

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

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE  
RESSECAMENTO DE UM REJEITO FINO DA  
MINERAÇÃO DE FERRO**

**AUTOR: FRANCISCO EDUARDO ALMEIDA**

ORIENTADORES: PROF. DR. WALDYR LOPES DE OLIVEIRA FILHO  
PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> CHRISTIANNE DE LYRA NOGUEIRA

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, outubro de 2004.

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Almeida, Francisco Eduardo.

A447a Análise numérica do processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro./ Francisco Eduardo Almeida.– Ouro Preto: UFOP, 2004. xv, 108p. : il. color ; tabs.

Orientador: Prof. Waldyr Lopes de Oliveira Filho; Christianne de Lyra Nogueira.

Área de concentração: Geotecnia.

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

1. Calibração - Teses. 2. Engenharia civil - Teses. 3. Contração do solo - Teses. 4. Geotecnia - Teses. 5. Solos. I. Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. II. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

À minha mãe, Francisca Maria, pelo seu amor e exemplo de vida. Graças à sua ajuda e impulsionado por seus ensinamentos, consegui concluir mais uma etapa da minha vida.

Ao meu pai, Lúcio Flávio – “in memoriam”. Apesar de não estarmos mais juntos, a sua lembrança jamais se apagou de minha memória. Sei que, onde estiveres, estarás feliz comigo por mais esta conquista.

## AGRADECIMENTOS

---

---

Agradecer é reconhecer a importância de outras pessoas em nossas vidas. É compartilhar cada vitória conquistada, cada sonho que, ajudados por elas, tornamos realidade. Assim, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que me apoiaram na realização desta dissertação.

A Deus, pelos dons da sabedoria, da fortaleza e da perseverança.

À minha família, especialmente à minha mãe, irmãs e à Maria, pelo carinho e atenção que a mim dedicaram durante a realização deste trabalho. Aos meus sobrinhos por me mostrarem que viver é descobrir a vida a cada dia e se alegrar a cada novo conhecimento adquirido, por mais simples que ele seja.

À Vanessa pelo seu amor e amizade sincera.

Aos meus orientadores – Prof. Waldyr Lopes e Prof<sup>a</sup> Christianne Nogueira, pela amizade, paciência e por terem compartilhado comigo muito do que aprenderam ao longo de suas experiências profissionais.

À Samarco Mineração S.A por todo o apoio e pelo fornecimento das amostras de rejeito fino necessárias à realização desta pesquisa. Um agradecimento especial aos meus companheiros/amigos do Departamento de Geotecnia – Manoel Juliá, Alderico, Tadeu e Bruno e também à Daviély, por ter tornado acessível a mim vários dados de sua dissertação, fundamentais para a concretização de minha pesquisa.

Ao Daniel e ao Deilton pelo valioso auxílio na realização dos ensaios de laboratório necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

À Pimenta de Ávila Consultoria pela oportunidade de crescimento profissional.

A todos os professores e funcionários da Escola de Minas pela assistência e atenção a mim conferidas durante a fase de créditos do mestrado/realização desta dissertação.

Aos meus colegas de mestrado pelos conhecimentos compartilhados nos momentos de estudo em grupo e, principalmente, pela convivência fraterna.

O processo de ressecamento de um solo fino mole é muito complexo, devido às várias variáveis que intervêm no fenômeno, sejam elas intrínsecas ao problema ou externas, como as condições de contorno que influenciam no seu desenvolvimento.

Soluções analíticas para este processo, que compreende as etapas da contração unidimensional e tridimensional, onde ocorre o desenvolvimento das trincas de ressecamento, são difíceis de obter, ou praticamente impossíveis, o que torna mais atrativo o emprego de modelos numéricos nas análises de ressecamento.

Existem, na literatura, poucos modelos numéricos para as análises de ressecamento de solos finos moles de alta compressibilidade. Dentre eles, destaca-se o desenvolvido por Abu-Hejleh (1993), que, aprimorado por Yao e Znidarcic (1997), tem sido utilizado com relativo sucesso em projetos de ressecamento de rejeitos finos da mineração e de solos dragados em portos e canais.

A calibração de um modelo numérico de ressecamento do rejeito fino proveniente do beneficiamento de minério de ferro realizado na Unidade de Germano da Samarco Mineração S.A. foi o principal objetivo desta pesquisa, que teve como base a teoria de Abu-Hejleh (1993). Deve-se ressaltar que, para alcançar esta meta, várias simulações numéricas foram executadas, utilizando-se o programa CONDES (Yao e Znidarcic, 1997), os dados obtidos a partir de um estudo de ressecamento em campo (Silva, 2003) e de ensaios de laboratório realizados neste trabalho.

