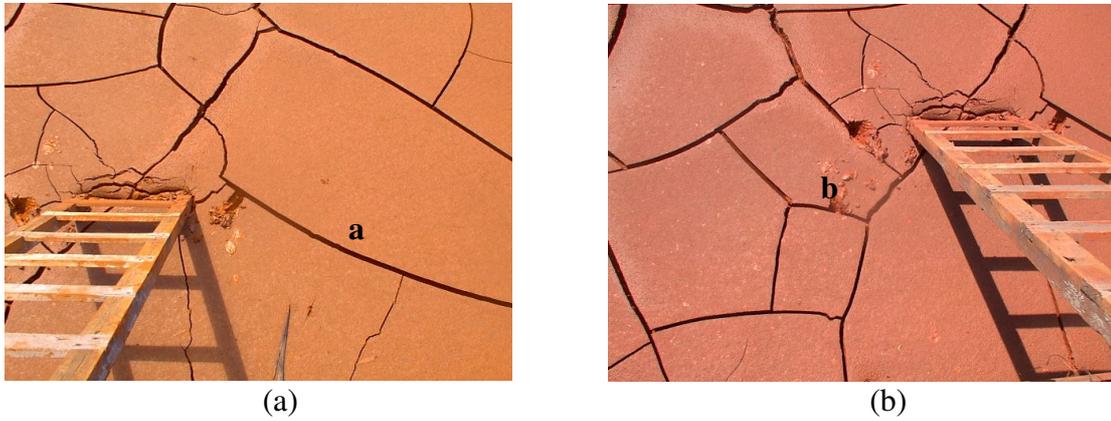


Figura 3.42: (a) Trinca *a* e (b) Trinca *b*

Está apresentado, a seguir, a seqüência de fotos mostrando a evolução da abertura de algumas outras trincas tomadas aleatoriamente (Figura 3.43).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.43: Evolução das aberturas de outras trincas, (a) 30/03/2002, (b) 02/04/2002, (c) 4/04/2002 e (d) 16/04/2002

Fica evidente o processo de morfologia das trincas descrito na revisão bibliográfica do Capítulo 2, como o surgimento inicial das trincas primárias, depois as secundárias, o encontro das mesmas à  $90^0$  e a formação de polígonos, na maioria quadrangulares.

### 3.8. Retirada dos Sensores

Os sensores foram retirados no dia 24 de junho de 2002 e as suas respectivas alturas na camada foram registradas. Na posição onde os TDR's eram encontrados, foram coletadas amostras e assim, obteve-se, também, os dados referentes à umidade e à densidade dos grãos naqueles locais.

### **3.9. Cronograma dos Eventos**

Esta seção apresenta um cronograma que dá uma idéia geral de quando ocorreu cada evento relativo ao trabalho experimental. O Quadro 3.1 lista nos respectivos tempos as várias operações realizadas.

Os principais eventos ocorreram no ano de 2002. No Capítulo 4, os dias desse ano são apresentados como tempo corrido e por isso, o cronograma relaciona o mês com o tempo corrido naquele período.



ATIVIDADES	2001						2002						
							1 a 31	32 a 59	60 a 90	91 a 120	121 a 151	152 a 181	182 a 212
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
Construção da Área Teste	■												
Ensaio de Laboratório (Amostra Reduzida e Contração)		■	■	■									
Implantação do Arranjo Experimental (Posições da Passarela e do Vertedouro, Piezômetros, Régua, Estação Meteorológica e Tensiometro)			■										
Instalação Conjunto de Sensores													
1º Conjunto													
2º Conjunto													
3º Conjunto													
4º Conjunto													
Bombeamento de Lama para o Enchimento da Área Teste				■	■								
Adensamento/Preparação						■	■	■	■	■	■	■	■
Ressecamento									■	■	■	■	■
Retirada dos Sensores												■	
Calibração dos Sensores												■	■

Quadro 3.1: Cronograma de eventos

## ***CAPÍTULO 4***

---

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Como citado no capítulo 2, o processo de ressecamento acontece sob dois estágios. Um unidimensional, quando ocorre a contração vertical, e outro tridimensional, quando ocorre a contração lateral. Ainda, a evaporação também apresenta dois estágios. O primeiro deles ocorre quando o processo é controlado pelas condições meteorológicas e o segundo, quando as condições do solo é que dominam o processo. Logo, na tentativa de conhecer o comportamento de todas as variáveis necessárias para se estudar o fenômeno do ressecamento, as informações tratadas nesta seção se referem às variáveis do solo e às variáveis relacionadas às condições de contorno. Neste capítulo, serão apresentados todos estes dados e as análises dos resultados.

#### **4.1. Variáveis do solo**

As variáveis do solo medidas foram as seguintes: contração, recalque, temperatura, umidade volumétrica, umidade gravimétrica, evolução das trincas, densidade natural e densidade dos grãos. Para se obter os perfis de temperatura e umidade volumétrica com o tempo, foram instalados 8 sensores a 4 profundidades diferentes como mencionado no Capítulo 3.

##### **4.1.1. Contração**

A partir da curva de contração determinou-se o limite de contração (LC) da lama através da interseção das duas tangentes conforme apresentado na Figura 4.1. Esta curva é muito importante para o trabalho, pois ela diz claramente até quando se tem redução de volume. Este dado é essencial quando o enfoque é o maior aproveitamento possível de uma área útil em termos de armazenamento de rejeitos.

Quando o solo atinge o LC não ocorrem mais variações de índices de vazios, embora o material continue perdendo água. O trecho linear indica que o solo está

saturado e que toda perda de água corresponde a uma perda igual de volume total. Percebe-se que a fase de contração residual é muito pequena ou reduzida. No trecho de contração nula o solo está se dessaturando.

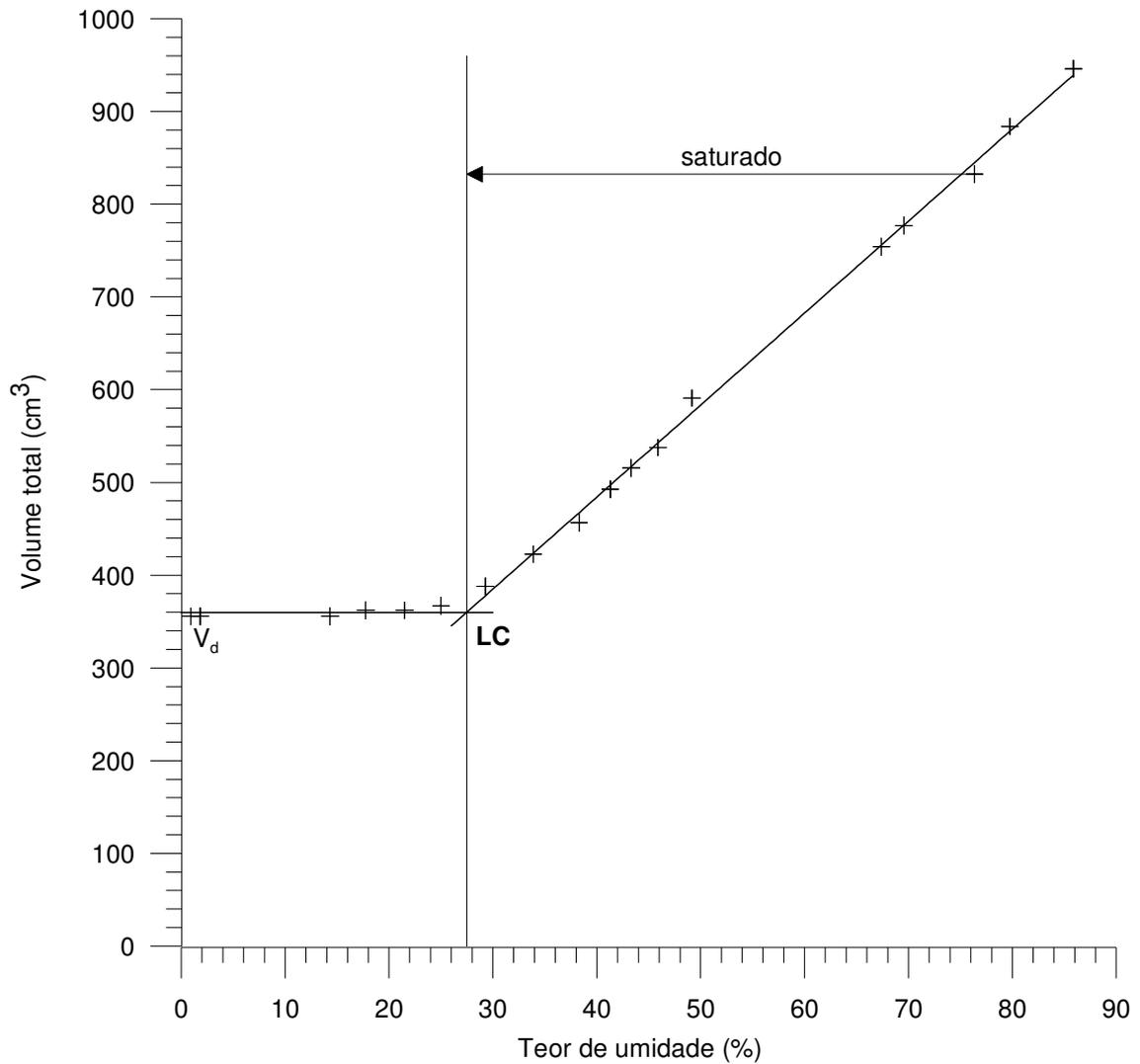


Figura 4.1: Curva de contração

#### 4.1.2. Recalque

Análises preliminares indicam que o processo de adensamento é relativamente rápido (dias). Como se passaram 4 meses entre o término do enchimento e o início do ressecamento, todo adensamento por peso próprio e devido a percolação já ocorreu (observar cronograma de eventos no Quadro 3.1 do Capítulo 3). Logo, os fenômenos de adensamento e ressecamento estão separados.

O recalque por adensamento (peso próprio + percolação), após o enchimento completo da área teste, foi de 26 cm, conforme indicado na Figura 4.2. Na verdade, este não é o recalque total, pois parte dele já estava ocorrendo durante o enchimento. Como o enchimento foi escalonado no tempo, quando se atingiu a altura desejada, quase todo adensamento já havia ocorrido.

No período de ressecamento, partiu-se de uma altura da camada de lama de 108 cm. Após 2 meses tinha-se uma altura de 92 cm. Logo, em um período de 61 dias obteve-se um recalque vertical de 16 cm. Observou-se uma diminuição contínua da altura da camada, indicando uma irreversibilidade do processo mesmo considerando-se que houveram períodos de chuvas.

Nota-se, no entanto, que a taxa de recalque não é constante, podendo-se identificar duas pendentes distintas na curva de recalque, sendo o ponto de inflexão por volta do dia 115. Assim, observa-se uma taxa mais elevada inicialmente e depois uma taxa mais baixa.

O término do recalque acontece de forma gradativa e não abrupta, em oposição à curva de contração (Figura 4.1).

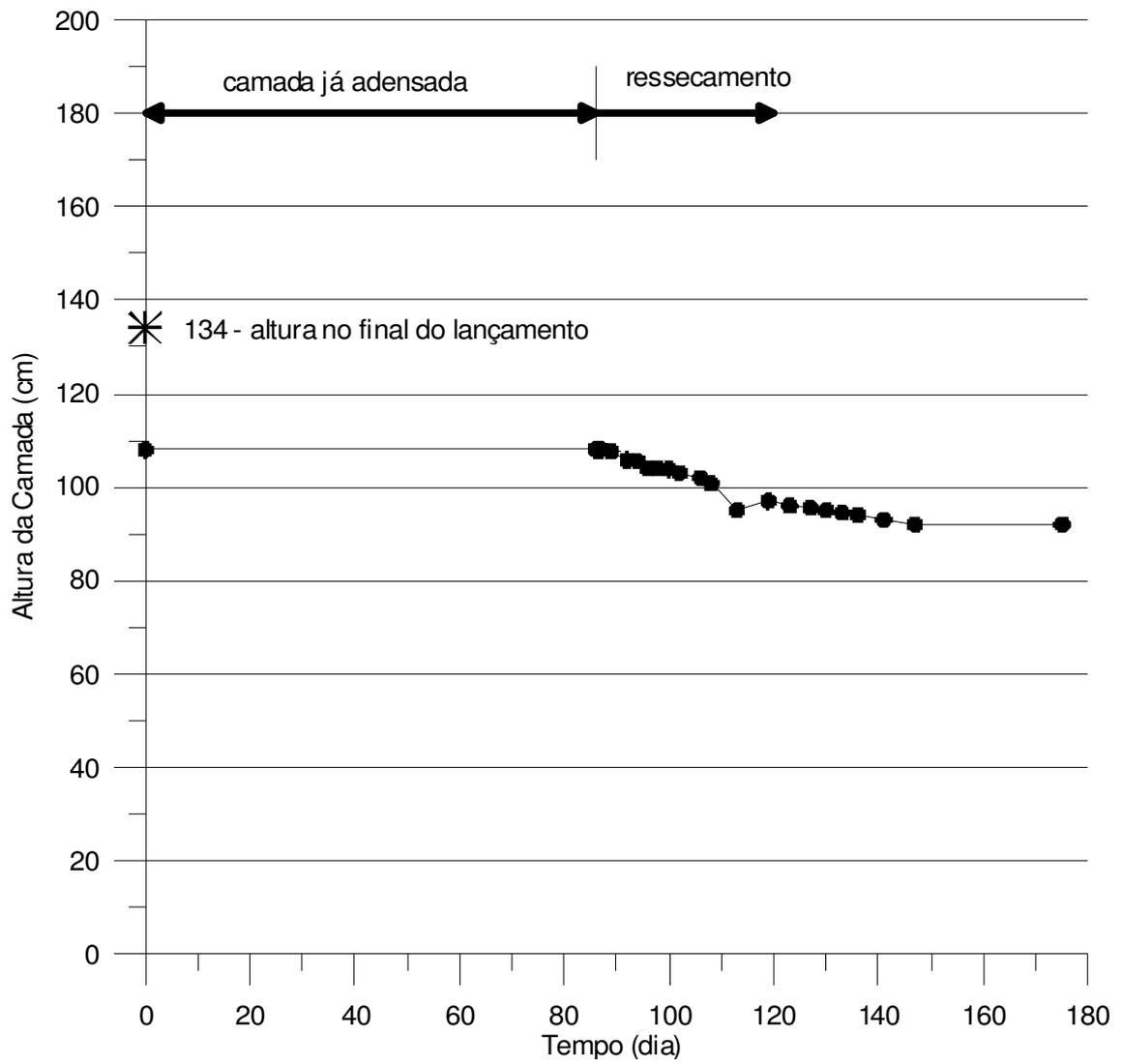


Figura 4.2: Variação da altura da camada devido aos processos de adensamento e ressecamento (recalque)

### 4.1.3. Temperatura

Os dados de temperatura do solo mostrados na Figura 4.3 indicam em termos gerais, uma variação da temperatura média no solo em função da variação sazonal da temperatura ambiente. Assim, nos meses mais quentes tem-se uma temperatura média de 25<sup>0</sup>C que decresce gradativamente nos meses frios até chegar aos 16<sup>0</sup>C. O fato de se ter uma cobertura com água na superfície antes do ressecamento e depois não, pode também ter influenciado os resultados. A variação da temperatura do solo é muito pequena se comparada com a variação da temperatura ambiente a ser mostrada adiante. O sensor mais superficial é mais influenciado pela meteorologia cuja variação é grande. O gradiente térmico entre o sensor mais profundo e o mais superficial é variável, mas não passa de 4<sup>0</sup>C/m dentro do período de ressecamento.

Nas primeiras leituras, os dados obtidos indicaram que a temperatura é maior quanto mais próximo da superfície. Esta situação permaneceu durante alguns dias e um pouco antes de iniciar o ressecamento o quadro já era outro. Os sensores mais profundos indicavam temperaturas maiores. Isto ocorreu até o final do processo. No início, havia uma variação entre as leituras. Dada a secagem, a variação ocorreu somente entre o sensor superior e os demais. Os três sensores mais profundos estavam com os valores de temperatura muito próximos. Esta variação voltou a ocorrer no final do processo onde ela foi mais acentuada. No geral, a tendência foi diminuir o valor da temperatura com tempo.

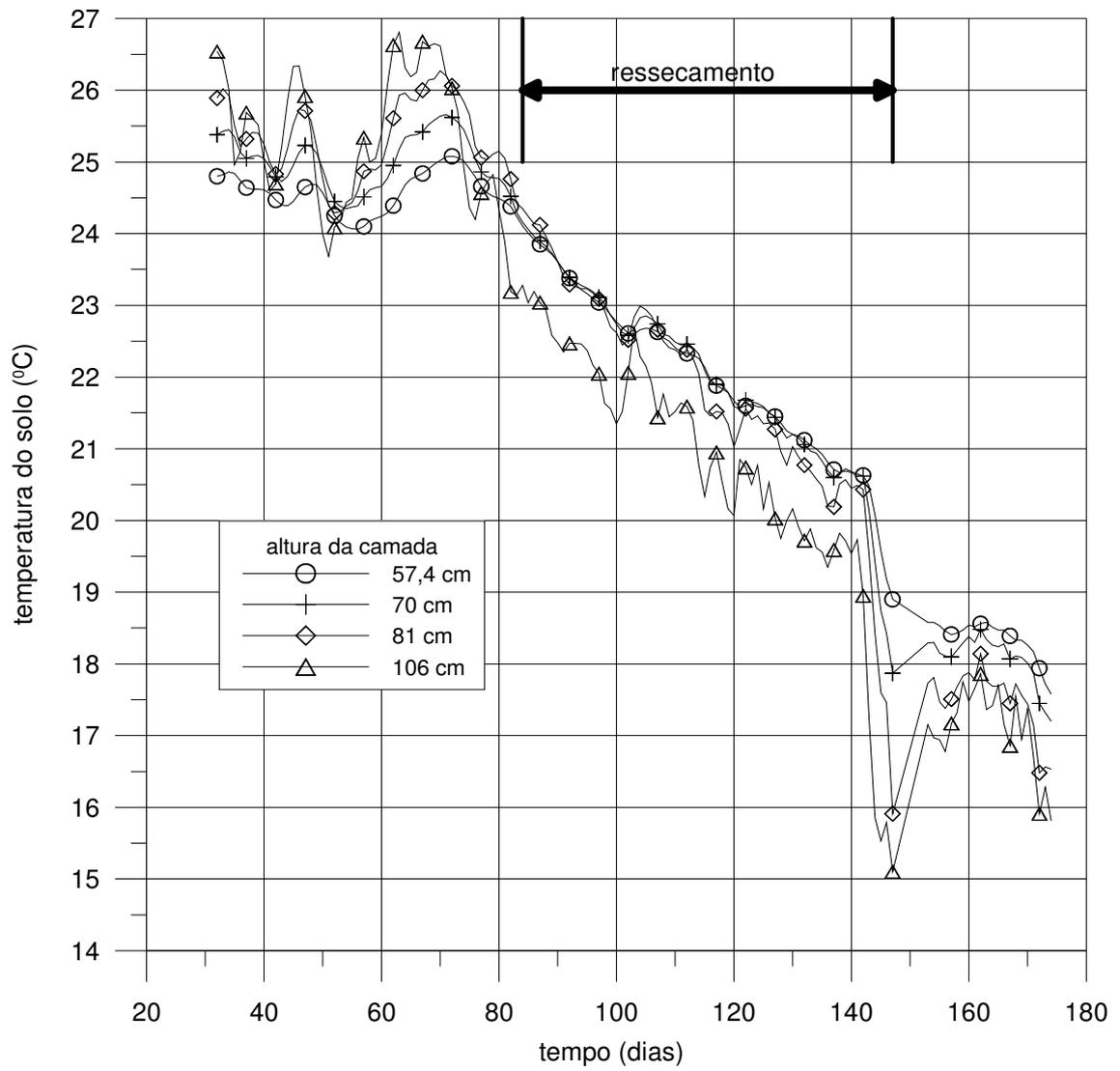


Figura 4.3: Temperatura do solo

#### 4.1.4. Umidade volumétrica

A evolução do perfil de umidade volumétrica ( $\theta$ ) com o tempo deduzido com a técnica do TDR é mostrada na Figura 4.4. No geral, a tendência do teor de umidade volumétrica foi diminuir com o tempo no período de ressecamento. Enquanto havia uma camada superficial de água na área, pode-se considerar que a umidade não teve variações representativas. Com o início do ressecamento, nota-se que a camada superior imediatamente teve uma redução da umidade enquanto as outras ainda levaram um certo tempo para que essa diminuição fosse percebida.

Os sensores foram dispostos de maneira que o último conjunto lançado sempre ficava do lado oposto do anterior. Como já mencionado no Capítulo 3, cada conjunto foi lançado em uma altura diferente e em lados alternados para atender a distância mínima evitando assim, interferências entre os sensores.

Devido à disposição dos instrumentos, obteve-se dois perfis diferentes. Um perfil referente aos sensores de altura nominal 106 e 70 cm e o outro de 81 e 57,4 cm.

O TDR mais superficial é o primeiro a perceber o ressecamento. Depois, vem o TDR2 (81 cm), o que mostra consistência em termos de resposta dos sensores ao início do processo de ressecamento.