O modelo numérico de ressecamento do rejeito fino obtido foi utilizado em algumas simulações numéricas do projeto já em desenvolvimento pela empresa mineradora. Esses estudos iniciais mostraram a potencialidade do modelo como uma importante ferramenta para estudos futuros, que tenham por objetivo a otimização do processo de secagem.

A pesquisa realizada neste trabalho pode servir também de exemplo em termos de metodologia para análises de ressecamento em outros projetos semelhantes, trazendo uma importante contribuição nos planejamentos de manejo dos rejeitos e de reabilitação de áreas de disposição.

Desiccation of soft soils is a very complex phenomenon in which a number of variables play a role. Some of these variables are intrinsic to the process, and others are external to it such as boundary conditions.

Analytical solution to the problem, which includes the phases of one-dimensional shrinkage, crack initiation and propagation, and three-dimensional shrinkage, is difficult to obtain, or practically impossible, which makes numerical models an attractive tool in desiccation analyses.

Very few comprehensive models address desiccation of soft soils. One of these is the theory developed by Abu-Hejleh (1993) with the improvements introduced by Yao and Znidarcic (1997) which has been successfully used in analyses of desiccation of fine mine tailings and dredged soils.

The above desiccation theory with its improvements was applied in this research for modeling desiccation of a fine iron ore tailing produced at the milling facility of Germano/Samarco Mineração S.A., in Mariana, MG, Brazil.

For calibration of the numerical model, which was the main purpose of this work, several numerical simulations were performed by using a computer code called CONDES (Yao and Znidarcic, 1997), field desiccation data from a previous work (Silva 2003) and results of laboratory tests.

The numerical model developed in this research was then applied in simulations of some design schemes that have been used by the mining company at an ongoing project. These preliminary studies have shown the potential of the model as an optimization tool of the drying process.

The methodology devised in this research can also be applied to other similar desiccation projects, making it an important contribution in the areas of tailings management and rehabilitation.

	página
Lista de tabelas.....	ix
Lista de figuras.....	x
Lista de símbolos.....	xiii
 <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	
1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Objetivo do trabalho.....	3
1.3 – Escopo do trabalho.....	4
 <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
2.1 – Descrição dos processos físicos experimentados pelos rejeitos após deposição.....	5
2.2 – Aspectos gerais das teorias sobre os fenômenos.....	7
2.3 – Adensamento a grandes deformações.....	8
2.4 – Contração dos solos finos.....	10
2.5 – Trincas de ressecamento.....	11
2.6 – Modelo de ressecamento de solos finos proposto por Abu-Hejleh (1993).....	13
2.6.1 – Modelagem da fase da compressão unidimensional.....	16
2.6.2 – Modelagem da fase da compressão tridimensional.....	17
2.7 – Ensaio de laboratório empregados na determinação das relações e propriedades constitutivas de um solo fino mole.....	19
2.7.1 – Ensaio da contração livre.....	20
2.7.2 – Ensaio do adensamento induzido por percolação.....	20
2.7.3 – Ensaio da sucção.....	22
2.7.4 – Ensaio para a determinação da “cracking function”.....	23
2.7.5 – Conclusões preliminares sobre algumas relações constitutivas.....	23

2.8 – A influência da evaporação no processo de ressecamento de um solo fino.....	24
2.8.1 – Evaporação potencial x evaporação real.....	25
2.9 – Algoritmo numérico para a análise de adensamento unidimensional a grandes deformações e de ressecamento de solos finos moles – CONDES.....	27
2.9.1 – Características gerais CONDES.....	27
2.9.2 – Dados dos arquivos de entrada para o CONDES.....	28
2.9.3 – Simulação via CONDES.....	34
2.9.4 – Dados dos arquivos de saída do CONDES.....	35

### **CAPÍTULO 3 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO E EXPERIÊNCIA DE CAMPO**

3.1 – Caracterização geotécnica da lama.....	36
3.2 – Estudo em campo do processo de ressecamento de lama.....	39
3.2.1 – Dados obtidos no estudo do ressecamento em campo.....	42
3.2.1.1 – Variação dos índices físicos da lama com o tempo de ressecamento.....	42
3.2.1.2 – Variação das condições de contorno da base e do topo da camada de lama com o tempo de ressecamento.....	47
3.3 – Ensaio de laboratório realizados para o estudo numérico do ressecamento de lama.....	49
3.3.1 – Ensaio da contração livre.....	49
3.3.2 – Ensaio de adensamento induzido por percolação.....	53
3.3.2.1 – Procedimentos e técnicas utilizadas na realização dos ensaios de adensamento induzido por percolação.....	54
3.3.2.2 – Apresentação dos resultados dos ensaios de adensamento induzido por percolação.....	58
3.3.2.3 – Análise dos resultados e obtenção dos parâmetros constitutivos de compressibilidade e permeabilidade da lama.....	63