No início, os dados mostram que há uma variação maior de  $\theta$ . Há uma certa homogeneização desses valores no final do processo. As simulações mostram mesmo uma tendência de uniformização de  $\theta$  na etapa final.

Na Figura 4.5, as variações em cada horizonte são distintas e parecem indicar dois perfis distintos. As observações deste gráfico são similares com as do anterior.

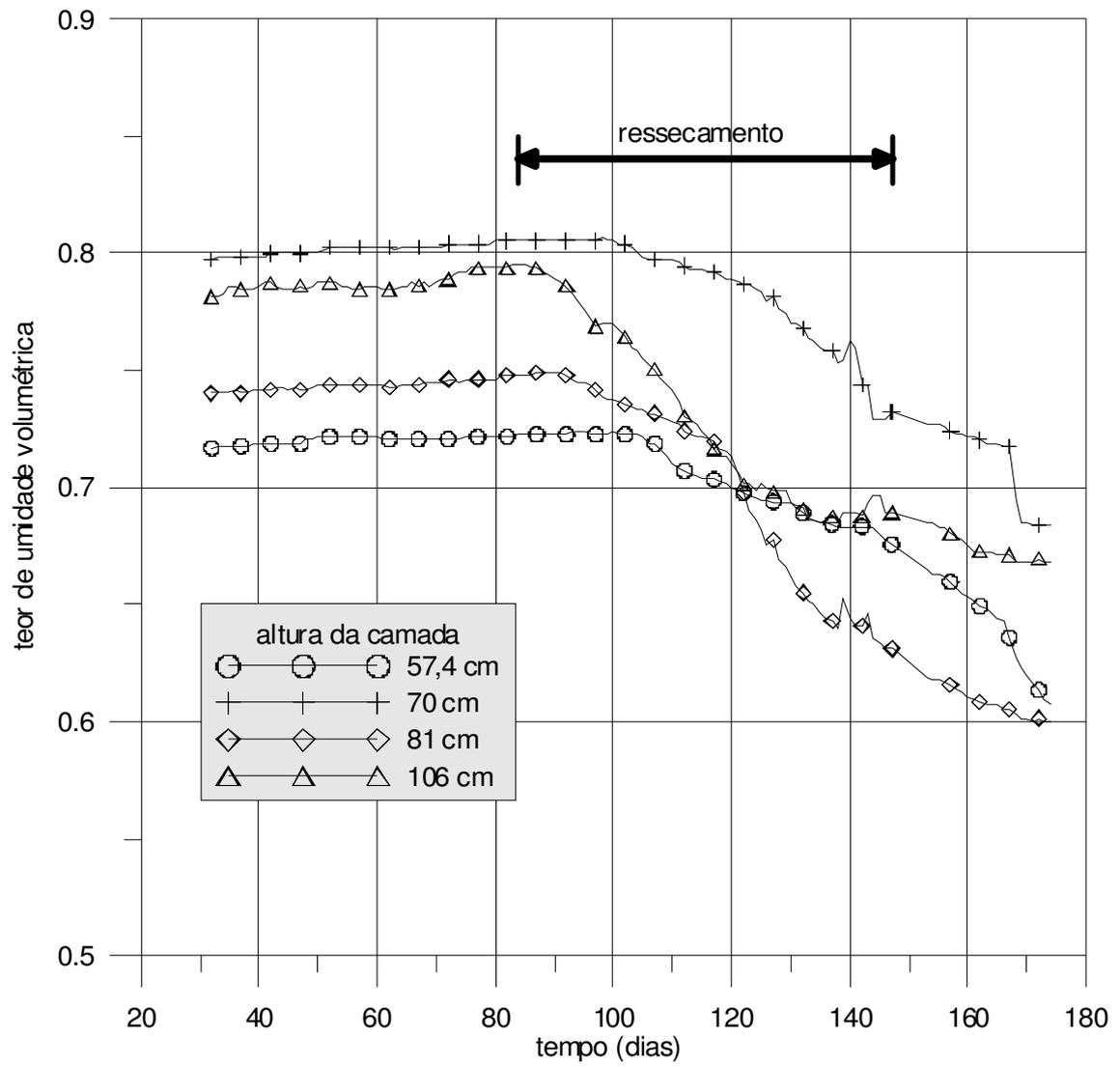


Figura 4.4: Perfil de evolução do teor de umidade volumétrica com o tempo

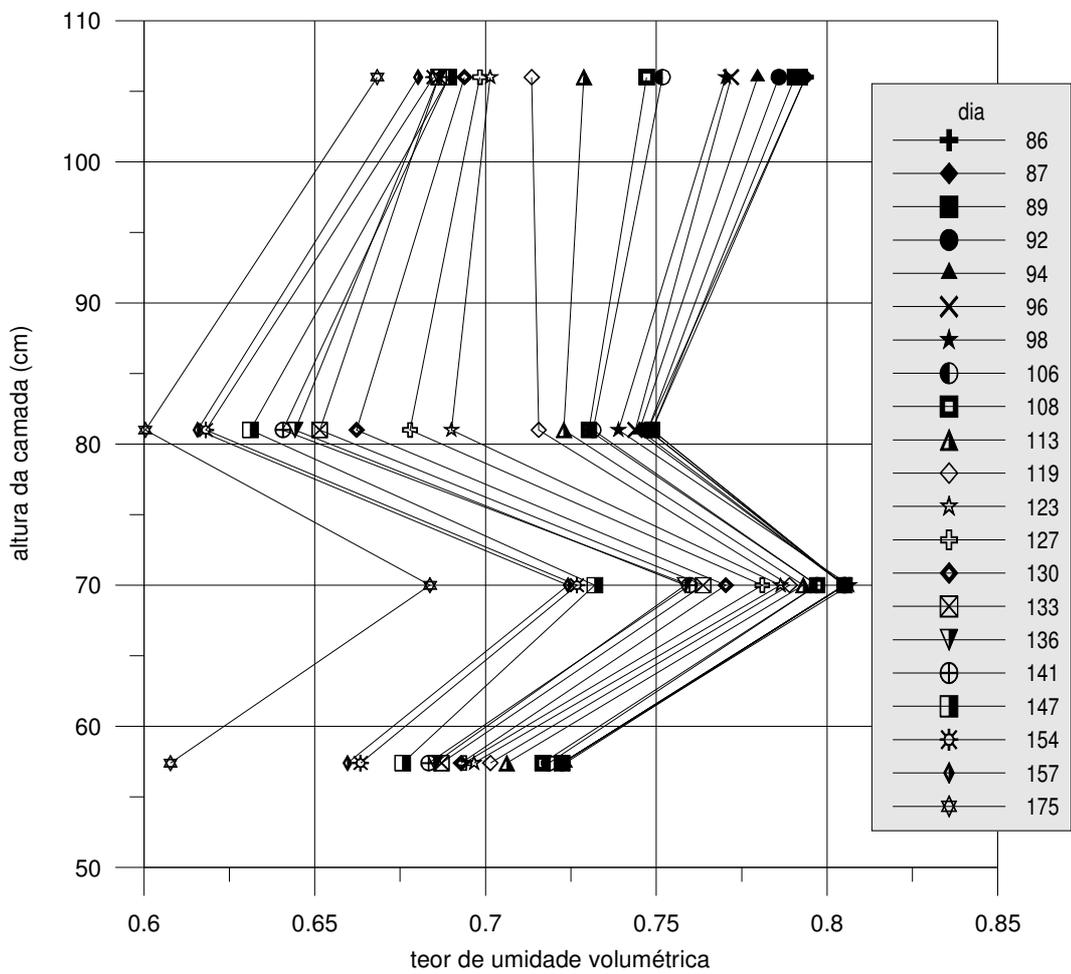


Figura 4.5: Evolução do teor de umidade volumétrica por camada

#### **4.1.5. Umidade gravimétrica**

Os dados de umidade gravimétrica obtidos a partir de sondagens com o amostrador de pistão são apresentadas a seguir na Figura 4.6

A Figura 4.6 apresenta a evolução do perfil. O perfil mostra claramente a tendência de redução do teor de umidade com o tempo. Tem-se no início do processo uma umidade da ordem de 70% e após transcorrido o período de observações chegou-se a um valor da ordem de 30%, próximo do limite de contração LC, 27,5%.

Há uma tendência das leituras de umidade na base serem significativamente menores que o restante do perfil, provavelmente influenciada pela base drenante. Essa tendência diminui no final do processo. A leitura inicial (86), infelizmente, não consegue retratar uma provável variação significativa da umidade nos primeiros centímetro mais superficiais conforme esperado pelas análises já que a amostragem foi muito espessa.

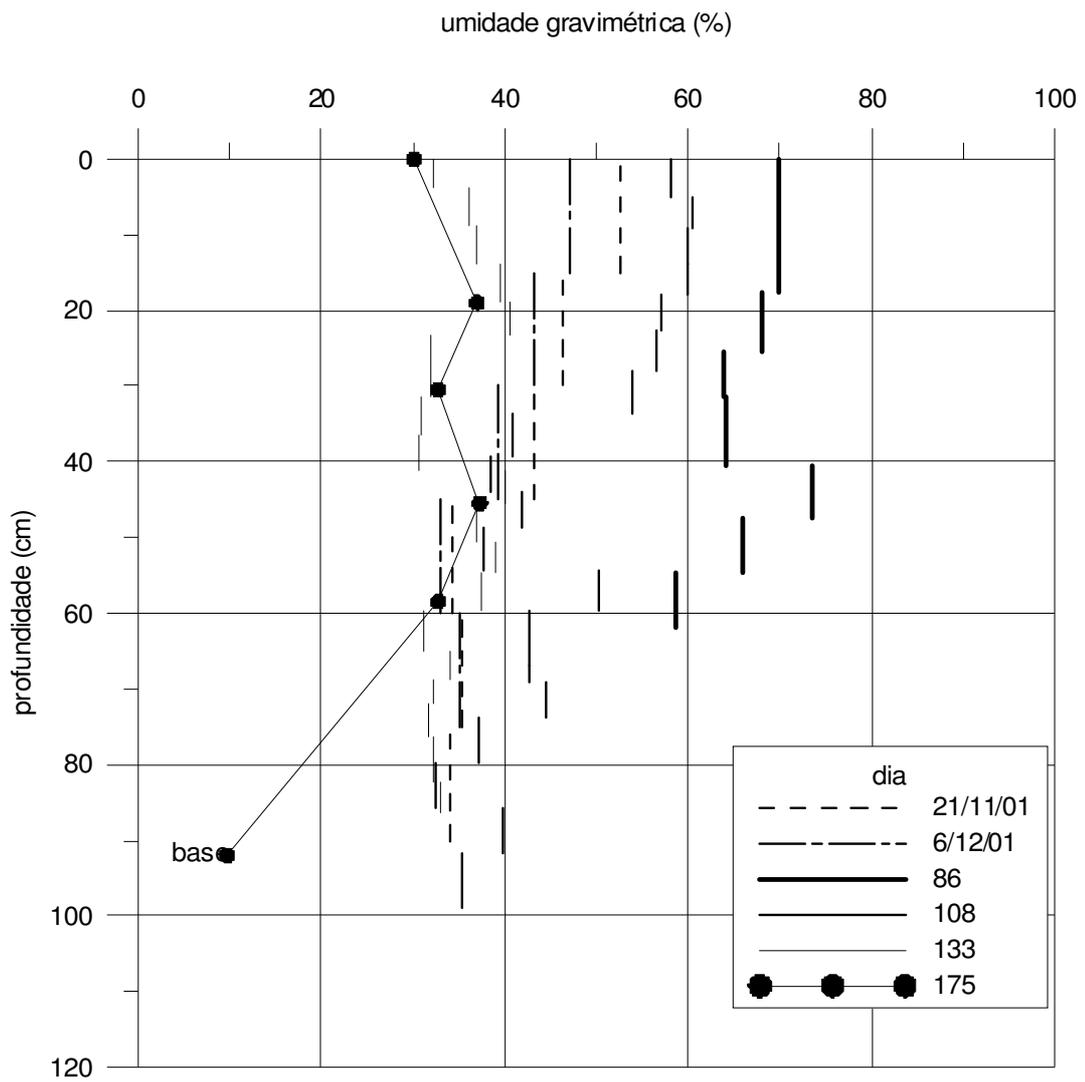


Figura 4.6: Perfil do teor de umidade gravimétrica

#### 4.1.6. Densidade Natural

A Figura 4.7 mostra a evolução do perfil de densidade da lama. Verifica-se claramente um aumento das densidades com o tempo. Tem-se, no início do processo, densidades no horizonte superficial da ordem de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  que chegam ao final com valores de  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Em profundidade, observam-se densidades ligeiramente superiores. Percebe-se também, uma uniformização das densidades maiores no final do processo.

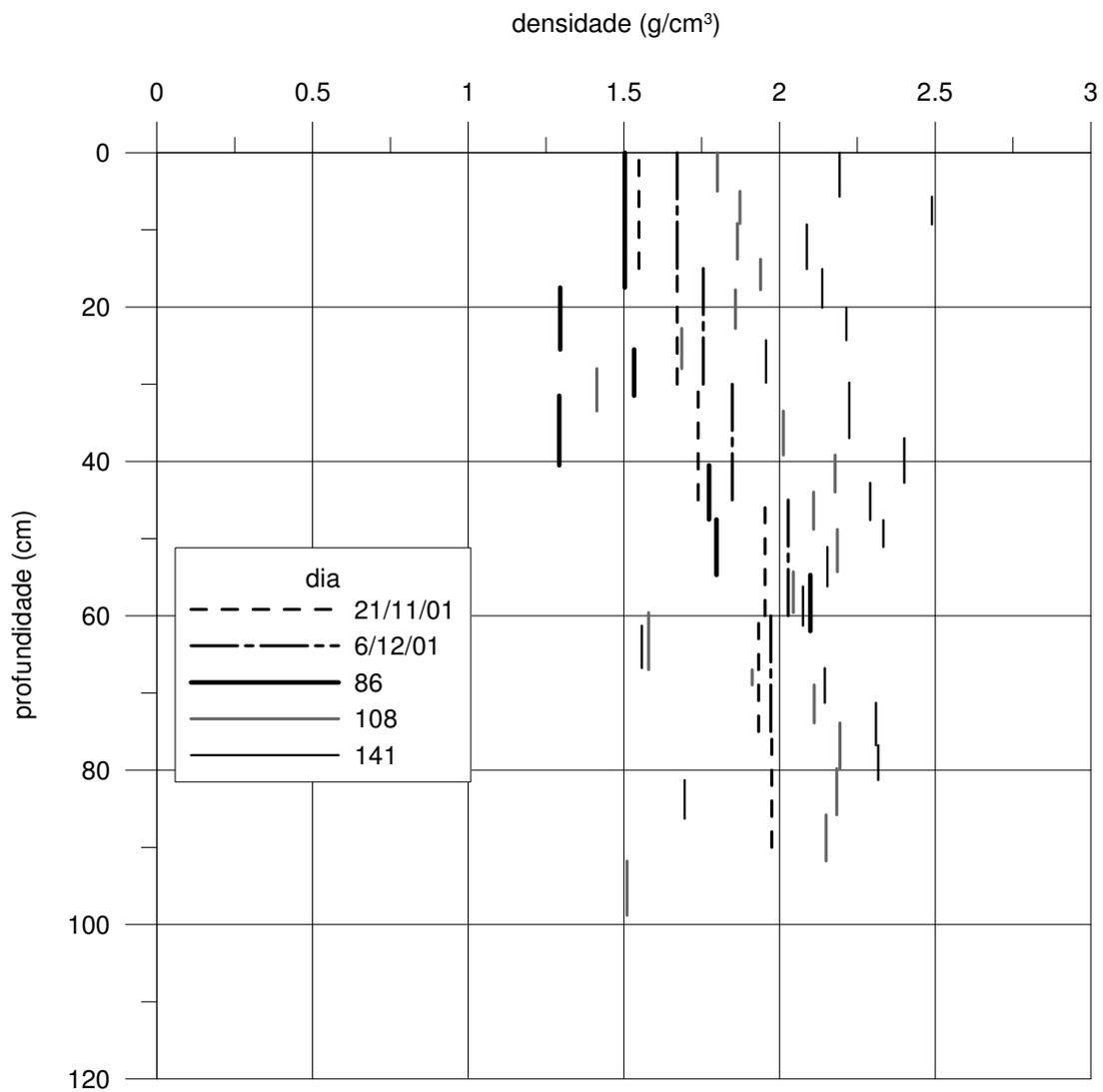


Figura 4.7: Perfil de densidade natural

#### 4.1.7. Densidade Real dos Grãos

A Figura 4.8 apresenta o resultado obtido com relação à densidade dos grãos de algumas amostras durante o processo de ressecamento. Os dados mostram muito pouca dispersão ao longo do perfil indicando um valor médio de 3,9 para a densidade dos grãos da lama. Este valor é diferente do relatado no Capítulo 3 devido ao fato da lama estudada neste trabalho ser mais antiga e, portanto, com um teor de ferro mais alto.

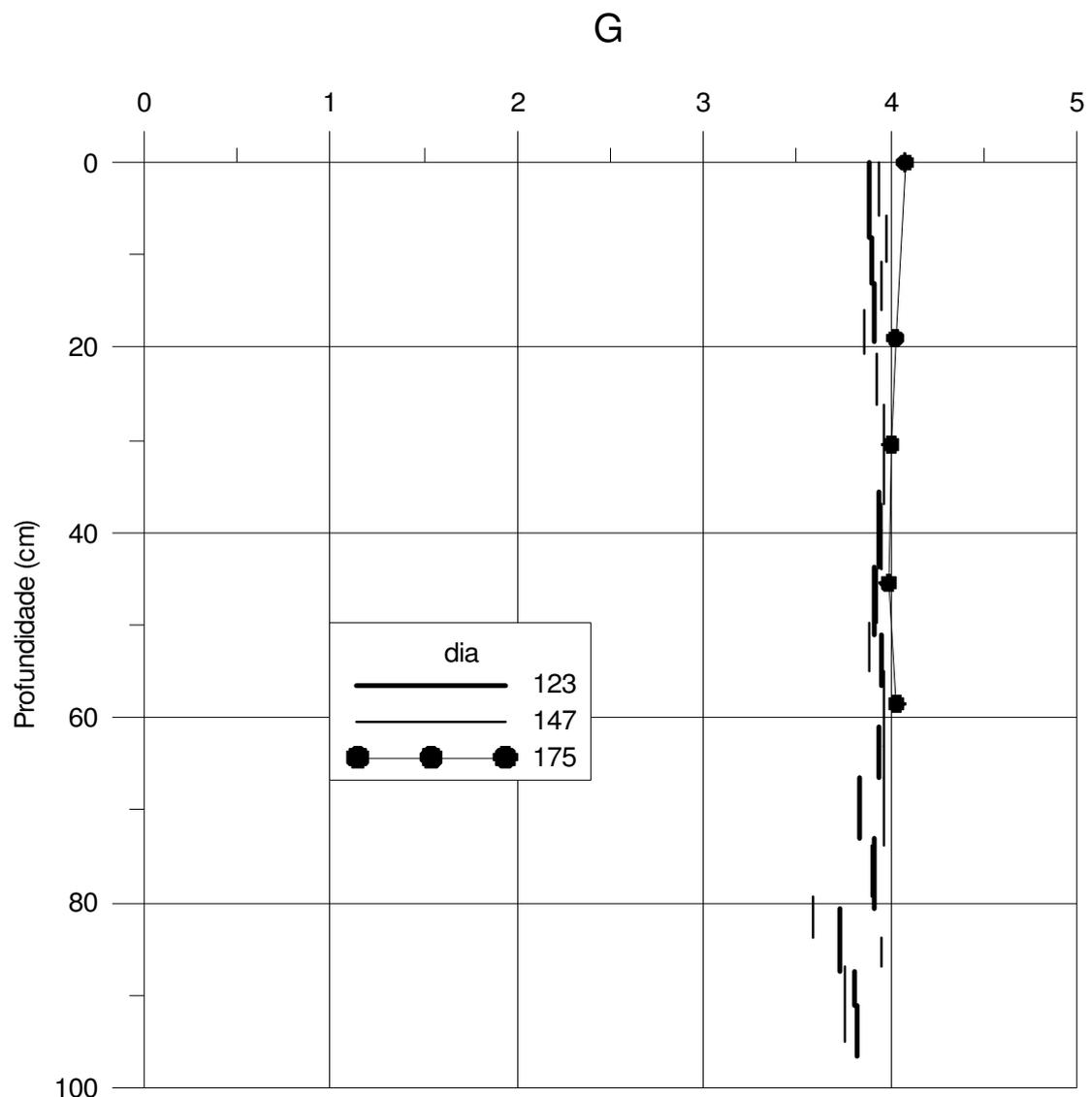


Figura 4.8: Densidade real dos grãos

#### 4.1.8. Trincas

Este item do trabalho sintetiza as observações sobre a formação e evolução das trincas, em resposta principalmente às condições climáticas que serão mostradas na próxima etapa. Após 1 dia, observou-se o aparecimento de trincas. Isto não significa que esse é o tempo real de surgimento das mesmas, pois essas descontinuidades do material podem estar fechadas conforme já se discutiu na revisão bibliográfica do Capítulo 2.