### **CAPÍTULO 4 – CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE RESSECAMENTO**

4.1 – Considerações iniciais.....	68
4.2 – Simulações numéricas da fase de adensamento.....	69

4.2.1 – Simulações SA1 e SA2.....	69
4.2.2 – Simulações SA3, SA4 e SA5.....	73
4.3 – Simulações numéricas da fase de ressecamento.....	78
4.4 – Considerações finais.....	88

## **CAPÍTULO 5 – ANÁLISES NUMÉRICAS DO PROCESSO DE RESSECAMENTO DO REJEITO FINO DA MINERAÇÃO**

5.1 – Características gerais do projeto e operação do sistema de ressecamento de lama.....	90
5.2 – Análises numéricas do processo de ressecamento de lama.....	92
5.2.1 – Considerações iniciais.....	92
5.2.2 – Condições de contorno das análises AR1 e AR2.....	93
5.2.3 – Resultados das análises.....	95
5.3 – Considerações finais.....	100

## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

6.1 – Considerações finais.....	101
6.2 – Conclusões.....	101
6.3 – Sugestões para trabalhos futuros.....	103

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>105</b>
--	------------

## LISTA DE TABELAS

---

---

### **CAPÍTULO 3**

Tabela 3.1 – Características geotécnicas da lama.....	38
Tabela 3.2 – Características dos corpos de prova de lama submetidos aos ensaios HCT.....	59
Tabela 3.3 – Dados utilizados na análise dos parâmetros da lama.....	64
Tabela 3.4 - Parâmetros constitutivos das funções de compressibilidade e de permeabilidade dos corpos de prova da amostra de lama.....	65

### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4.1 – Dados de entrada para as simulações de adensamento SA1 e SA2.....	70
Tabela 4.2 – Resultados das simulações SA1 e SA2.....	71
Tabela 4.3 – Condições de contorno para a base da camada/simulações SA3 a SA5..	73
Tabela 4.4 – Resultados das simulações SA3 a SA5.....	75
Tabela 4.5 – Condições de contorno das simulações de ressecamento.....	78
Tabela 4.6 – Classificação das simulações de ressecamento.....	79
Tabela 4.7 – Resultados das simulações de ressecamento.....	80

### **CAPÍTULO 5**

Tabela 5.1 – Intervalos de tempo dos ciclos 1 e 2/ análises AR1 e AR2.....	93
Tabela 5.2 – Condições de contorno das fases de enchimento e de espera/ciclos 1 e 2.....	94

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Ilustração da associação dos processos de sedimentação, adensamento e ressecamento.....	6
Figura 2.2 – Curva de contração .....	10
Figura 2.3 – Camada de solo fino após o desenvolvimento das trincas.....	12
Figura 2.4 – Trajetórias de tensões total e efetiva do processo de ressecamento de um solo fino mole (Abu-Hejleh, 1993).....	15
Figura 2.5 – Esquema do ensaio de adensamento induzido por percolação (Botelho, 2001).....	21
Figura 2.6 – Eficiência de evaporação em um solo em função do tempo (Villar, 2002).....	26
Figura 2.7 – Estágios de enchimento.....	31

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Curva granulométrica da lama.....	38
Figura 3.2 – Área teste utilizada para o estudo do ressecamento de lama em campo (Silva, 2003).....	40
Figura 3.3 – Curva variação altura da camada de lama x tempo (Silva, 2003).....	41
Figura 3.4 – Variação do teor de umidade da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo de ressecamento (Silva, 2003).....	43
Figura 3.5 – Variação do teor de sólidos da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo de ressecamento (Silva, 2003).....	43
Figura 3.6 – Variação do peso específico natural da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo de ressecamento (Silva, 2003).....	44
Figura 3.7 – Variação do índice de vazios da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo de ressecamento (Silva, 2003).....	44
Figura 3.8 – Profundidade das trincas x tempo (Silva, 2003).....	46