Duas trincas foram observadas a partir do terceiro dia de secagem. Essas trincas, do tipo primárias, foram denominadas de  $a$  e  $b$ . Estudando a Figura 4.9, percebe-se que a abertura das trincas  $a$  e  $b$  aumenta continuamente, indicando o processo de contração, e sem reversibilidade, e que a  $a$  evoluiu mais o que a  $b$  porém, sem grandes diferenças.

As taxas de abertura com o tempo são mais elevadas no início, variação essa quase linear, e depois se reduzem gradativamente.

A Figura 4.10 apresenta a relação entre a abertura e a profundidade das trincas  $a$  e  $b$  além de outras trincas tomadas aleatoriamente na área teste. As trincas aleatórias foram observadas em um único dia (175) com o processo de ressecamento em um estágio bem avançado. Há uma certa semelhança no comportamento do material para ambos conjuntos de dados, observando-se um certo “descolamento” no gráfico quando se passa de um conjunto para o outro.

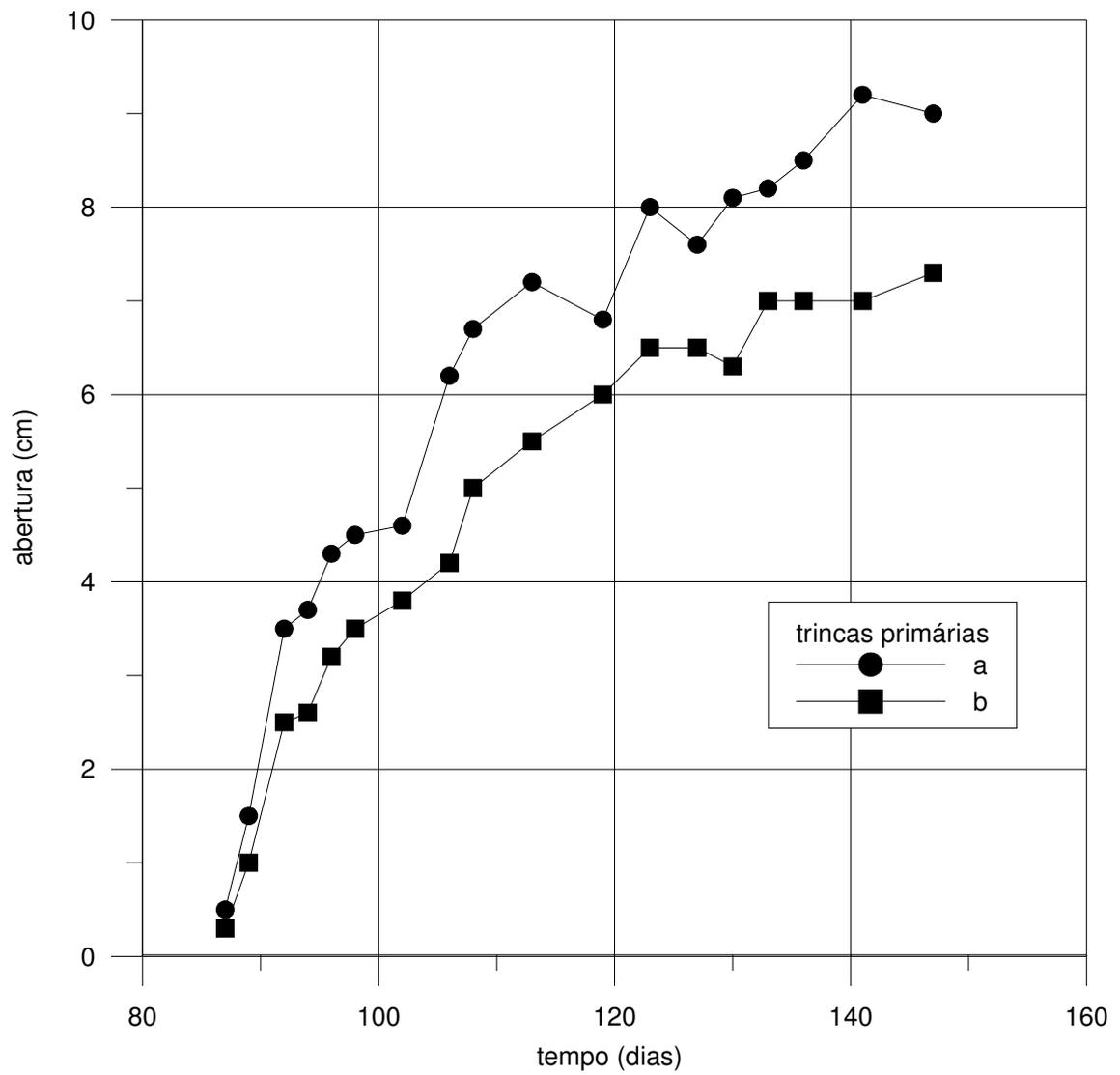


Figura 4.9: Evolução das trincas *a* e *b*

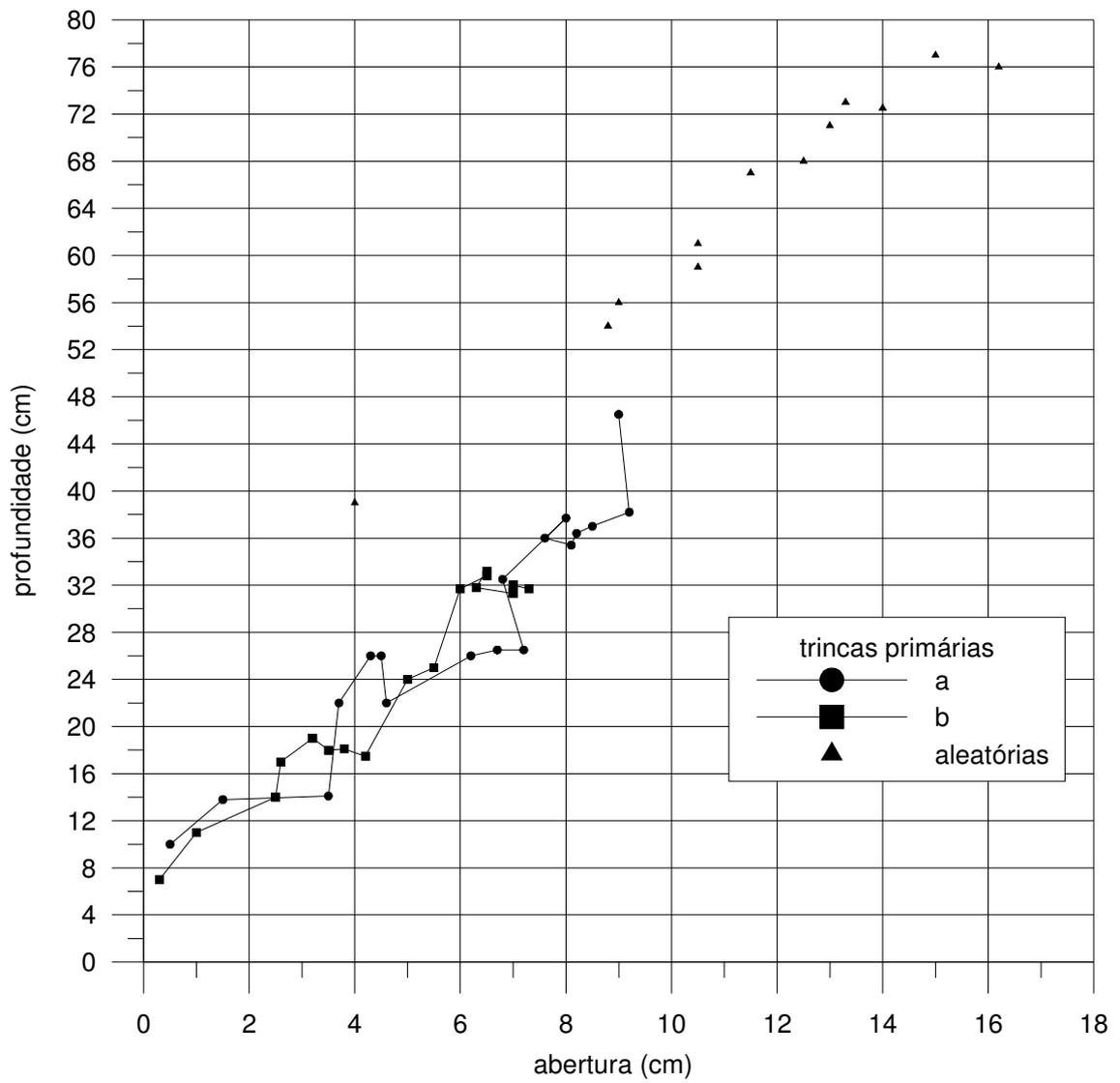


Figura 4.10: Relação abertura versus profundidade das trincas

Seguem as Figuras 4.11 até 4.17 com algumas fotos das trincas *a* e *b* nas mesmas datas em que foram lidas a abertura e a profundidade das mesmas.



Figura 4.11: Trincas *a* e *b* no dia 92



Figura 4.12: (a)Trinca *a* no dia 94 e (b)Trinca *b* no dia 94



(a)

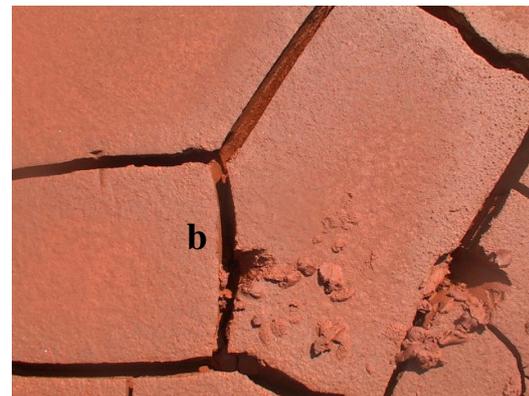


(b)

Figura 4.13: (a)Trinca *a* no dia 96 e (b)Trinca *b* no dia 96



(a)

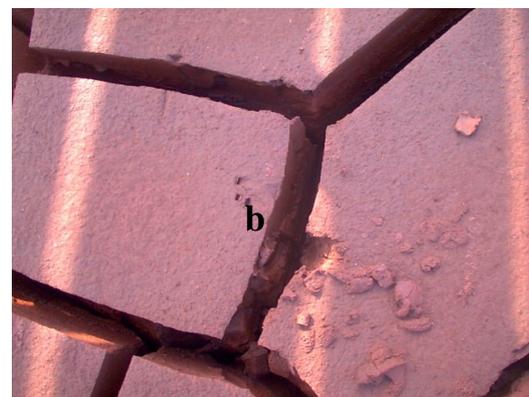


(b)

Figura 4.14: (a)Trinca *a* no dia 102 e (b)Trinca *b* no dia 102

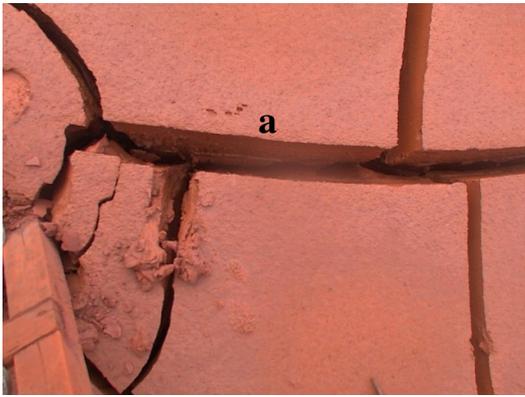


(a)

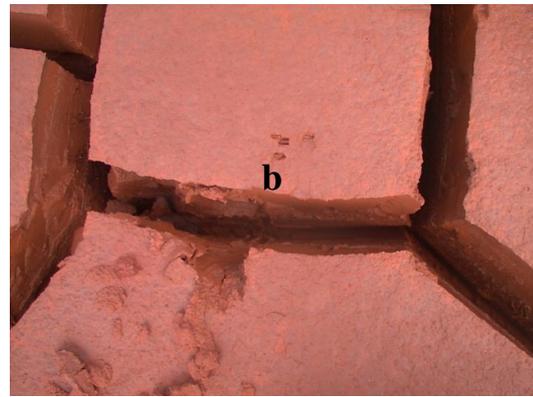


(b)

Figura 4.15: (a)Trinca *a* no dia 113 e (b)Trinca *b* no dia 113



(a)

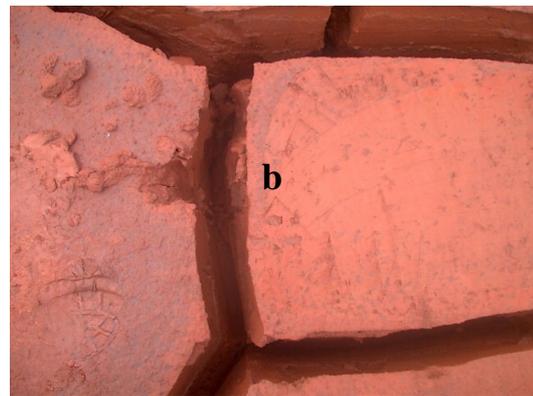


(b)

Figura 4.16: (a)Trinca *a* no dia 127 e (b)Trinca *b* no dia 127



(a)



(b)

Figura 4.17: (a)Trinca *a* no dia 136 e (b)Trinca *b* no dia 136

## **4.2. Variáveis das condições de contorno**

Esta seção apresenta os resultados das variáveis que controlam as condições de contorno envolvidas no processo de ressecamento. Esses dados referem-se à evaporação, resultado das condições meteorológicas e a poropressão na base, resultado da condição de drenagem. Essas informações são fundamentais para a interpretação de alguns comportamentos ocorridos durante o fenômeno.

### **4.2.1. Dados Meteorológicos**

As características climáticas foram automaticamente adquiridas através da estação meteorológica descrita no Capítulo 3. Todos estes dados foram adquiridos antes, durante e após o processo de secagem. É importante comentar que os valores abaixo citados são as médias diárias.

#### **4.2.1.1. Temperatura Ambiente**

Pode-se dizer, ao estudar a Figura 4.18, que durante o período do ressecamento a temperatura variou entre 22,4 e 14<sup>0</sup>C. Uma variação relativamente pequena. Esses valores médios são ligeiramente inferiores aos valores medidos no interior do solo (Figura 4.3).

#### **4.2.1.2. Velocidade do Vento e Umidade Relativa do Ar**

O comportamento dessas duas variáveis está apresentado nas Figuras 4.19 e 4.20. A velocidade do vento durante o período de ressecamento variou de 0,4 e 0,2 m/s em média. Já os valores de umidade variaram entre 83,5 e 100 %.