Figura 3.9 – “Cracking function” (Silva, 2003).....	47
Figura 3.10 – Variação da carga piezométrica ao longo das fases de adensamento e ressecamento da lama (Silva, 2003).....	48
Figura 3.11 – Variação da taxa de evaporação ao longo da fase de ressecamento da lama (Silva, 2003).....	48
Figura 3.12 – Fase inicial do ensaio da contração livre.....	50
Figura 3.13 – Topo da amostra exposto às condições de temperatura do laboratório..	51
Figura 3.14 – Topo/lateral amostra expostos às condições de temperatura do laboratório.....	51
Figura 3.15 – Amostra de lama na fase final do ensaio da contração livre.....	52
Figura 3.16 – Curva da contração da lama.....	52
Figura 3.17 – Preparação do corpo de prova para a realização do ensaio HCT.....	55
Figura 3.18 – Configuração do sistema (célula triaxial e bomba de fluxo) para a realização do ensaio HCT.....	55
Figura 3.19 - Configuração do sistema na fase do carregamento.....	57
Figura 3.20 – Poropressão gerada na base do CP 01 durante o ensaio de adensamento induzido por percolação.....	60
Figura 3.21 – Poropressão gerada na base do CP 01 durante o ensaio da permeabilidade.....	60
Figura 3.22 – Poropressão gerada na base do CP 02 durante o ensaio de adensamento induzido por percolação.....	61
Figura 3.23 – Poropressão gerada na base do CP 02 durante o ensaio da permeabilidade.....	61
Figura 3.24 – Poropressão gerada na base do CP 03 durante o ensaio de adensamento induzido por percolação.....	62
Figura 3.25 – Poropressão gerada na base do CP 03 durante o ensaio da permeabilidade.....	62
Figura 3.26 – Curvas de compressibilidade da lama.....	66
Figura 3.27 – Curvas de permeabilidade da lama.....	67

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 – Curvas de recalque de campo e das simulações SA1 e SA2.....	72
Figura 4.2 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SA1 e SA2.....	72
Figura 4.3 – Curvas de recalque de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.....	76
Figura 4.4 – Perfis de índice de vazios de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.....	77
Figura 4.5 – Curvas de recalque de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4.....	82
Figura 4.6 – Curvas de recalque de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4.....	82
Figura 4.7 – Perfis de trincas de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4.....	83
Figura 4.8 – Perfis de trincas de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4.....	83
Figura 4.9 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 - fase inicial (dia 142).....	84
Figura 4.10 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 - fase inicial (dia 142).....	84
Figura 4.11 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 – fase intermediária (dia 180).....	85
Figura 4.12 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 – fase intermediária (dia 180).....	85
Figura 4.13 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 – fase final (dia 210).....	86
Figura 4.14 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 – fase final (dia 210).....	86

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1 – Baias de ressecamento de lama/Samarco Mineração S.A.....	91
Figura 5.2 – Curvas de enchimento (a) e de recalque (b) da análise AR1.....	96
Figura 5.3 – Curvas de enchimento (a) e de recalque (b) da análise AR1.....	97
Figura 5.4 – Perfil de índice de vazios da análise AR1.....	98
Figura 5.5 – Perfil de índice de vazios da análise AR2.....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

---

- A – área do corpo de prova de lama/ensaio HCT
- a – coordenada lagrangeana
- a, b, c e d – parâmetros da “cracking function”
- $A_1$ ,  $B_1$  e  $Z_1$  – parâmetros da relação constitutiva de compressibilidade para a contração unidimensional
- $A_2$ ,  $B_2$  e  $Z_2$  – parâmetros da relação constitutiva de compressibilidade para a contração tridimensional
- AR – análises numéricas de ressecamento
- C e D - parâmetros da relação constitutiva de permeabilidade
- CE – eficiência de evaporação
- CP – corpo de prova
- d – derivada
- e – índice de vazios
- E – taxa de evaporação
- $e_0$  – índice de vazios inicial
- $e_{00}$  – índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula
- $e_{cr}$  – índice de vazios na abertura da trinca
- $e_{cv}$  – índice de vazios de formação da crosta
- $e_{min}$  – índice de vazios correspondente ao limite de contração
- EP – evaporação potencial
- ER – evaporação real
- G – densidade real dos grãos da lama
- $H_0$  – altura inicial de uma corpo de prova/ensaio HCT ou de uma camada de lama
- HCT – ensaio de adensamento hidráulico ou induzido por percolação
- $H_f$  – altura final de de um corpo de prova/ensaio HCT
- $h_p$  – carga de poropressão na base da camada de lama
- $H_s$  – altura de sólidos de um corpo de prova/ensaio HCT ou de uma camada de lama
- k – coeficiente de permeabilidade

LC – limite de contração  
 LL – limite de liquidez  
 LP – limite de plasticidade  
 $m_0$  – massa inicial  
 $m_s$  – massa seca  
 $n$  – número de amostras de lama coletadas em campo  
 $P$  – teor de sólidos  
 $q$  – velocidade de fluxo/ensaio HCT  
 SA – simulações numéricas de adensamento  
 SR – simulações numéricas de ressecamento  
 $S_u$  – resistência ao cisalhamento não drenado  
 $t$  – tempo  
 TC – trinca de campo  
 $t_e$  – trajetória de tensão efetiva  
 TMS – tonelada métrica seca  
 $t_t$  – trajetória de tensão total  
 $v$  – velocidade darciniana  
 $w$  – teor de umidade gravimétrico  
 $\alpha$  - “ $\alpha$  function”. Relação entre o volume da coluna de solo trincado e a sua altura.  
 $\partial$  - derivada parcial  
 $\Delta H$  – altura das amostras de lama coletadas em campo  
 $\Delta u$  – poropressão  
 $\gamma_s$  – peso específico dos sólidos  
 $\gamma_w$  – peso específico da água  
 $\eta$  - parâmetro de evaporação das paredes da trinca  
 $\sigma_1$  – tensão principal  
 $\sigma_3$  – tensão confinante  
 $\sigma_{cr}$  – tensão vertical total na abertura da trinca  
 $\sigma'_{cr}$  – tensão vertical efetiva na abertura da trinca  
 $\sigma'_f$  – tensão efetiva na base do corpo de prova/ensaio HCT  
 $\sigma_h$  – tensão horizontal

$\sigma_t$  – resistência à tração do solo fino

$\sigma'_t$  – tensão produzida pelo pistão de acrílico/ensaio HCT

$\sigma_v$  – tensão vertical total

$\sigma'_v$  – tensão vertical efetiva

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 – Considerações iniciais

Durante o processo de beneficiamento do minério de ferro, uma grande quantidade de rejeito fino/lama é gerada. Este material, cujas características dependem das do material lavrado e da própria tecnologia empregada no processo de beneficiamento, é disposto hidráulicamente, com baixo teor de sólidos inicial, em estruturas de contenção/barragens de rejeito.

Nestas estruturas, após experimentar os processos da sedimentação e do adensamento por peso próprio e por percolação, o solo fino mole é submetido ao ressecamento por evaporação superficial, fenômeno que modifica as suas propriedades físicas, hidráulicas e de resistência. Com o ressecamento, há o aumento do teor de sólidos do solo fino, dado à retirada de água dos seus vazios, redução da permeabilidade e aumento da resistência. Assim, o ressecamento é extremamente vantajoso, pois, dentre outros inúmeros benefícios, aumenta a segurança e a capacidade de armazenamento de uma estrutura de disposição (Costa et al., 1999), maximizando a sua vida útil e minimizando os custos de sua desativação pela possibilidade de utilizar o material ressecado como cobertura.

Embora seja pouco considerada nas análises de ressecamento, a sedimentação também influencia este processo, pois as características iniciais da camada de solo fino mole formada dentro de um reservatório estão condicionadas a este fenômeno físico de deposição de partículas sólidas.

A fase do adensamento, que corresponde à dissipação da poropressão, se inicia mesmo antes de concluído o estágio de sedimentação, se estendendo até o início do

processo de ressecamento. Devido ao fato do solo fino mole apresentar um elevado índice de vazios inicial, ou seja, alta compressibilidade, o seu adensamento assume grandes proporções. Assim, na sua previsão, são empregados os conceitos da teoria do adensamento a grandes deformações (Gibson et al., 1967 e 1981).

O ressecamento se inicia com a exposição do topo da camada do solo fino mole às condições atmosféricas, quando, devido à retirada de água de seu interior, a camada começa a se contrair. Ele divide-se em dois estágios: de contração unidimensional, onde apenas deformações verticais são observadas e de contração tridimensional, onde deformações volumétricas significativas são observadas, principalmente após a abertura e propagação das trincas de ressecamento (Abu-Hejleh, 1993).

De acordo com os conceitos da resistência dos materiais, uma trinca começa a se desenvolver em uma camada de solo fino mole submetida ao ressecamento quando a tensão de tração originada em qualquer posição da mesma, devido ao fenômeno da contração, alcança a resistência à tração do solo. Após se desenvolver superficialmente, uma trinca de ressecamento se propaga na direção vertical à medida que o índice de vazios ao longo da profundidade alcança o valor correspondente ao índice de vazios de abertura da trinca –  $e_{cr}$  (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995). Assim, após a propagação de uma trinca no sentido vertical, tem-se a divisão da camada em dois trechos - trecho trincado e trecho não trincado/intacto. No trecho trincado, ocorrem as deformações tridimensionais, enquanto no trecho não trincado, as deformações são apenas verticais.