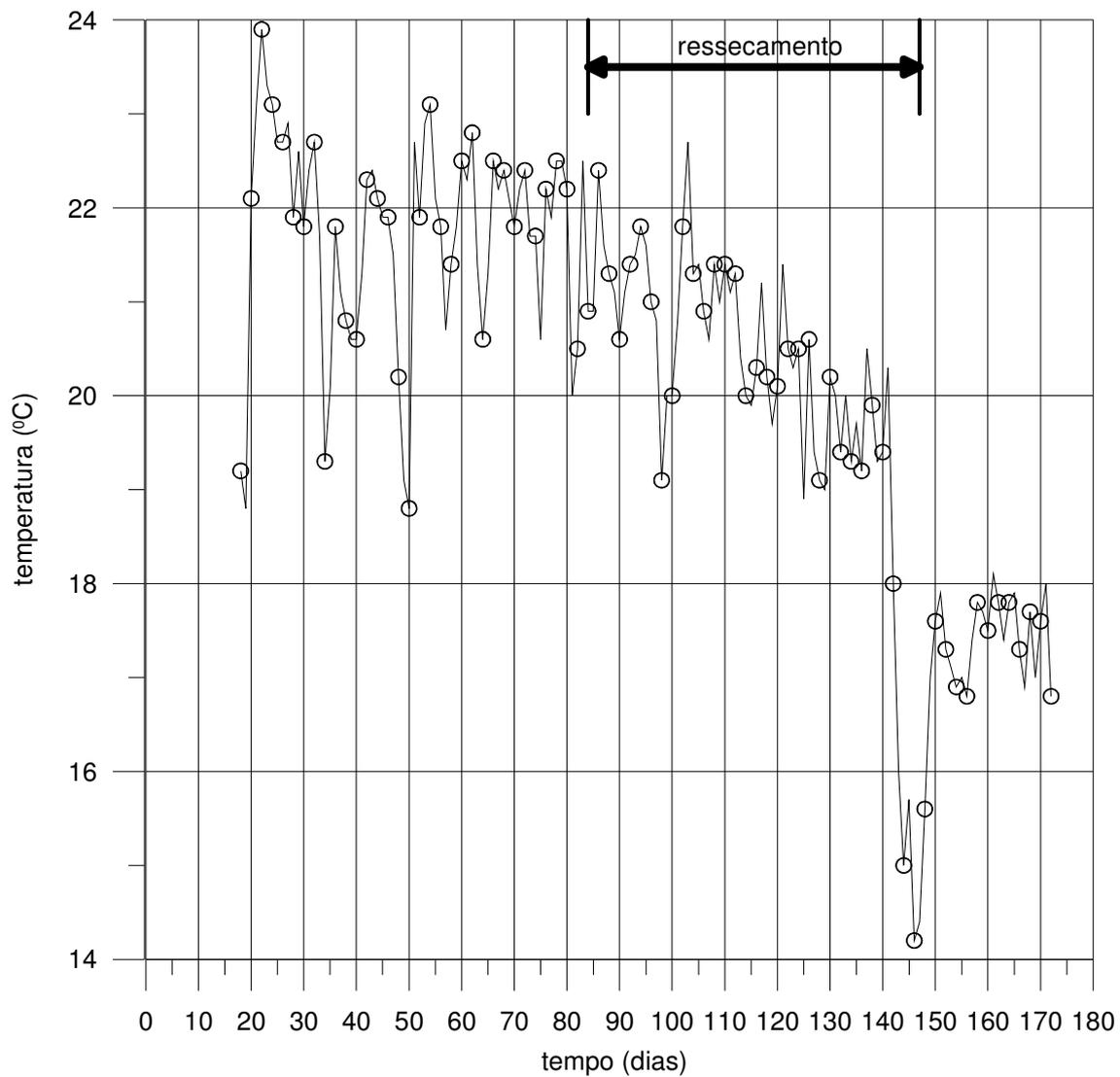


Figura 4.18: Temperatura ambiente

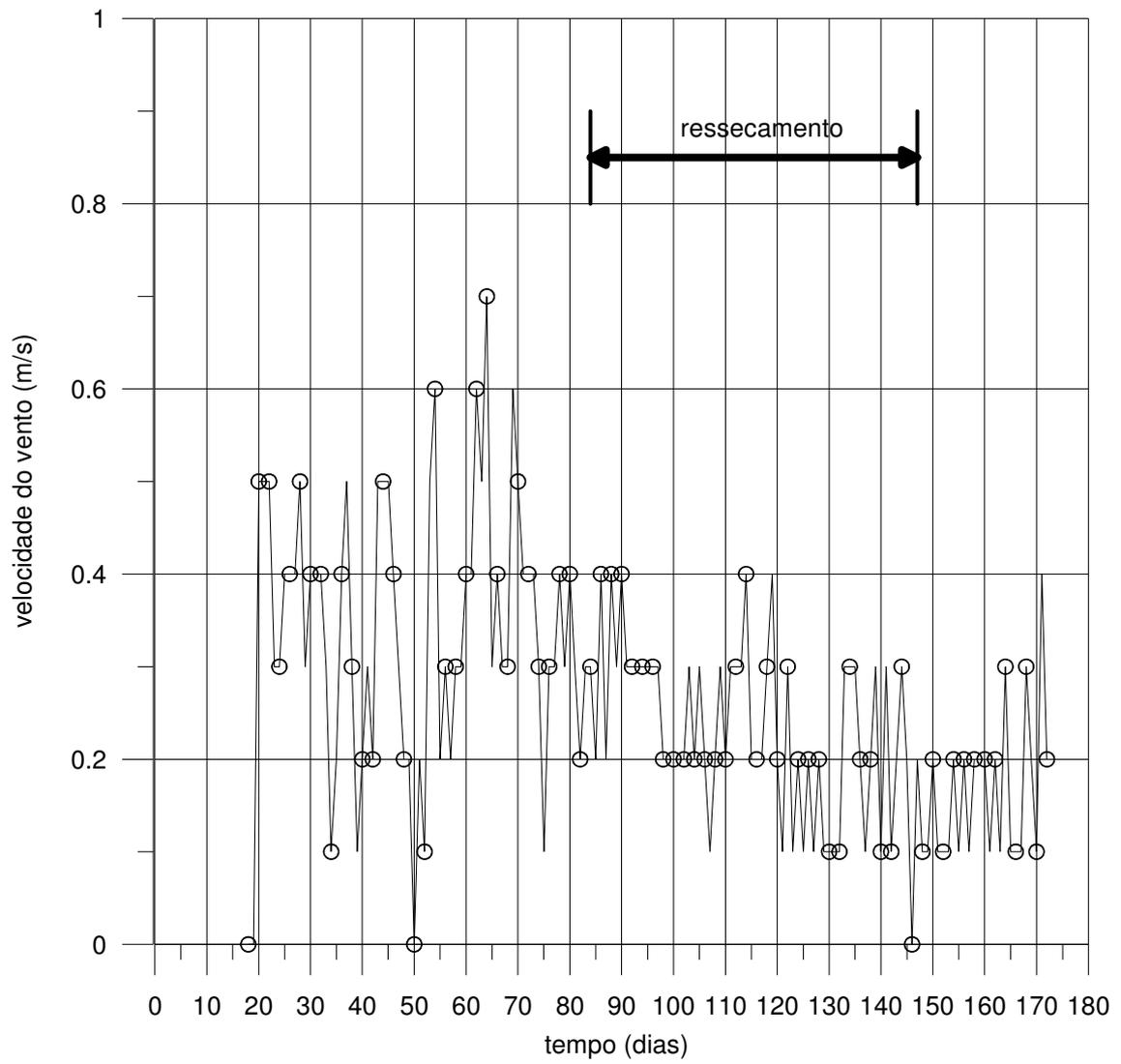


Figura 4.19: Velocidade do vento

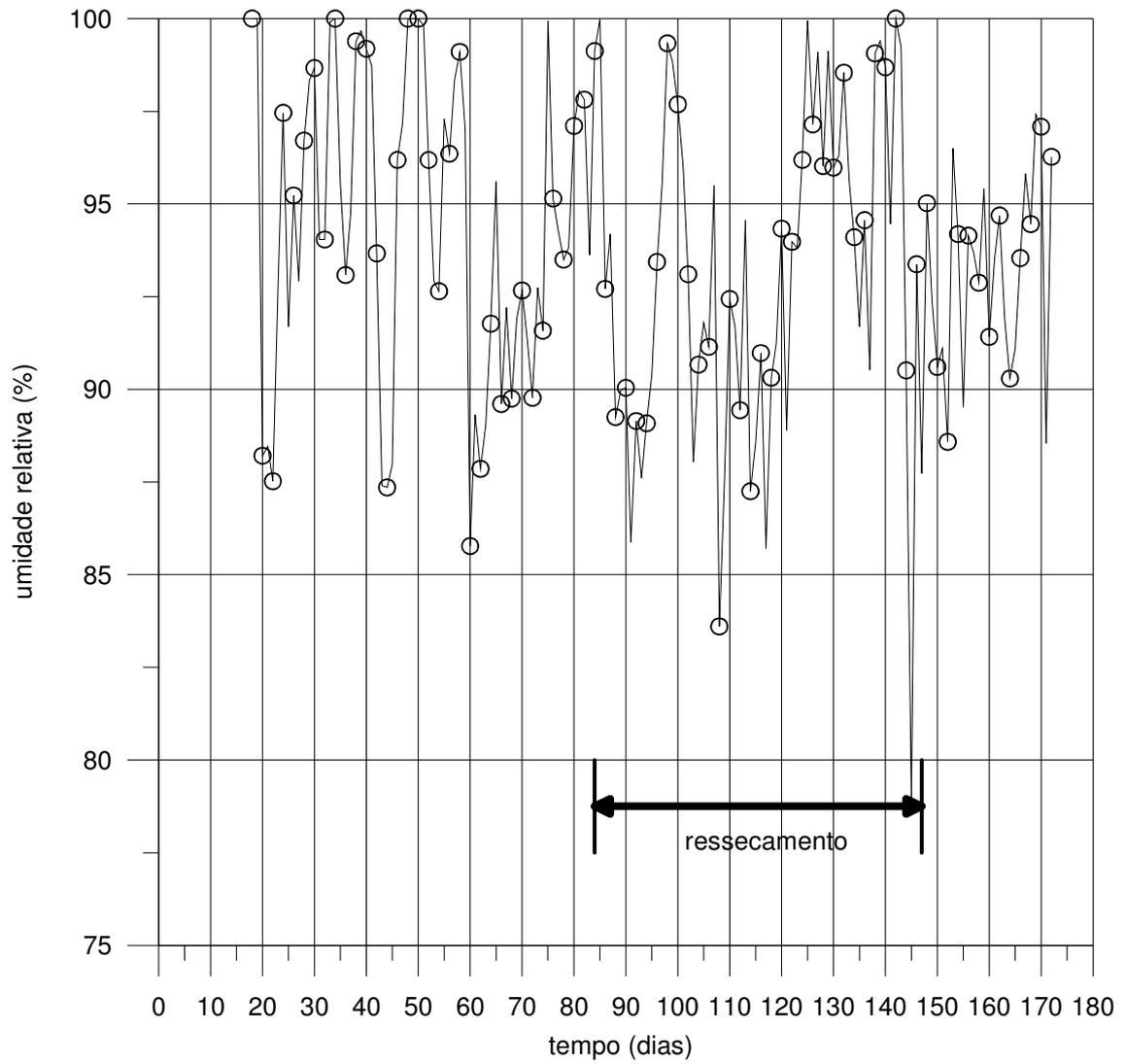


Figura 4.20: Umidade relativa do ar

### 4.2.1.3. Chuva

Durante o tempo de observações do processo de secagem, houveram alguns eventos de chuvas. Na maior parte do período não ocorreram precipitações, e quando aconteceram, foram espaçadas de 7 a 10 dias. A figura 4.21 apresenta as informações de pluviometria.

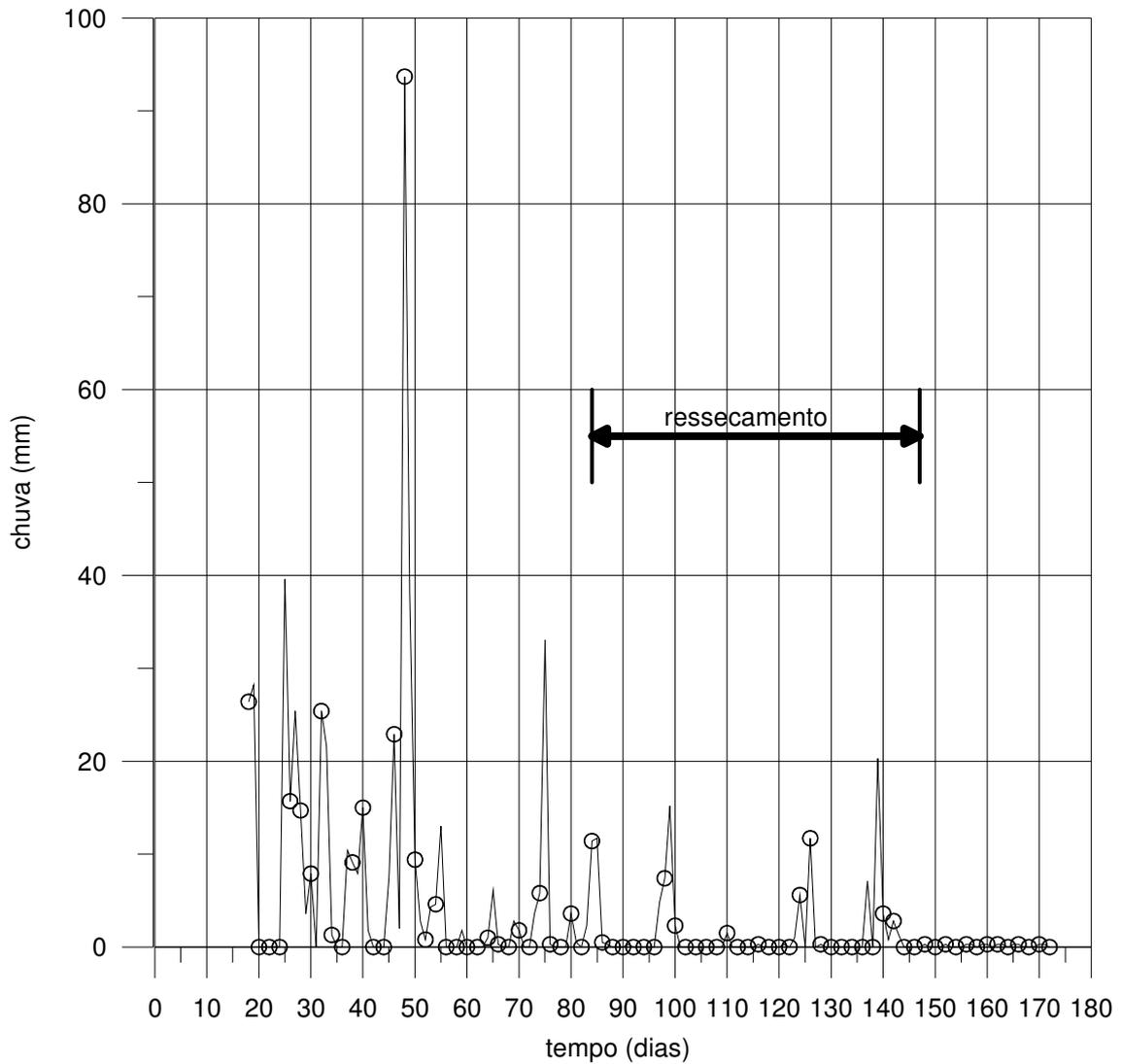


Figura 4.21: Pluviometria

#### 4.2.1.4. Evaporação

Analisando os dados de evaporação a partir do cálculo dos fatores meteorológicos da estação tal como mencionado no Capítulo 3, apresentados na Figura 4.22, pode-se constatar duas médias. Do início do ressecamento (dia 84) até o dia 120, aproximadamente, a taxa média estava em torno de 2.8 mm/dia caindo para algo em torno de 1,5 mm/dia no final do período. Esses valores, segundo Abu-Hejleh e Znidarcic (1995), são considerados médio e baixo, respectivamente, em termos de taxa de evaporação e provavelmente não levariam a formação de crosta.

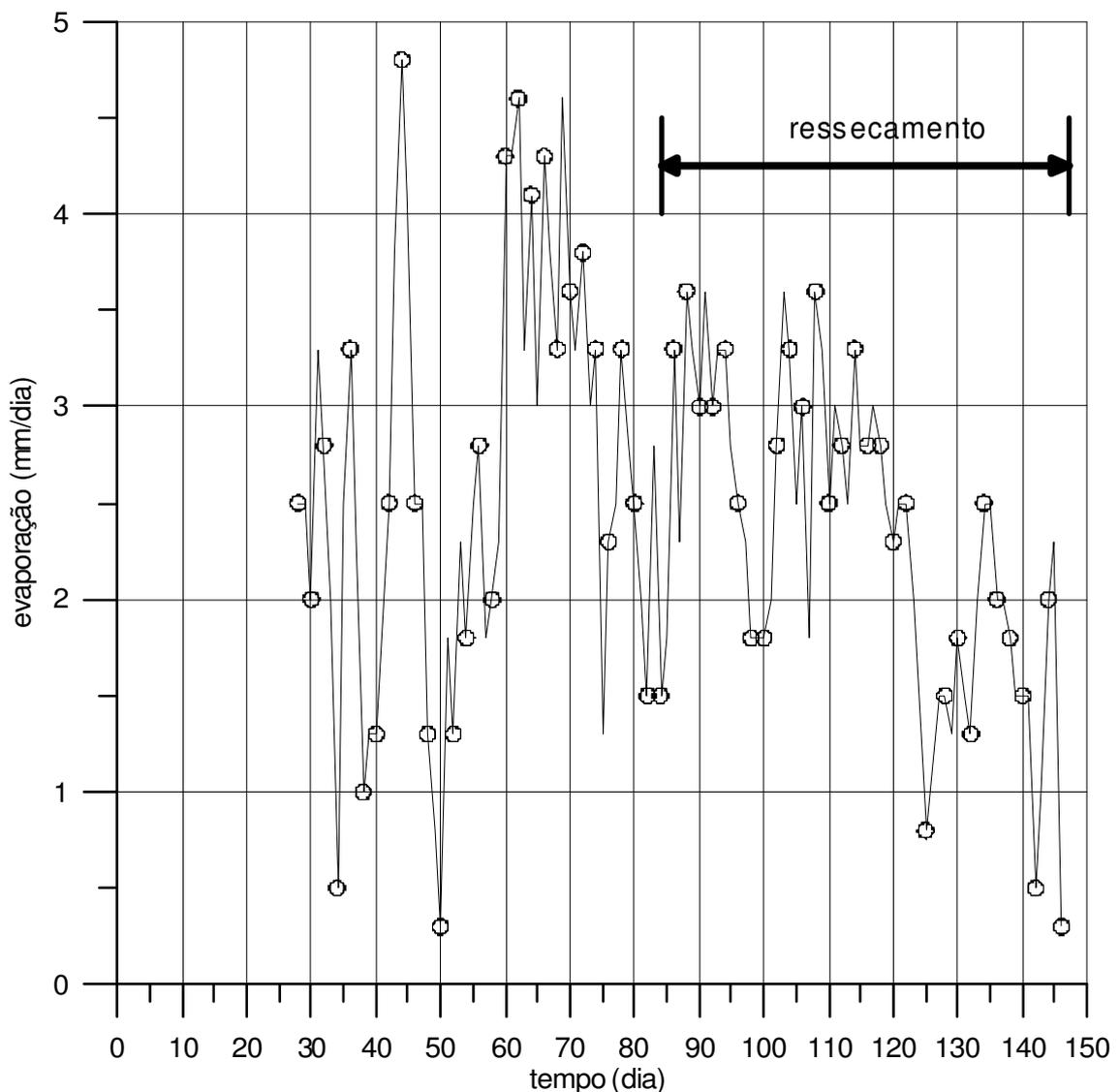


Figura 4.22: Taxa de evaporação obtida através do modelo matemático da estação

As leituras do classe A, da chuva e o cálculo da evaporação, são mostradas na Figura 4.23 Este gráfico apresenta a altura de água perdida acumulada por unidade diária versus o tempo. Uma das curvas representa as leituras acumuladas do tanque classe A (balanço hídrico); uma segunda curva representa a precipitação acumulada no período; e a última, representa a resultante da soma dos valores das duas curvas anteriores (evaporação). Na curva de evaporação, os dois ajustes mostrados indicaram duas taxas próximas: 4,3 mm/dia no início e 3,7 mm/dia no final. Se considerarmos um fator de 0,7 para correlacionar a evaporação do reservatório com a evaporação do classe A, obtemos os valores de evaporação potencial de 3,0 e 2,6 mm/dia, respectivamente.

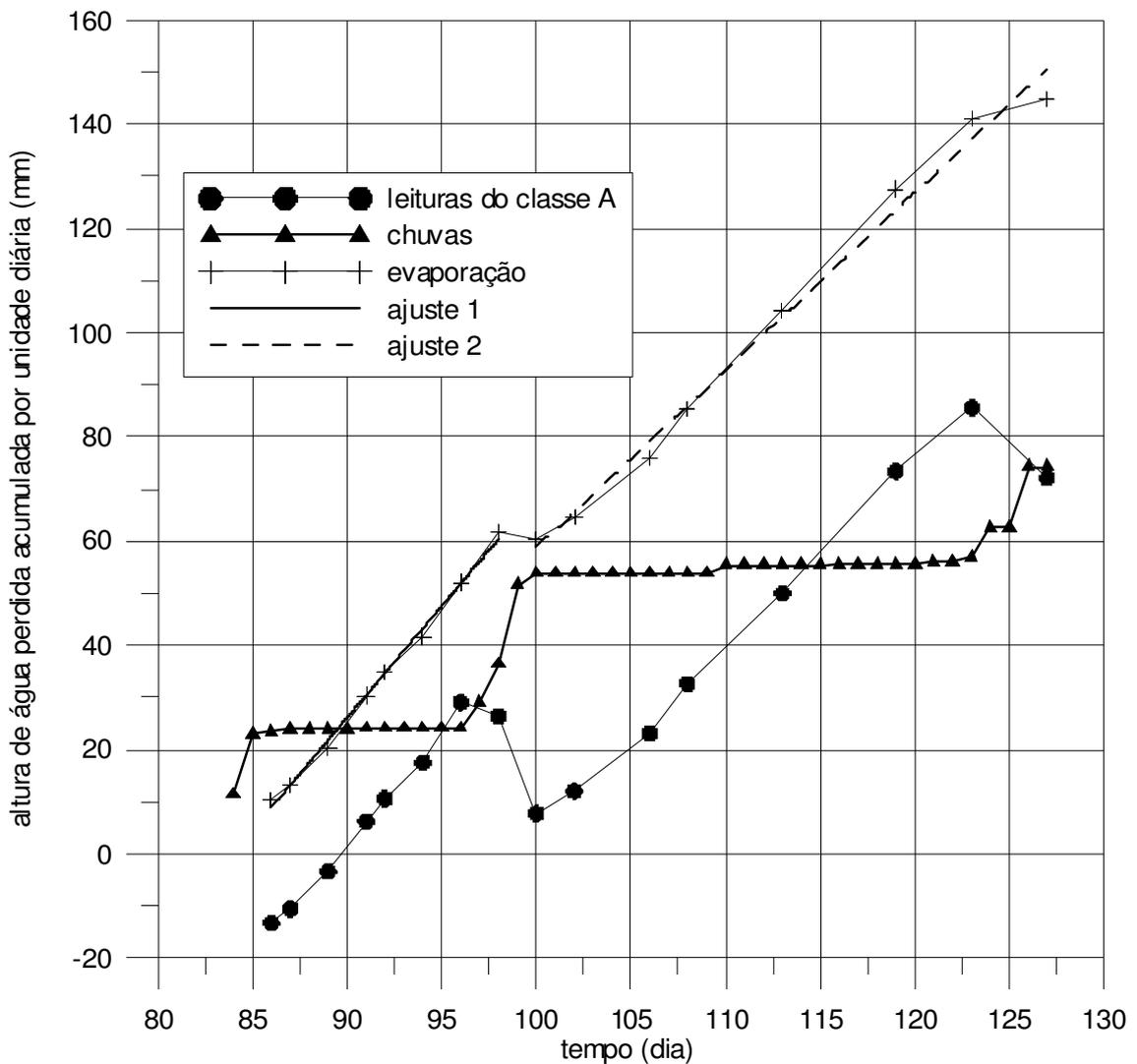


Figura 4.23: Leituras do classe A, da chuva e o cálculo da evaporação

## **4.2.2. Poropressão na Base**

A poropressão na base é uma condição de contorno que foi observada através da instalação de dois piezômetros e um tensiômetro na base da área teste.

### **4.2.2.1. Piezômetros**

Os piezômetros foram utilizados para monitorar as poropressões na camada arenosa situada sob a camada de lama. As leituras dos piezômetros foram iniciadas alguns dias após o término do enchimento da área teste. Ao analisar a Figura 4.24, nota-se que os dois piezômetros dão praticamente as mesmas leituras.

O comportamento dos piezômetros é bem distinto conforme o período de análise. Antes do processo de ressecamento, as leituras indicam carga de pressão na base positiva. As leituras foram poucas, tendo uma delas registrado valor muito elevado (dia 58) provavelmente, após período chuvoso e devido ao acúmulo de água na área teste. No período de ressecamento, no entanto, é nítida a diminuição gradativa das poropressões. Isto parece sugerir que o NA acima da base era mantido pelo suprimento de água na superfície da área teste, e que quando esta deixou de existir, ocorreu o rebaixamento gradual do NA.

Quando as leituras apresentaram valores menores que 0,70 m, significava que começava a ocorrer sucção na base, conforme a construção e montagem dos piezômetros descrita no Capítulo 3. Quando a leitura forneceu valor zero, foi atingido o valor limite desse equipamento e o NA estava abaixo dessa cota de instalação.

O acompanhamento das poropressões subsequentes (sucção na verdade) foi feito um pouco tardiamente através dos tensiômetros.