O processo de ressecamento é dominado por várias condições de contorno, sendo a evaporação e a drenagem de base as que mais influenciam a sua magnitude. Além disso, uma vez desencadeado, é um processo irreversível, mesmo sob condições atmosféricas adversas. A ocorrência de, por exemplo, uma precipitação pluviométrica durante o seu desenvolvimento, não faz uma camada já trincada retornar à sua configuração inicial, embora altere um pouco o seu perfil de teor de umidade, dado à infiltração de água pelo topo e pelas paredes laterais das trincas.

Devido à complexidade das soluções analíticas para o processo de ressecamento, vários modelos numéricos foram desenvolvidos no sentido de facilitar a análise deste fenômeno. Villar (2002) cita os modelos numéricos desenvolvidos por Casteleiro (1975), Johnson (1976), Cargill (1985) e Swarbrick e Fell (1992). Além desses, tem-se também o desenvolvido por Abu-Hejleh (1993), que de todos é o mais completo e

constituiu um importante avanço no estudo de ressecamento dos solos finos moles de alta compressibilidade.

O modelo proposto por Abu-Hejleh (1993) compreende as etapas da compressão unidimensional, da abertura e da propagação das trincas verticais e da contração tridimensional, sendo aplicado às análises de ressecamento de solos finos saturados e homogêneos.

Posteriormente, Yao e Znidarcic (1997) introduziram na equação do modelo de ressecamento de Abu-Hejleh (1993) uma parcela para quantificar a perda de água por evaporação durante as fases das contrações unidimensional e tridimensional. Esta introdução tornou as análises de ressecamento mais realistas, uma vez que a evaporação exerce papel preponderante no desenvolvimento deste processo. Esta nova relação foi implementada em um programa computacional denominado CONDES, que utiliza o método das diferenças finitas – MDF, através de uma aproximação central, para prover soluções às análises de ressecamento. Este programa foi utilizado no processo de validação da teoria do ressecamento, obtida através de procedimento experimental em centrífuga (Oliveira Filho, 1998), e tem se mostrado bastante eficiente para as análises de ressecamento dos solos finos moles, como os rejeitos finos da mineração de ferro.

## **1.2 – Objetivo do trabalho**

Este trabalho tem por objetivo calibrar o modelo de ressecamento proposto por Abu-Hejleh (1993) através do modelo computacional desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997) para a análise do processo de ressecamento do rejeito fino proveniente do beneficiamento do minério de ferro da Unidade de Germano/Samarco Mineração S.A.

Como o modelo teórico/numérico requer uma série de parâmetros do material e das condições de contorno sob as quais se desenvolve o processo de ressecamento, este trabalho de pesquisa se concentrou inicialmente na obtenção/definição destes dados.

Para a definição das condições de contorno e dos parâmetros constitutivos da lama, foram utilizados os dados de um estudo de ressecamento em campo (Silva, 2003) e os dados de ensaios de adensamento induzido por percolação (HCT) e de contração livre realizados ao longo deste trabalho.

Os dados de campo apresentados por Silva (2003), tais como recalque da camada, perfis de índice de vazios e de profundidade das trincas, foram comparados com os resultados encontrados nas simulações numéricas, a fim de se analisar a concordância entre os dados de ressecamento reais e os obtidos das análises via CONDES.

### **1.3 – Escopo do trabalho**

Para uma melhor compreensão deste trabalho de pesquisa, ele se encontra apresentado em seis capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral, destacando-se os principais fenômenos verificados no processo de ressecamento de um solo fino mole de alta compressibilidade, além do objetivo desta pesquisa e da forma de sua organização.

Dando continuidade, o segundo capítulo apresenta alguns conceitos e teorias envolvidas no processo de ressecamento, destacando-se o modelo desenvolvido por Abu-Hejleh (1993), algumas informações sobre os ensaios de laboratório realizados para a determinação dos parâmetros constitutivos do solo fino e as principais características do programa computacional CONDES.

O terceiro capítulo apresenta a caracterização geotécnica do rejeito fino, uma breve descrição do estudo de ressecamento em campo realizado por Silva (2003) e os resultados/análises dos dados dos ensaios de adensamento induzido por percolação e de contração livre. Ainda neste capítulo, ressaltam-se a obtenção dos parâmetros da “cracking function” e o valor do índice de vazios mínimo ( $e_{\text{mín}}$ ).