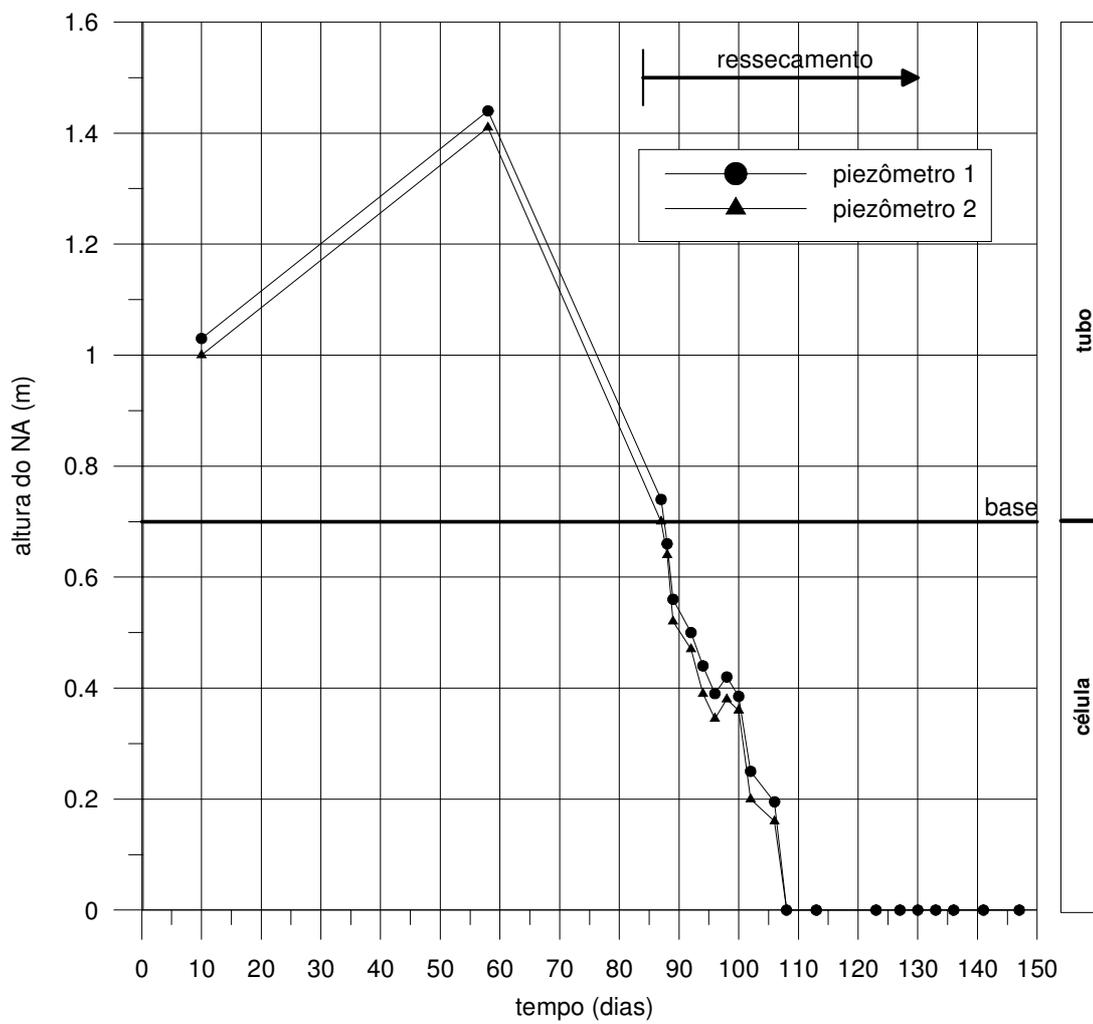


Figura 4.24: Leitura dos piezômetros

#### 4.2.2.2. Tensiômetros

Foram instalados três tensiômetros na área teste: um na base (1), um intermediário (2) e um mais superficial (3). Os dois últimos só forneceram leituras confiáveis a partir de determinada data devido ao fato de não se estar utilizando uma rolha adequada no equipamento.

A Figura 4.25 mostra as leituras realizadas. Os tensiômetros 2 e 3 forneceram leituras bem próximas de zero enquanto o 1 apresentou valores de sucção entre 0,8 e 1,1 mca (8 e 11 kPa).

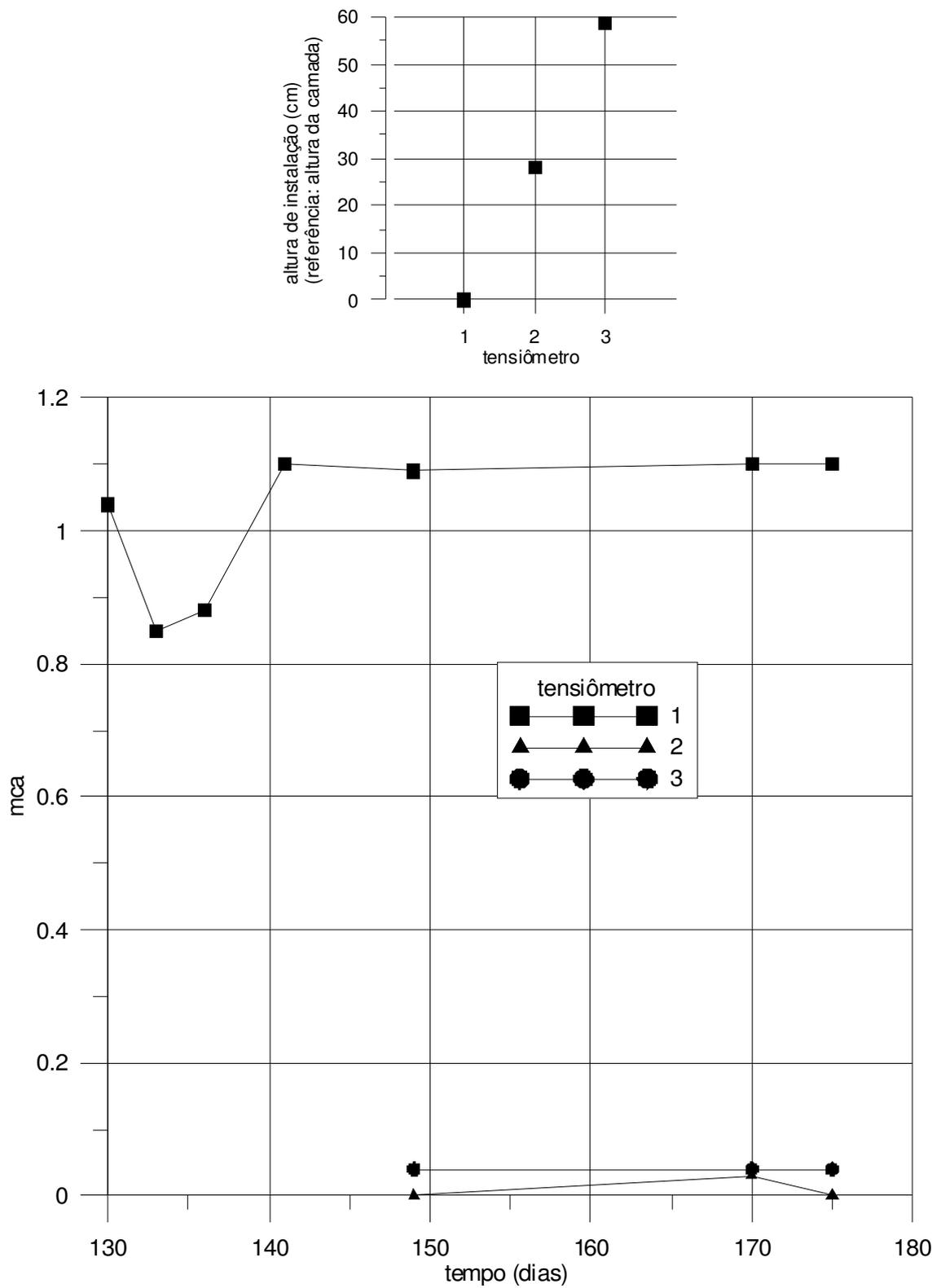


Figura 4.25: Leitura dos tensiômetros

## **CAPÍTULO 5**

### **DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Esta seção objetiva trabalhar um pouco com as informações apresentadas no Capítulo 4, de modo a melhor interpretar os resultados, testar consistência das medidas, verificar a performance dos instrumentos e obter algumas relações constitutivas. Serão apresentadas as variáveis que interferem no fenômeno e como elas se relacionam.

#### **5.1. Contração**

Os dados do ensaio de contração livre podem ser mostrados também, na forma apresentada na Figura 5.1. Deste gráfico, podem ser obtidos os valores de  $V_d$  e  $V_s$  para então, calcular o  $e_{min}$ .

$$V_d = 360 \text{ cm}^3 \text{ (volume seco)}$$

$$V_s = 159 \text{ cm}^3 \text{ (volume de sólidos)}$$

$$e_{min} = \frac{V_v}{V_s} = \frac{201}{159} = 1,26 \quad (5.1)$$

( $e_{min}$  correspondente ao índice de vazios do solo no limite de contração)

Esse resultado pode ser obtido de forma independente a partir de amostras no campo próximas ao limite de contração e determinação de  $w$  e  $G$ , ou seja

$$S.e = G.w \quad (5.2)$$

As últimas umidades de campo associadas às variações da altura da camada foram da ordem de 27%. Observou-se no campo que quando a camada parou de variar o perfil de umidade era de aproximadamente 30%. Adotando-se  $G = 3,9$  e admitindo-se  $S = 1$ , obtém-se  $e = 1,17$ . O ensaio de contração forneceu  $e = 1,26$ .

O índice de vazios obtido graficamente é consistente pois, o seu valor se encontra próximo do valor calculado.

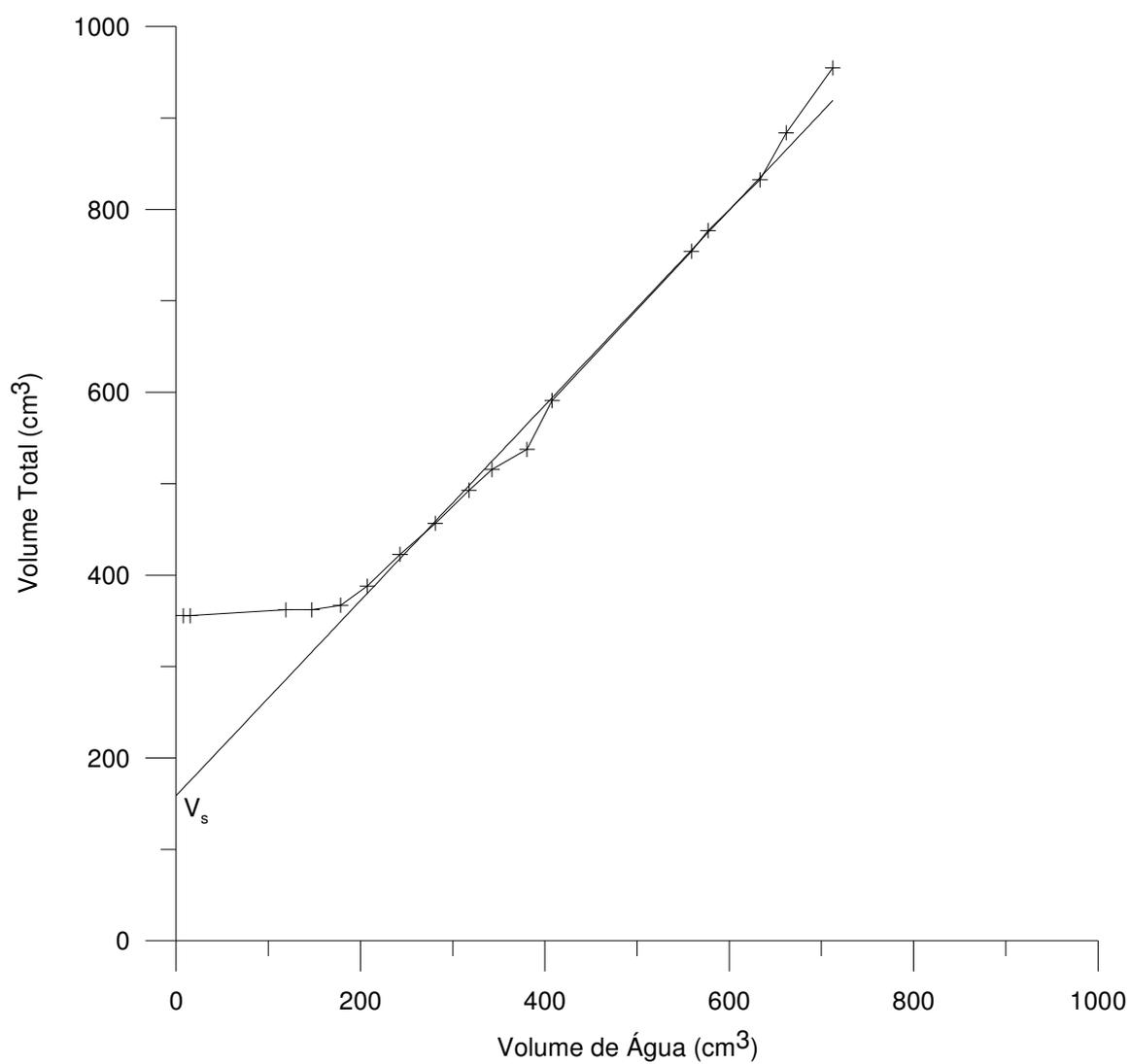


Figura 5.1: Volume total versus volume de água

## 5.2. Recalque

A evolução da altura da camada (ou os recalques) no período de ressecamento é consequência das propriedades do solo e das condições de contorno. Ainda é cedo para tentar explicar os resultados obtidos sem análises mais minuciosas do fenômeno, mas algumas hipóteses podem ser levantadas no sentido de identificar os principais fatores.

Por exemplo, observando-se os dados de evaporação mostrados na Figura 5.2, percebem-se duas taxas no período: uma de 2,8 mm/dia, cobrindo o período inicial até o dia 120, aproximadamente, e outra de 1,5 mm/dia, pegando o restante do processo. Essas taxas diferentes coincidem com a mudança na evolução dos recalques, também mostrado na Figura 5.2, que acontece precisamente entre os dias 115 e 120, passando de uma pendente maior para outra menor.

Analisando-se melhor esses dados da variação da altura da camada, constata-se que as taxas de recalque praticamente coincidem com as taxas de evaporação. Esse resultado mostra que a evaporação real (ER) coincide com a evaporação potencial (EP), ou seja a eficiência da evaporação no ressecamento do solo é total e governada pelas condições meteorológicas ( $ER=EP$ ). Essa observação parece bastante pertinente embora para uma conclusão definitiva é preciso estudar a condição de contorno da base (piezômetros) numa análise mais detalhada.

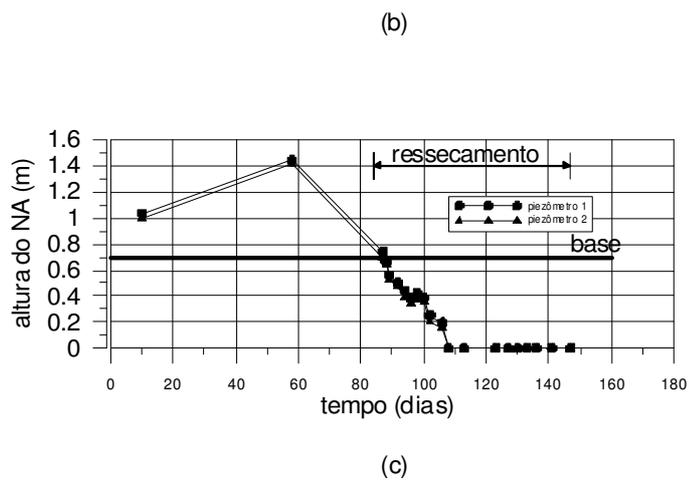
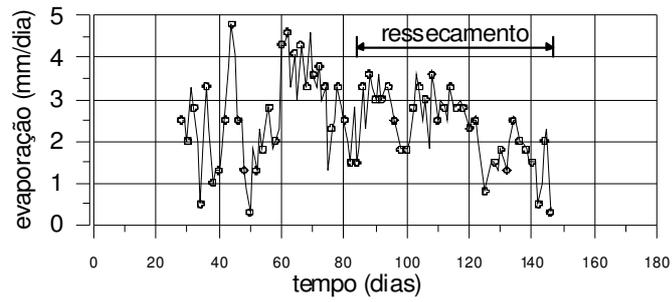
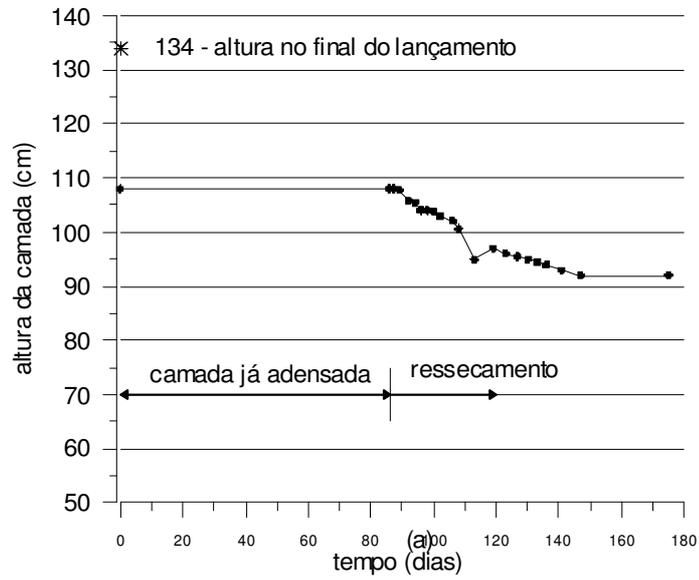


Figura 5.2: (a) recalque; (b) evaporação e (c) piezômetro

### 5.3. Teor de Sólidos e Índice de Vazios

Duas grandezas derivadas muito importantes para análise e explicações práticas são o índice de vazios,  $e$ , e o teor de sólidos,  $P$ . Nesse sentido, é oportuno apresentar essas grandezas a partir dos dados obtidos. Como os dados de  $G$  são praticamente constantes, o comportamento de  $e$  e  $P$  não são independentes. Assim, faz-se uma descrição detalhada dos perfis de  $P$  apenas.

O perfil de teor de sólidos evoluiu segundo a Figura 5.3. Há um ganho expressivo do teor de sólidos com o tempo. Observa-se que a variação do teor de sólidos é maior quanto mais próximo da superfície. Durante o período de estudo, observou-se um ganho médio desta variável da ordem de 30%. Se considerarmos os valores de lançamento ( $P=20\%$ ), esse ganho é muitíssimo maior passando pelo adensamento ( $P=40\%$ ).

No final do processo, os perfis são mais uniformes. A porção média do perfil será melhor explicada a partir de uma análise numérica porque somente as condições de contorno podem justificar as tendências. Deve-se observar se esta porção está sendo influenciada pelas condições do topo ou da base. Isto só pode ser explicado através de uma simulação. Percebe-se que a condição drenante é benéfica, pois acelera o processo.

Este processo tem a base drenante, logo, há uma tendência do índice de vazios na base ser menor e o teor de sólidos maior. Valores menores de  $e$  na base refletem a condição drenante.

Observa-se no perfil de índice de vazios, uma tendência de uniformização ao longo da camada, o que já era esperado de acordo com simulação prévia (Figura 5.4).