No quarto capítulo, são apresentadas as simulações realizadas para a calibração do modelo numérico de ressecamento. Esta etapa pode ser definida como o ponto principal deste trabalho, pois definiu os parâmetros constitutivos e demais dados representativos do ressecamento na condição real, verificada em campo. Uma vez calibrado, ou seja, definido o conjunto dos parâmetros do material e as condições de contorno que melhor representaram as condições de campo, o modelo numérico foi aplicado à avaliação do projeto de secagem de lama já implantado pela Samarco Mineração S.A, estando os resultados obtidos apresentados no quinto capítulo.

Finalmente, o sexto capítulo, apresenta as conclusões gerais deste trabalho, além de algumas recomendações para pesquisas futuras.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, se faz um resumo dos estudos existentes na literatura técnica sobre os processos físicos experimentados por um rejeito fino de alta compressibilidade após sua deposição em reservatórios, mais especificamente da fase de ressecamento. A abordagem compreende a descrição dos processos físicos, fundamentos teóricos e modelagem numérica. Destaque é dado às informações sobre o programa computacional CONDES, utilizado extensivamente nesta dissertação.

#### 2.1 Descrição dos processos físicos experimentados pelos rejeitos após deposição

Uma camada de solo fino, após ser lançada sob a forma de lama em um reservatório/barragem de disposição para ser submetida à secagem por evaporação superficial, estará sujeita aos processos de sedimentação, adensamento e ressecamento. Deve-se destacar que alguns destes fenômenos podem ocorrer até mesmo de forma associada ao longo do tempo, como apresentado na Figura 2.1.

Analisando-se a Figura 2.1, pode-se verificar que, após o lançamento da lama em um reservatório de disposição, a mesma é submetida, simultaneamente, aos processos da sedimentação e de adensamento. O primeiro fenômeno tende a se realizar de forma bem mais rápida que o processo de adensamento, cujo tempo de ocorrência depende das características do material e da espessura da camada. Em decorrência dos processos de sedimentação e adensamento, uma camada de água é formada no topo da lama. A espessura dessa camada sobrenadante é função das taxas de drenagem devidas aos processos referidos e da evaporação dominante no local. No estágio inicial e de médio termo, é mais provável que a espessura da camada de água aumente com o passar do

tempo. No entanto, mais tardiamente, com o processo de adensamento num estágio mais avançado, é mais provável que a taxa de evaporação exceda a drenagem da lama devido ao adensamento, fazendo com que a espessura da camada de água diminua no tempo.

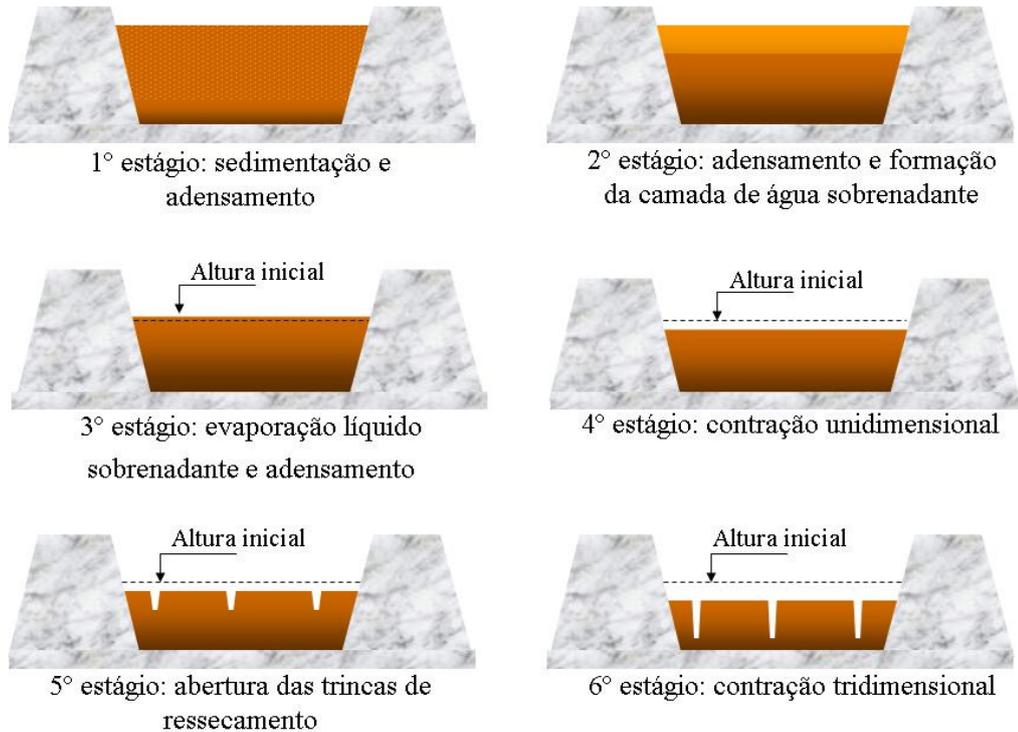


Figura 2.1 – Ilustração da associação dos processos de sedimentação, adensamento e ressecamento.