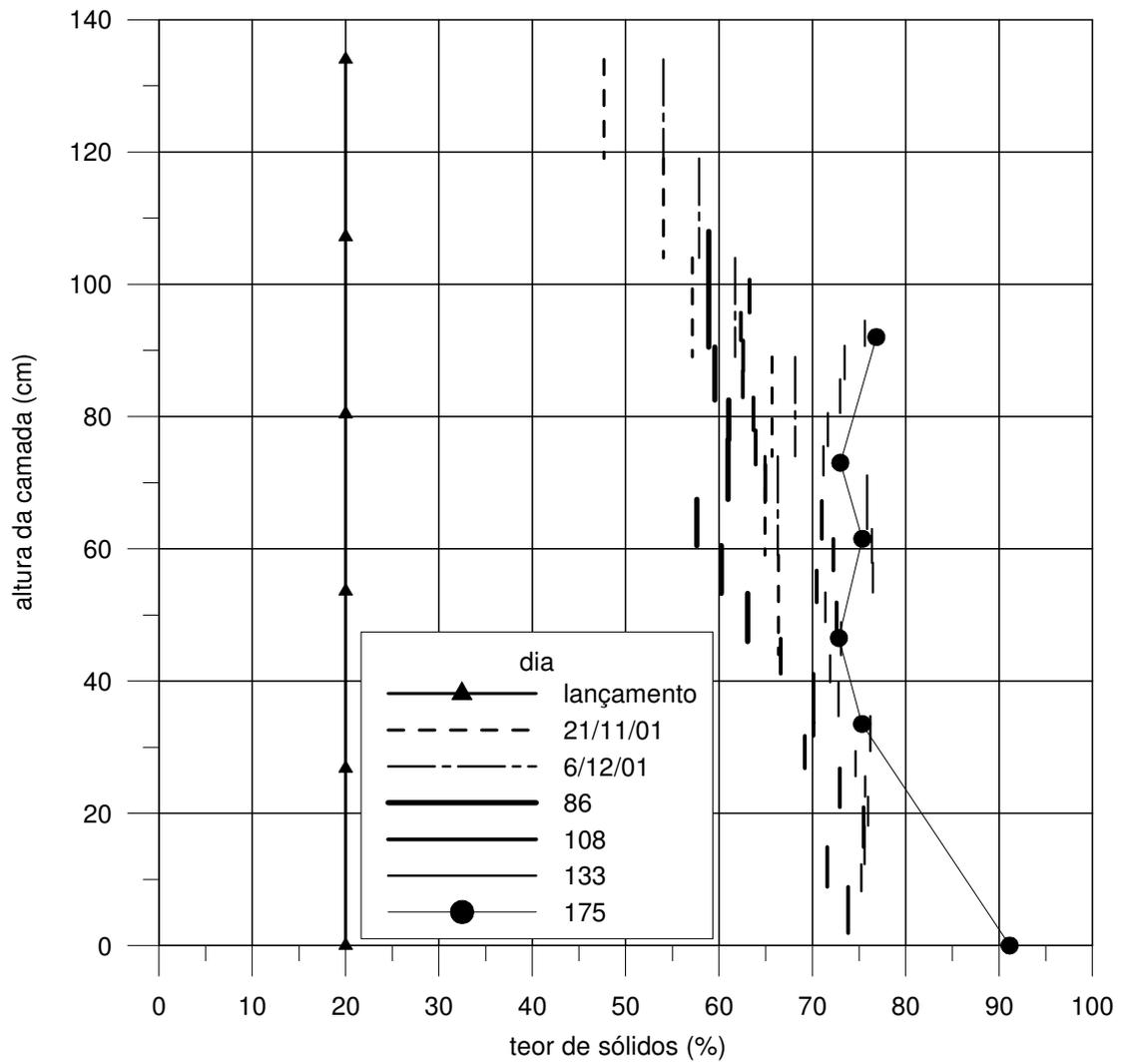


Figura 5.3: Teor de sólidos

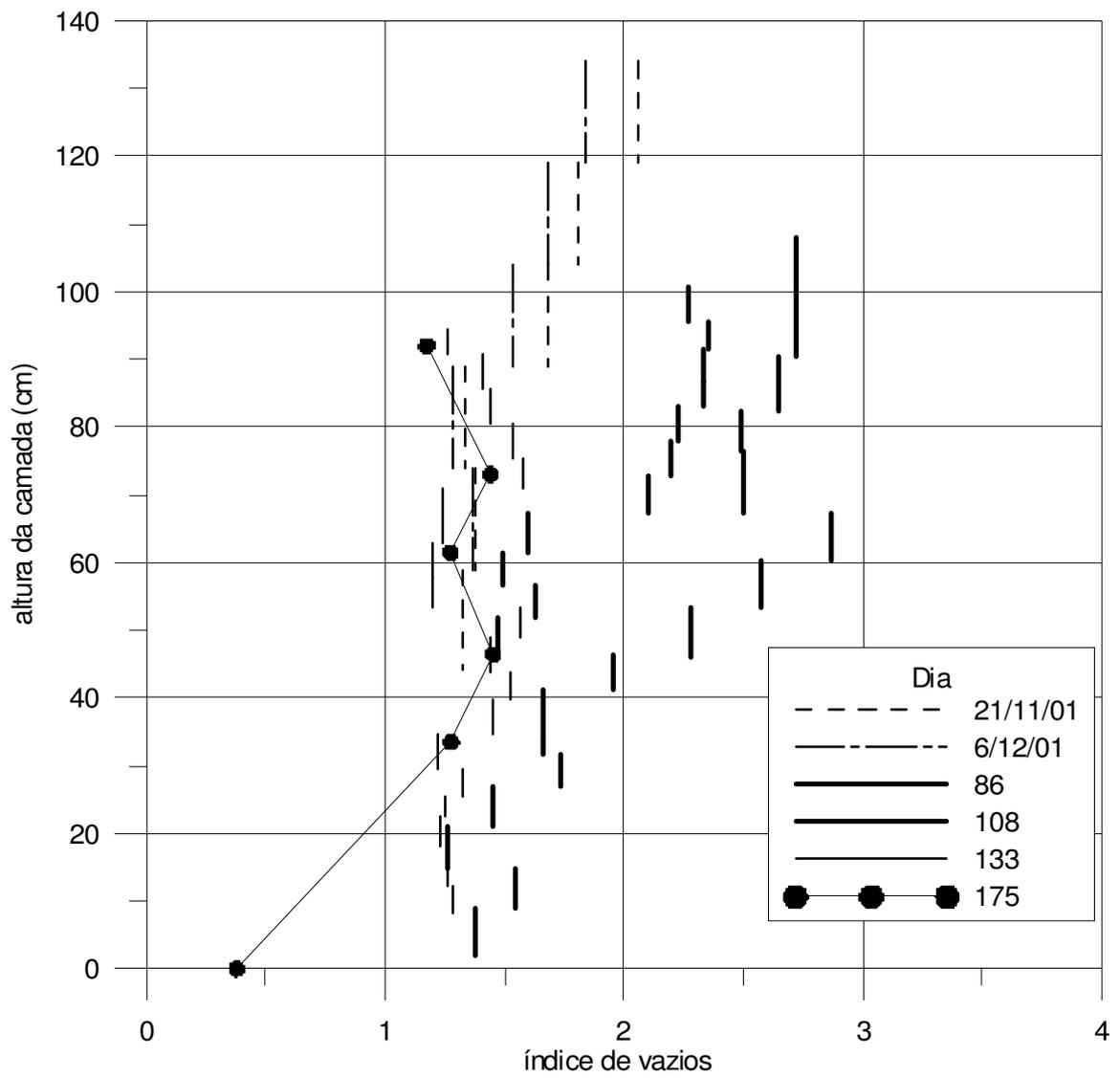


Figura 5.4: Índice de vazios

#### 5.4. Trincas

O estágio das trincas depende fundamentalmente do nível de sucção. Os fatores que podem afetar a sua evolução seriam a taxa de evaporação, a velocidade de rebaixamento do lençol e também a precipitação.

Ao reanalisarmos a evolução das trincas com o tempo, interessa, portanto, fazê-lo observando também algumas outras variáveis (Figura 5.5). Já se mencionou anteriormente que a taxa de evaporação é mais elevada até o dia 115 e, depois, cai à metade. Observando-se a taxa de abertura da trinca no tempo, percebe-se um desenvolvimento quase linear e também com duas pendentes distintas, sendo maior no início e diminuindo na segunda etapa. No final, há claramente uma tendência a cessar a evolução das mesmas indicando proximidade do limite de contração.

A Figura 5.6 mostra como a abertura das trincas se relaciona com a largura e apresenta dois ajustes tentativos dos pontos: um para as trincas *a* e *b* e outro para as trincas aleatórias. É válido ressaltar que um ajuste é da evolução com o tempo de duas trincas, e o outro, é de várias trincas tomadas em um mesmo dia no final do processo de secagem. As duas retas são praticamente paralelas e não há uma explicação para este descolamento entre as curvas. Os resultados mostrados neste contexto detêm-se apenas para o aspecto observacional. Uma possível explicação para a distância entre as duas retas de ajuste seria que a parte superior do solo das trincas aleatórias atingiu o LC e a parte mais profunda ainda não, fazendo com que estivessem ainda evoluindo segundo a profundidade.

O comportamento das trincas é também afetado pelos períodos de precipitação. Elas se desenvolvem muito quando não se tem chuva. As maiores taxas de propagação ocorreram em períodos secos e as menores em períodos chuvosos. Em nenhum momento ocorre reversibilidade. A propagação das trincas é dependente também do aparecimento das trincas secundárias.

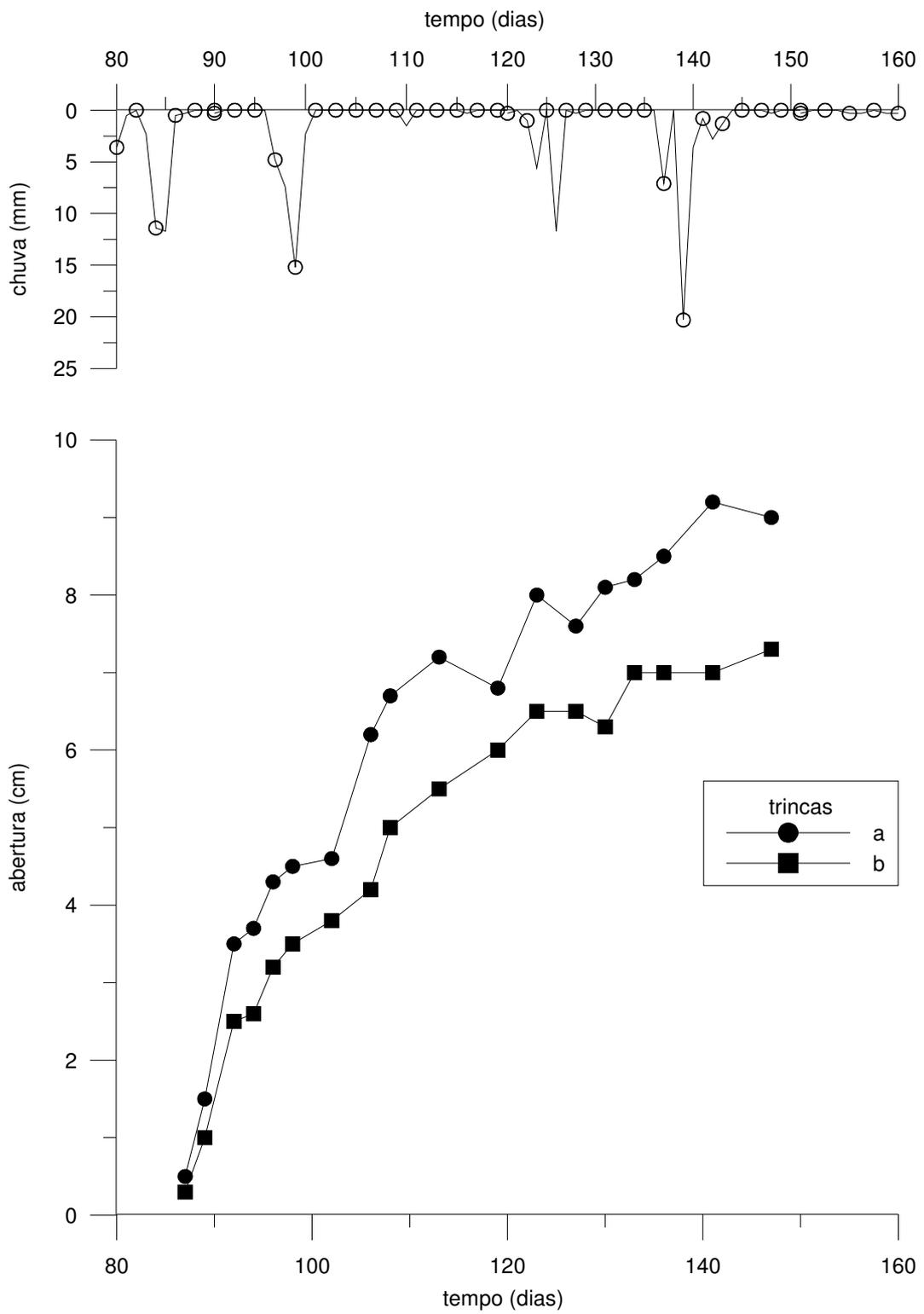


Figura 5.5: Influência da pluviometria na abertura das trincas

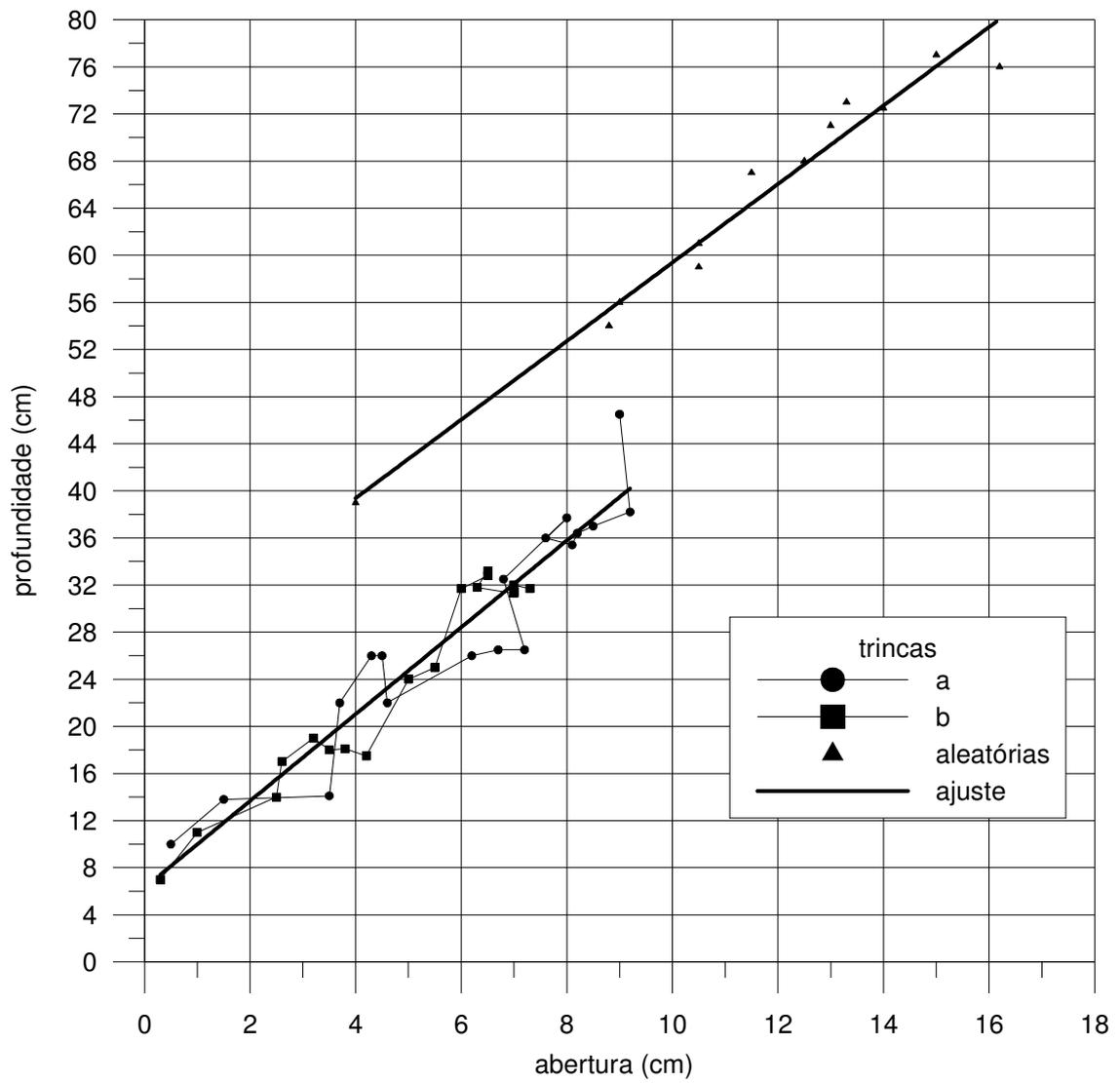


Figura 5.6: Relação da profundidade com a abertura das trincas

## 5.5. Piezômetro e Tensiômetro

A análise das leituras dos piezômetros antes e depois do início do ressecamento (com a remoção da água superficial) permite que se chegue a várias conclusões sobre a condições de contorno da base (Figura 5.7).

Parece claro que o NA na base é afetado pela presença da água superficial. Esta funciona como recarga e manutenção de um nível constante, uma carga positiva de pressão enquanto não se inicia a secagem. O pico de leitura, por exemplo, corresponde a um evento de chuvas que elevou a lâmina d'água. O rebaixamento gradual do NA na base ocorre exatamente durante o período de secagem, mostrando claramente a função de recarga que gradativamente deixa de existir pelo processo de drenagem.

Analisando-se as leituras da base nesse período, percebe-se que, enquanto elas são superiores a 0,70 m, o NA está acima da base e as leituras de carga são positivas, uma vez que a célula do piezômetro vai até 70 cm dentro da fundação e, quando inferiores, elas são negativas. Analisando conjuntamente com o tensiômetro nota-se que o rebaixamento ocorre até, aproximadamente, 1,10m.

Era esperado que as leituras do tensiômetro da base (1) fornecesse algo bem próximo de 2,0 m, pois foi a esta profundidade que se encontrou água ao escavar o rejeito para a construção da área teste.

Considerando-se a umidade da base no dia 175, dia da retirada dos sensores, a densidade dos grãos e o peso específico do rejeito arenoso, tem-se que:  $w=10\%$ ,  $G=3,27$  e  $\gamma_d = 2,0 \text{ t/m}^3$ . Calculando-se o índice de vazios tem-se um valor de 0,6.

Adotando-se a equação  $S.e = G.w$  e utilizando-se os dados acima obtém-se um valor aproximado de  $S = 0,5$ . Consultando-se a curva de retenção deste material (Gomes, R.C., Oliveira Filho, W.L., Araújo, L.G., Ribeiro, S.G.S., e Nogueira, C.L., 1999), para  $S = 0,5$  tem-se uma sucção correspondente de 12kPa. As leituras do tensiômetro indicaram uma sucção de 11 kPa neste dia. Conclui-se que, as informações do tensiômetro da base são consistentes.

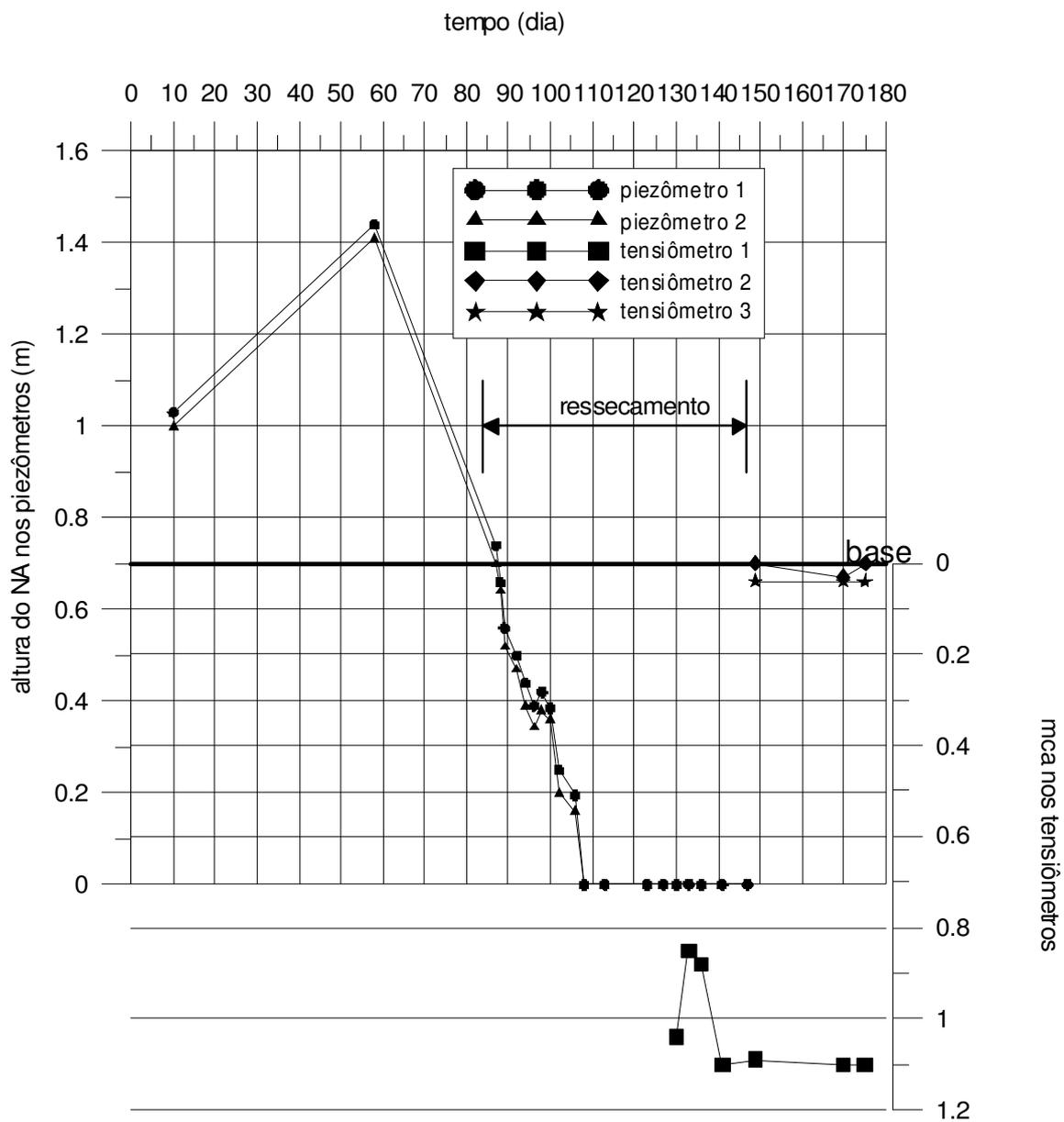


Figura 5.7: Leituras dos piezômetros e dos tensiômetros

## 5.6. Posição Final dos Sensores

Observando-se a Figura 5.8, nota-se que os deslocamentos dos TDR's entre o dia de lançamento e o dia da retirada foram muito parecidos. Isto pode ser justificado devido ao fato de se ter um perfil de índice de vazios praticamente constante no início e no final do processo e supondo que não tenha ocorrido movimento relativo entre os sensores e o solo circundante. O movimento relativo é um ponto muito difícil de ser analisado sem uma análise mais minuciosa, mas parece pouco provável que tenha acontecido.

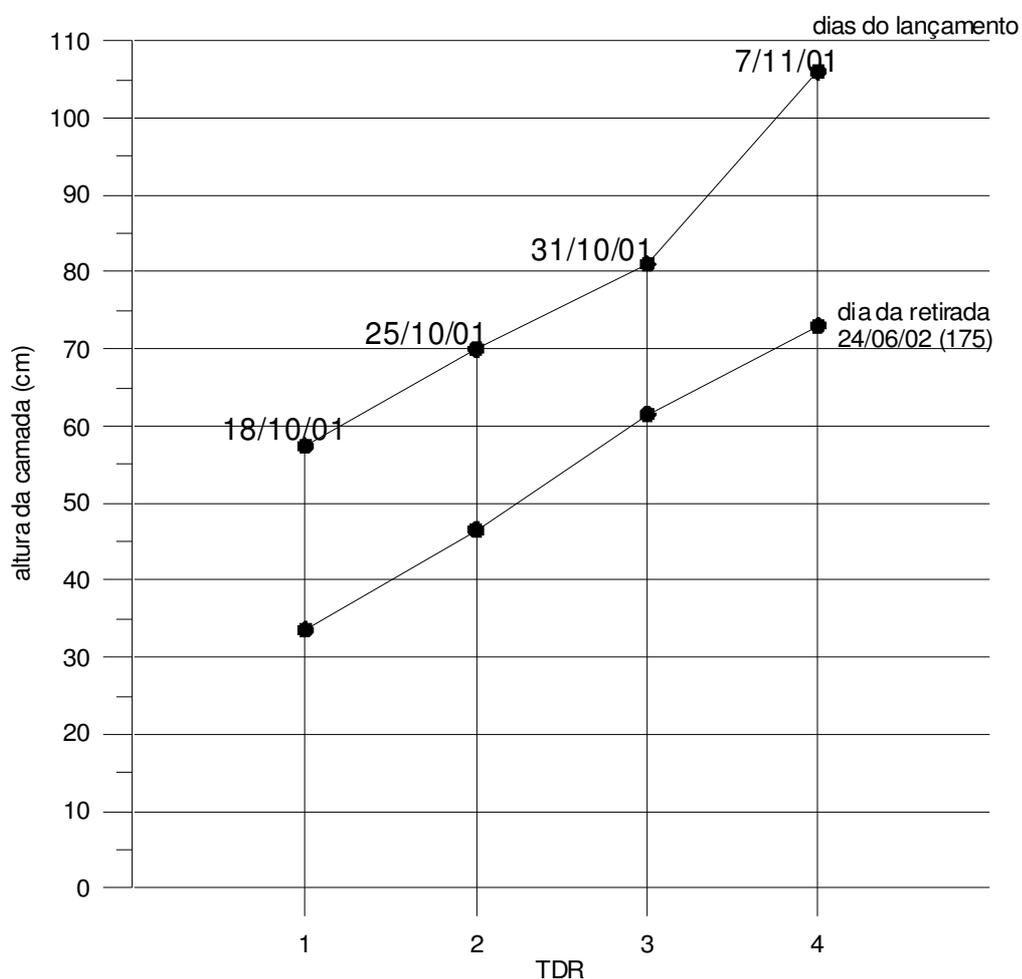


Figura 5.8: Deslocamentos dos TDR's

## 5.7. Evaporação

Os fatores meteorológicos que influenciam na evaporação são: temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (Figura 5.9). Apesar da precipitação não ser uma variável contemplada nos modelos para o cálculo da taxa de evaporação, verifica-se que as taxas mais baixas correspondem a períodos de chuva, o que parece ser consistente.

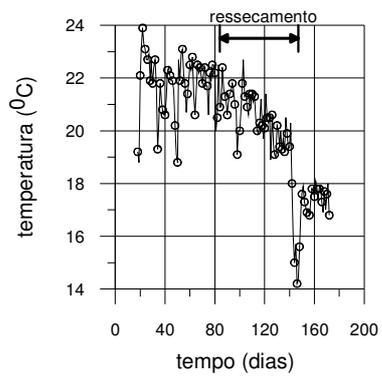
Analisando-se, conjuntamente, todos estes fatores, é possível obter as seguintes conclusões:

- Na estação chuvosa, entre os dias 1 e 46, a umidade relativa e a temperatura foram altas e, porém, a evaporação se encontrava de média a baixa;
- No período que se teve menos chuvas, entre os dias 46 e 89, observou-se as maiores médias de velocidade do vento e baixa umidade relativa. Evidenciou-se, neste intervalo, maiores taxas de evaporação;
- Entre os dias 84 e 120, teve-se um período com poucos eventos de chuva e a taxa de evaporação variou de 1,5 a 3,5 mm/dia, com média de 2,8 mm/dia;
- Depois do dia 120, houveram pequenas precipitações e observaram-se as taxas mais baixas de evaporação de 0,5 a 2,5 mm/dia, com média de 1,5 mm/dia.

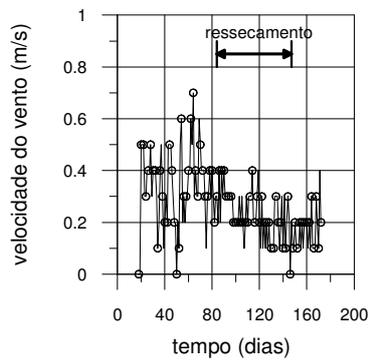
Para altas taxas de evaporação há a formação da crosta (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995). Esta crosta apresenta um índice de vazios muito menor que o do restante da camada. No nosso caso não percebemos isso nas medidas de densidade nas amostragens o que parece consistente, pois as taxas de evaporação observadas no período foram de média a baixa.

Os resultados da medida de evaporação obtidos a partir do equipamento classe A, utilizando o fator de 0,7 mencionado na literatura, comparados com os resultados da estação meteorológica, são apresentados na Figura 5.10. As curvas obtidas são muito próximas no período de comparação (entre os dias 84 e 120), indicando uma taxa média de

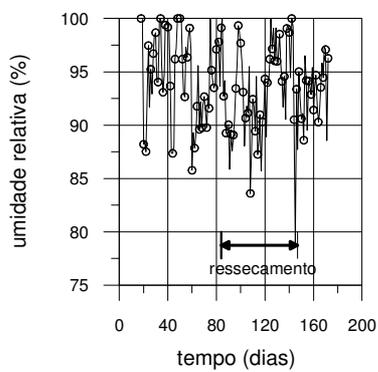
2,7 mm/dia. Os resultados mostram que o modelo é bom. Há uma inconsistência nos dados nos dias 97 e 100, mas não há prejuízo com relação a tendência das curvas.



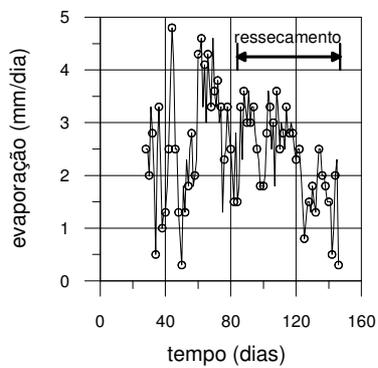
(a)



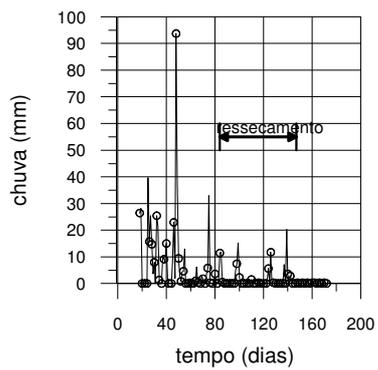
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.9: (a) temperatura, (b) velocidade do vento, (c) umidade relativa, (d) evaporação, (e) precipitação

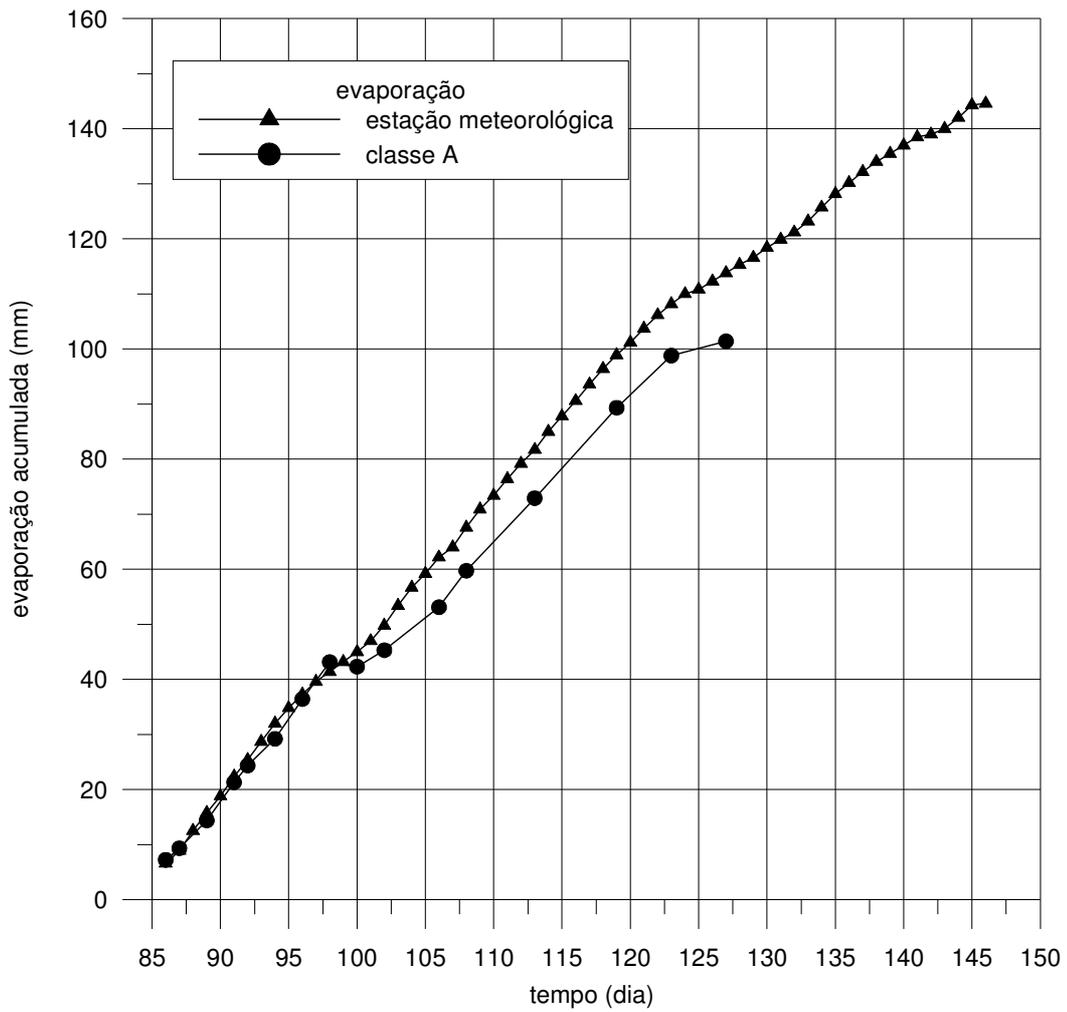


Figura 5.10: Desempenho do classe A

## 5.8. Propriedades Constitutivas

As propriedades constitutivas apresentadas a seguir visam atender a um modelo de ressecamento já mencionado no Capítulo 2 (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995), embora isto não signifique que estes dados possam ser usados em outros estudos.

### 5.8.1. Funcional $\alpha$ (“alpha function”)

O funcional “ $\alpha$ ” é uma das propriedades do material que aparece no modelo de ressecamento de Abu-Hejleh e Znidarcic (1995). Este funcional está relacionado com a geometria das trincas, e sua determinação é feita presentemente a partir do ensaio de contração livre.

A relação funcional  $\alpha$  é definida como a área de um elemento de solo inicialmente unitária que se reduz devido a contração lateral ou ainda a relação entre o volume deste elemento e sua altura. Para  $\alpha=1$ , tem-se o processo unidimensional e para  $\alpha<1$ , tem-se o processo tridimensional.

Os resultados obtidos para esse funcional são mostrados na Figura 5.11 juntamente com um modelo utilizado para o ajuste desses dados sugerido pelos mesmos autores, para um índice de vazios de abertura de trinca  $e_{cr} \approx 2,0$ , valor este obtido por extrapolação.

$$\alpha = \frac{1+e}{1+\frac{2}{3}e_{cr}+\frac{1}{3}e} \quad (5.3)$$

Os resultados mostram-se bastante consistentes.

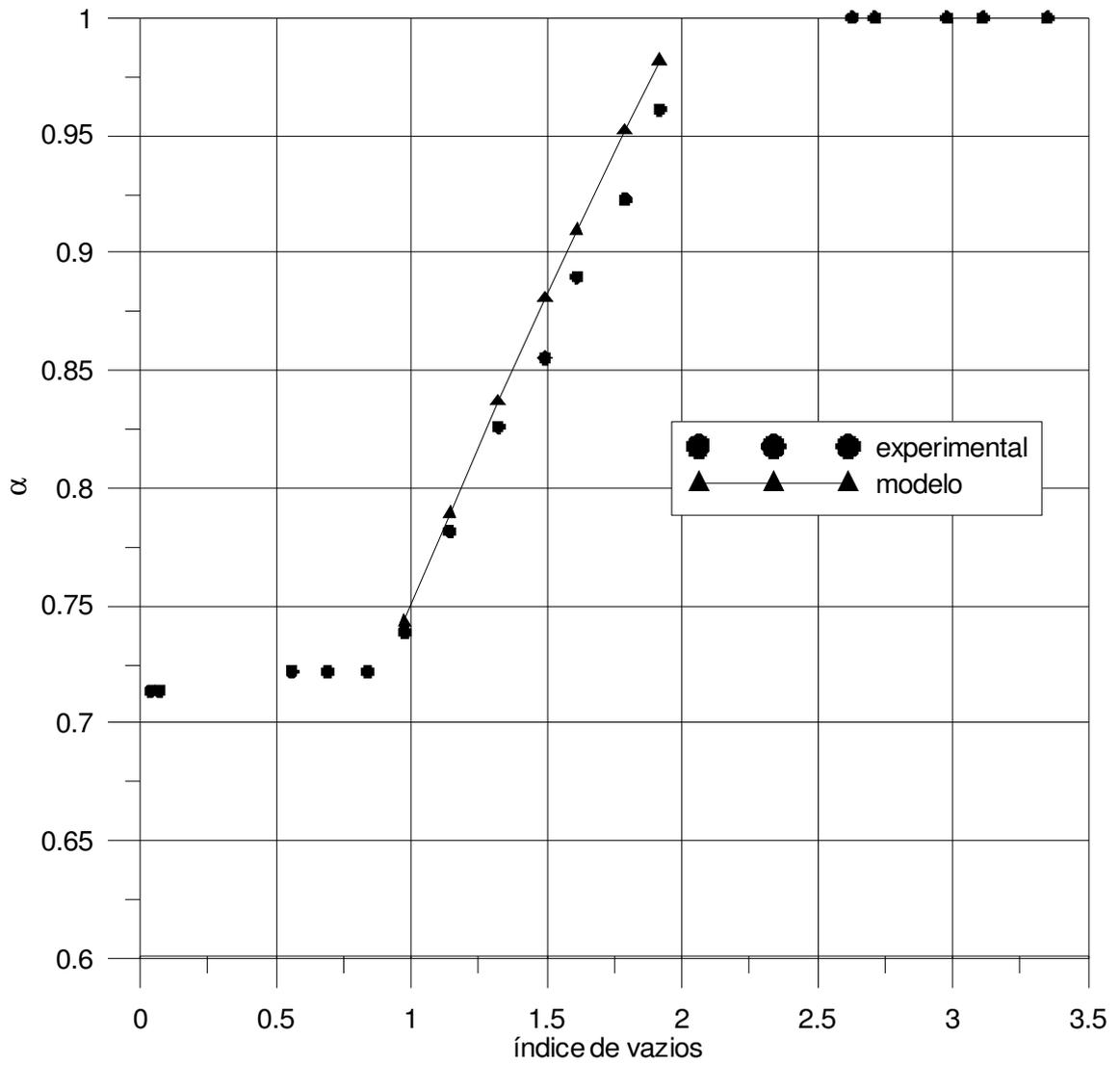


Figura 5.11: Função alfa

### 5.8.2 Função de abertura e propagação da trinca (“cracking function”)

A função de abertura e propagação de trinca foi obtida a partir dos dados de profundidades das trincas observados na área teste (trincas “a” e “b”), da umidade gravimétrica e do peso específico determinados em amostras dos mesmos horizontes. Determinou-se, então, o índice de vazios e a partir de cálculos simples a tensão total para cada elevação particular.

Os resultados obtidos para essa função são mostrados na Figura 5.12. A esses dados foi aplicado o método dos mínimos quadrados para ajuste do modelo sugerido por Yao e Znidarcic (1997) para a “Cracking function”:

$$e_{cr} = \frac{1}{d} + \frac{1}{(b \cdot \sigma + a)^c} \quad (5.4)$$

Os parâmetros de ajuste do modelo são os seguintes:  $a = 0,3859$ ,  $b = 0,0508$ ,  $c = 1,3665$  e  $d = 6,26 \times 10^{17}$ . Percebe-se que o modelo pode ser simplificado, eliminando-se o primeiro termo, já que é muito pequeno.

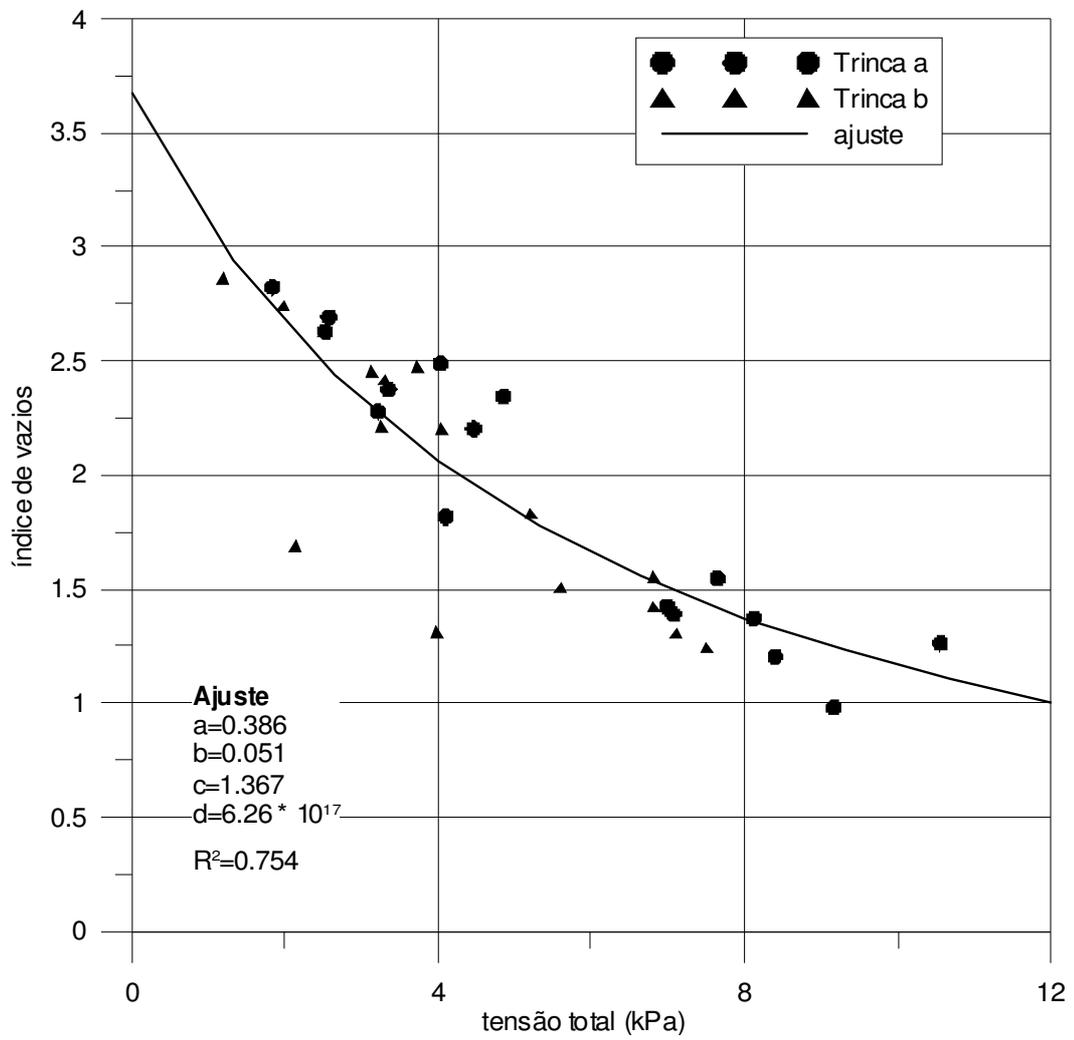


Figura 5.12: Função de abertura e propagação de trinca (“cracking function”)

### 5.8.3. Compressibilidade e Permeabilidade

As propriedades de compressibilidade e permeabilidade obtidas no campo ficaram prejudicadas devido às leituras tardias dos tensiômetros. O sensor de sucção era pouco sensível e teve-se problemas com a rolha utilizada nos tensiômetros, que era porosa. Felizmente, estas informações estão disponíveis a partir de ensaios de laboratório de adensamento induzido por percolação realizados na mesma lama por Botelho (2001).

### 5.9. Consistência de $G$ , $w$ e $\gamma$

A análise de consistência das variáveis  $G$ ,  $w$  e  $\gamma$  pode ser realizada através de relações de índices físicos. Uma verificação neste sentido é apresentada na Figura 5.12, ao se calcular o teor de umidade volumétrica a partir de duas formas independentes (Equações 5.5 e 5.6). A densidade dos grãos é a propriedade que menos impacta na consistência dos resultados, pois a sua variabilidade é muito pequena e por isso aparece em ambos os cálculos de  $\theta$ . Os resultados obtidos são muito bons, o que mostra a consistência entre estas três importantes grandezas.

$$\theta = \frac{e}{1+e} \quad (5.5)$$

Sendo que  $e$  foi obtido a partir da Equação 5.2 considerando-se  $S = 1$ .

$$\theta = \frac{G - \gamma_n}{G - 1} \quad (5.6)$$

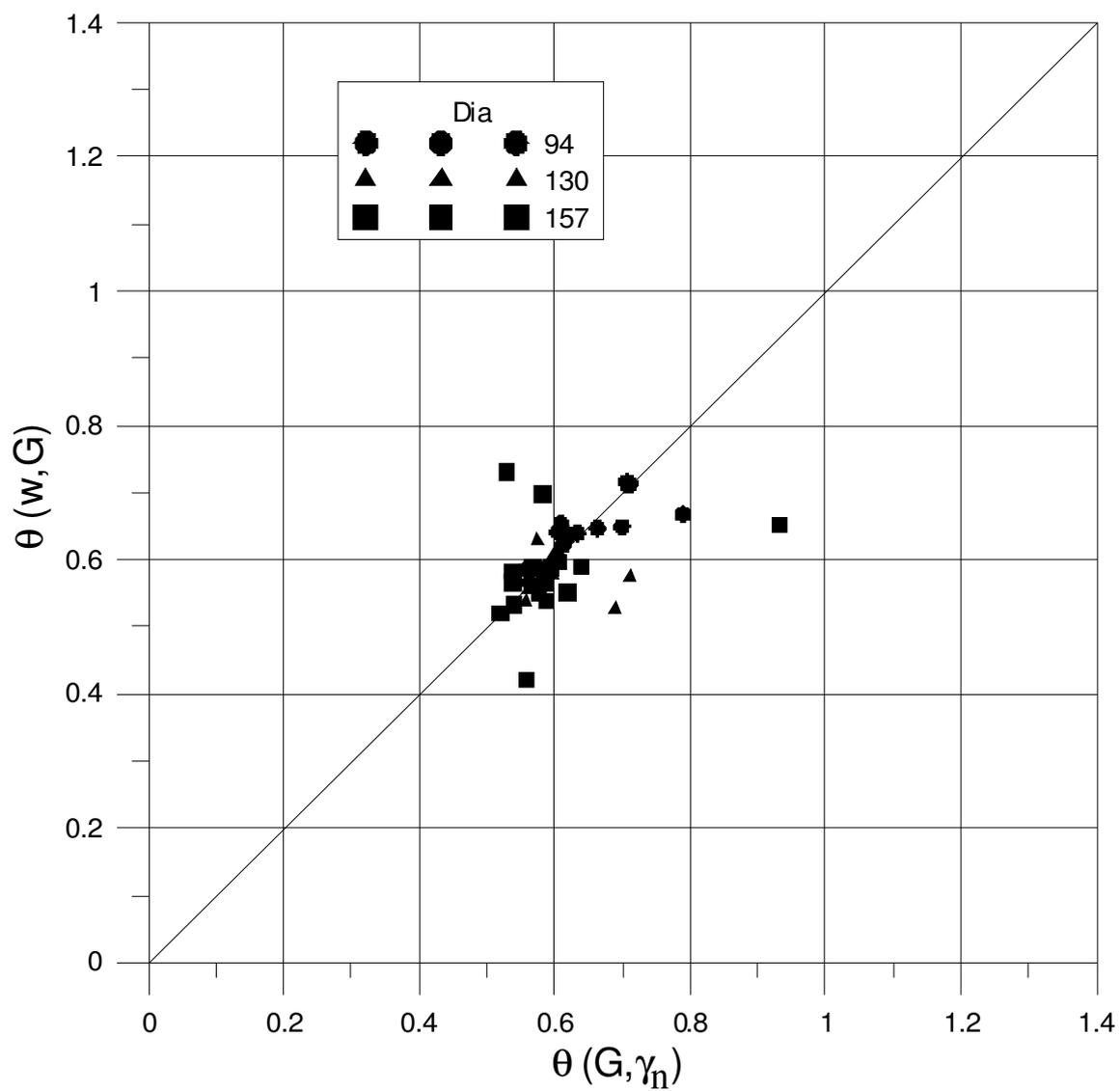


Figura 5.13: Consistência de  $G$ ,  $w$  e  $\gamma_n$

### **5.10. Desempenho dos TDR's**

A análise de desempenho dos TDR's pode ser realizada comparando-se os valores diretos de  $\theta$  com aqueles outros calculados a partir de  $w$  e  $G$  ou  $\gamma_n$  e  $G$ , cuja consistência já foi demonstrada na seção anterior. Essa análise é mostrada na Figura 5.14. Em termos gerais, a correlação é boa, com os valores de  $\theta$  lido ligeiramente superiores aos valores calculados. Essa aparente discrepância pode ser eliminada através de calibrações mais minuciosas daqueles instrumentos, uma vez que são muito sensíveis ao tipo de material onde se encontram inseridos.

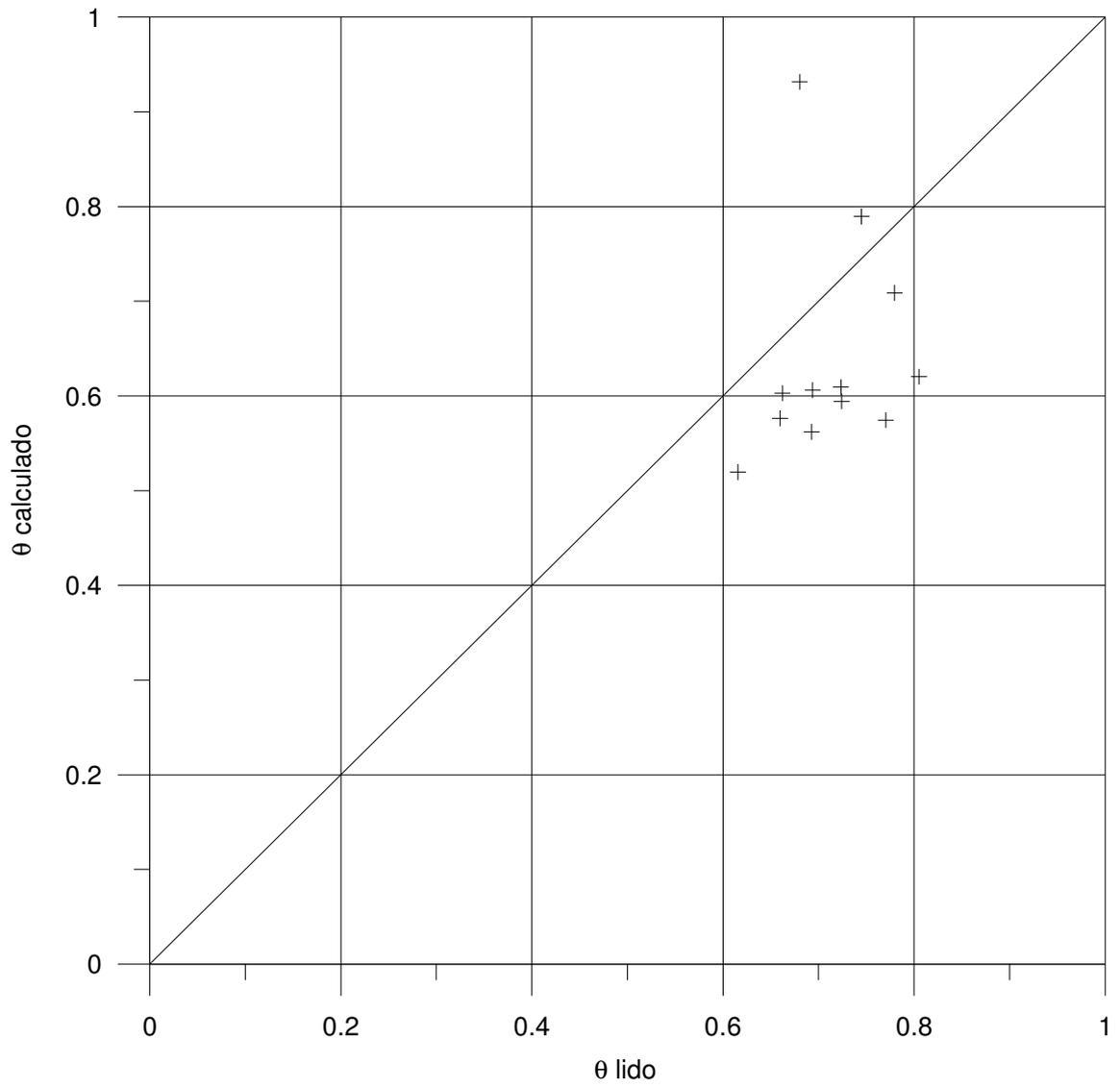


Figura 5.14: Desempenho dos TDR's

## ***CAPÍTULO 6***

---

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **6.1. Considerações Finais**

Os resultados desta pesquisa indicam que a metodologia utilizada foi eficiente na obtenção das informações necessárias à descrição do fenômeno do ressecamento em que pese a qualidade e consistência dos dados. Essa metodologia teve como base uma teoria sobre o ressecamento de solos finos apresentada por Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995. Dessa forma foi possível que todas as variáveis medidas tivessem suas grandezas estimadas não só em termos qualitativos, mas também quantitativos. Dentro da metodologia utilizada houve sempre uma preocupação com a consistência dos resultados e análise do desempenho dos instrumentos utilizados.

#### **6.2. Conclusões**

Destaca-se a seguir os principais pontos que definiram a pesquisa.

O ensaio de contração livre merece destaque devido a importância das informações obtidas. Através deste ensaio, pôde-se conhecer o teor de umidade correspondente ao limite de contração do solo e também até onde o solo se comporta no estado saturado.

A instrumentação deste trabalho foi extensa e variada, e em alguns casos até inovadora, não se tendo notícia no Brasil de estudos de campo sobre o fenômeno documentados. As sondas TDR foram os sensores modernos utilizados na pesquisa. O seu uso para a determinação direta do teor de umidade volumétrica é ainda pouco difundido no Brasil. Nesse sentido, a calibração deste equipamento mereceu especial destaque uma vez que o método de medida que se baseia na constante dielétrica do meio, depende do material em estudo.

Outro aspecto de importância no trabalho foi o tratamento da interação solo e atmosfera, em profundidade, combinando aspectos eminentemente geotécnicos com os hidrológicos, estes últimos referentes à evaporação. Nesse sentido, uma discussão sobre

modelos de evaporação e técnicas de medida foi realizada, o que torna talvez esta abordagem pioneira em trabalhos no país.

O trabalho permitiu obter duas importantes relações constitutivas do material, o funcional  $\alpha$  e a função de abertura e propagação da trinca, necessárias a implementação de uma teoria de ressecamento, embora elas possam também ser aplicadas a outros modelos. Isso permitirá, no futuro, o uso de modelos preditivos mais completos sobre o comportamento do material em processo de secagem.

O conjunto das observações do comportamento do material é precioso pela qualidade e diversidade (perfis de umidade, densidade, sucção, curva de recalque, etc.) no sentido que pode ser utilizado em outra etapa do trabalho para a calibração dos modelos preditivos mencionados anteriormente.

### **6.3.Sugestões**

Como sugestão para trabalhos futuros, são apresentados a seguir alguns comentários.

As relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade a partir de dados de campo ficaram prejudicadas no trabalho. Embora isso não comprometa trabalhos futuros, uma vez que as mesmas já haviam sido obtidas em ensaios de laboratório, recomenda-se que estas sejam obtidas também no campo.

A medida direta da “cracking function” poderia ter sido obtida através da coleta de amostras nas trincas. Assim, ter-se-ia uma informação mais precisa das características do material nas diversas profundidades das mesmas.

A estação meteorológica apresentou uma relação custo/benefício bastante satisfatória, o que sugere sua recomendação para trabalhos futuros. No modelo utilizado, no entanto, não se tinha disponível o registro dos dados de evaporação no relatório emitido, o que parece estar corrigido na versão atualizada do “software” que acompanha o equipamento.

O uso do tanque Classe A para obtenção da condição de contorno de evaporação dado seu baixo custo e qualidade dos resultados, deve ser encorajado. Para a situação da pesquisa, o fator 0,7 que relaciona a evaporação de um reservatório e a do tanque foi adequada.

O uso dos sensores TDR para determinação direta do teor de umidade volumétrica e, por tabela, de outros índices físicos importantes (índice de vazios, umidade gravimétrica, teor de sólidos) foi bastante razoável e merece ser recomendado, sem esquecer da importância da calibração para cada material diferente. Para o uso em rejeitos de minério de ferro, seria interessante verificar a atuação do TDR variando o teor de ferro.

O desempenho do tensiômetro de mercúrio foi satisfatório, mostrando uma vez mais que é um sistema simples e confiável, tendo como desvantagens a necessidade de acesso e leitura manual. Para novos trabalhos, seria interessante que fossem instalados mais tensiômetros ao longo da camada.

Apesar dos métodos manuais de operação e registro dos sensores ainda serem comuns entre nós, o uso de “dataloggers” é de grande valia para a observação contínua de fenômenos cujo tempo de duração é longo, e em lugares remotos ou de difícil acesso.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

Abu-Hejleh, Znidarcic, D., e Illangasekare, T. (1993). "Permeability Determination for Unsaturated Soils". *Unsaturated Soils*, GSP no. 39, ASCE, S. Houston and W. Wray, eds., 163-174.

Abu-Hejleh, A.N.e Znidarcic, D. (1995). "Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(6), 493-502.

Andrews, J.R. (1994). "Time domain Reflectometry". *Proc. Symp. on Time Domain Reflectometry in Environmental Infrastructure, and Mining Applications – Evanston, IL*. Pp. 4-13. Citado em Marinho (2000).

Benson, C.H., Bosscher, P.J., Lane, D.T. e Pliska, R.J. (1994). "Monitoring System for Hydrologic Evaluation of Landfill Covers". *Geotechnical Testing Journal*, 17(2), pp. 138-149. Citado em Carneiro, B.J.I. e Conciani, W.

Blight, G.E. (1997). "Interactions between the Atmosphere and the Earth". *Geotechnic*, 47(4), 715-767

Botelho, A.P.D. (2001). "Implementação de Metodologia de Ensaio para Determinação de Relações Constitutivas de Processos de Fluxos em Solos com a Utilização da Bomba de Fluxo". *Dissertação de Mestrado, UFOP*.

Cook e Fredlund, D.G. (1998). "TDR Matric Suction Measurements". *Proc.of the Second Conference on Unsaturated Soils, Beijing, China*, pp. 338-343. Citado em Marinho (2000).

Daniel, D (1982). "Measurement of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils with Thermocouple Psychrometers". *Soil Sci. Amer. J.*, 46(6), 1125-1129.

Edlefsen, N.E., e A.B.C. Anderson, (1943). "Thermodynamics of Soil Moisture". *Hilgardia* 15 (2): pp. 31-298. Citado em Wilson, G.W., Fredlund, D.G., e Barbour, S.L. (1997).

Ensaio Geotécnicos da Lama, 2001 – Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto

Evett, S.R., Warrick, A.W. e Matthias, A.D. (1995). "Wall and Capping Effects on Microlysimeter Temperatures and Evaporation". *Soil Science Society American Journal*, vol.59, pp. 329-336.

Gomes, R.C. e Oliveira Filho W.L. (1999). "Compressibility and Consolidation Characteristics for Bauxite Tailings". 11<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Foz do Iguaçu, Brasil, vol 3, p. 1085-1090.

Gomes, R.C., Oliveira Filho, W.L., Araújo, L.G., Ribeiro, S.G.S., e Nogueira, C.L. (1999). "Condiçantes Geológico-Geotécnicos do Projeto de Disposição de Rejeitos em Cava Exaurida de Mineração". REGEO'99, 4<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. São José dos Campos SP, p. 153-159.

Haines (1923). Citado em Oliveira Filho, W.L. (1998).

Hillel, D. (1980). "Applications of Soil Physics". New York Academic Press. Citado em Blight, G.E. (1997).

Holmes, R.M. (1961). "Estimation of Soil Moisture Content using Evaporation Data". *Proceedings of Hydrology Symposium, No.2 Evaporation*. Queen's Printer, Ottawa, pp. 184-196. Citado em Wilson, G.W., Fredlund, D.G., e Barbour, S.L. (1997).

Hudson, D., Wierenga, P., e Hills, R. (1996). "Unsaturated Hydraulic Properties from Upward Flow into Cores". *Soil Sci. Amer. J.*, 60, 388-396.

Kane, W.F. e Beck, T.J. (1996). "Rapid Slope Monitoring". Civil Engineering, June, pp.56-58.

Khire, M., Meerdink, J., Benson, C., e Bosscher, P. (1995). "Unsaturated Hydraulic Conductivity and Water Balance Predictions for Earth Landfill Final Covers. Soil Suction Applications in Geotechnical Engineering Practice, ASCE, GSP no. 48, W. Wray and S. Houston, eds., 38-57.

Krizek, B.R.J., Casteleiro, M. e Edil, T.B. (1977). "Desiccation and Consolidation of Dredged Materials". Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT12, December, pp 1399–1418.

Kujala, K. e Ravaska, O. (1994). "Soil Water Content Measurement with Time Domain Reflectometer". ICSMFE, XIII, vol. 1, pp. 219-224.

Malicki, M., Plagge, R., Renger, M., e Walczak, R. (1992). "Application of Time Domain Reflectometry (TDR) Soil Moisture Miniprobe for the Determination of Unsaturated Soil Water Characteristics from Undisturbed Soil Cores". Irrigation Sci., 13(2), 65-72.

Marinho, F.A.M. e Pinto, C.S. (1997). "Soil Suction Measurement Using a Tensiometer". Symposium on Recent Development in Soil and Pavement Mechanics". Rio de Janeiro, julho, pp. 249-254. Citado em Marinho (2000).

Marinho, F.A.M. (2000). "Soil Suction – Measurement in soils and Porous Material". Unsaturated Soils in Engineering Practice-Short Course Notes, Denver, Colorado.

Meerdink, J., Benson, C., e Khire, M. (1996). "Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Compacted Barrier Soils". J. Geotech. Eng., ASCE, 122(7), 565-576.

Mitchell, J.K. (1993). "Fundamentals of Soil Behavior". Second Edition. John Wiley e Sons, Inc.

Morris et al. (1992). Citado em Oliveira Filho, W.L. (1998).

Oliveira Filho, W.L. (1998). “Verification of a Desiccation Theory for Soft Soils”. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder. Dissertação de doutorado.

Phene II, C.J., Duttagupta, A., Phene, R.R. e Tojeiro, T. (1988). “ IN Situ Measurements of Soil Matric Potencial using the Time Domain Reflectometry technique – abstract”.Agronomy Abstracts, annual Meetings of American Society of Agronomy/Crop Science of America/soil Science society of America. Anahein, Ca.

Plano Diretor (1999) - Relatório Final de Disposição de Rejeitos do Germano – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Rao e Satyadas (1985). Citado em Oliveira Filho, W.L. (1998).

Ridley, A.M. e Burland, J.B. (1994). “A New Instrument for Measuring Soil Moisture Suction”. Technical Note – Géotechnique, vol. 43, n. 2, pp. 321-324. Citado em Marinho (2000).

Santos, C.A. (2001). “Comportamento Hidrológico Superficial, Subsuperficial e a Erodibilidade dos Solos da Região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – Minas Gerais”. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Ouro Preto.

Stannard, D.I. (1992). “Tensiometers – Theory, Construction, and Use”. ASTM – Geotechnical Testing Journal, vol. 15, n. 1, pp. 48-58. Citado em Marinho (2000).

Tamari, S., Bruckler, L., Halbertsma, J., e Chadoeuf, J. (1993). “A Simple Method for Determining Soil Hydraulic Properties in the Laboratory”. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 642-651.

Whatson, K.K. (1967), "A Recording Field Tensiometer with Rapid Response Characteristics". *Journal of Hydrology*, 5, pp. 33-39. Citado em Marinho (2000).

Wilson, G.W., Fredlund, D.G., e Barbour, S.L. (1994). "Coupled Soil-atmosphere Modeling for Soil Evaporation". *Canadian Geotechnical Journal*, 31:151-161. Citado em Wilson, G.W., Fredlund, D.G., e Barbour, S.L. (1997).

Wilson, G.W. (1997). "Surface Flux Boundary Modeling for Unsaturated Soils". *Unsaturated Soil Practice*, ASCE Geotechnical Special Publication No.68, pp. 38-65.

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*, 34:145-155

Wind, G. (1968). "Capillary Conductivity Data Estimated by a Simple Method". *Water in the Unsaturated Zone*, vol.1, Proc. Wageningen Symp., June 1966, Intl. Assoc. of Scientific Hydrologists, UNESCO, Paris, P. Ritjema and H. Wassnik, ed., 181-191.

Yao, D.T.C. e Znidarcic, D. (1997). "User's Manual for Computer Program CONDES0" – Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder

Notas de Aula de Hidrologia Aplicada da Universidade Federal de Ouro Preto  
Professor Doutor Antenor Rodrigues Barbosa Júnior