Concluída a evaporação da água sobrenadante, tem-se início a contração unidimensional da camada devido ao ressecamento por evaporação superficial. Este processo prevalece (ou pode inibir) sobre qualquer adensamento residual da camada até o desencadeamento da contração tridimensional e a consequente formação de trincas de ressecamento. Devido à contração tridimensional, as trincas de ressecamento se propagam em profundidade, dividindo a camada de lama em uma região trincada e em uma região não trincada. Essa linha divisória tende a avançar em profundidade com a continuidade do ressecamento até que o limite de contração da lama seja atingido. A partir desse limite, a lama experimenta um processo de desaturação sem variação

adicional de volume. Dependendo da espessura da camada, essa situação limite pode atingi-la integralmente, no caso de camadas finas, ou pode se circunscrever aos primeiros metros de um depósito espesso. Nesta última situação, a lama ressecada superficial pode até coroar um restante da camada ainda na condição subadensada (Abu-Hejheh e Znidarcic, 1995).

## **2.2 Aspectos gerais das teorias sobre os fenômenos**

Devido ao fato da lama ser lançada em um reservatório/barragem de disposição de rejeitos com baixo valor de teor de sólidos inicial, a sedimentação e o adensamento são responsáveis pela formação, dentro do espaço delimitado por estas estruturas, de um novo tipo de solo (Villar, 2002). Sabe-se que as características físicas e mecânicas de um solo, quando originado a partir da sedimentação, são influenciadas por este processo. Além disso, os fenômenos da sedimentação e do adensamento, na fase inicial do processo, são difíceis de serem identificados de maneira isolada, sendo utilizado, como parâmetro para a distinção entre eles, a ocorrência ou não de tensões efetivas. Segundo McRoberts e Nixon (1976), quando não há contato entre os grãos, quem controla a taxa de deposição é a sedimentação. Assim, a ocorrência de tensões efetivas constitui um marco de separação entre as fases de sedimentação/adensamento. Pane (1985) realizou estudos onde os dois fenômenos estão presentes.

Nas análises do adensamento de uma camada de lama, não se pode desprezar as deformações devidas ao seu peso próprio e às forças de percolação, no caso de drenagem pela base. Ao contrário, o recalque experimentado por esses materiais tende a ser bastante expressivo, requerendo, para as suas previsões uma teoria mais rigorosa que a convencional teoria infinitesimal de Terzaghi. Assim, o processo do adensamento de uma camada de lama deve ser analisado considerando-se a existência de deformações finitas, sobre a qual a Teoria de Gibson (Gibson et al., 1967 e 1981) é uma referência importante.

A fase da contração unidimensional pode ser considerada uma extensão do adensamento unidimensional, embora o fenômeno que a origina seja de natureza distinta. Enquanto o adensamento é consequência do peso próprio e, eventualmente, das forças de percolação, no ressecamento, são as forças capilares que provocam a

contração do solo, sejam elas provocadas pela evaporação superficial, sejam devido ao rebaixamento do lençol freático por drenagem pela base.

O processo de iniciação e propagação das trincas relacionado com a contração tridimensional foi objeto de vários trabalhos no passado, principalmente no tocante a morfologia e descrição das trincas. Em termos de análise, as teorias que abordam o fenômeno são muito mais recentes e se dividem em duas correntes de pesquisa. Uma delas usa a resistência dos materiais para justificar a propagação das trincas e a outra lança mão dos conceitos da mecânica das fraturas (Oliveira Filho, 1998; Konrad e Ayad, 1997a e 1997b). É na primeira linha de pesquisa que se insere esse trabalho.

### **2.3 – Adensamento a grandes deformações**

A teoria do adensamento a grandes deformações, também conhecida como teoria de adensamento com deformações finitas, foi desenvolvida para eliminar as não conformidades encontradas nas análises do adensamento de solos finos moles de alta compressibilidade que se baseavam na Teoria de Terzaghi. A Teoria de Terzaghi assume que a espessura de uma camada submetida ao adensamento é constante ao longo de todo o processo, ou seja, que as deformações verticais devidas à ocorrência do adensamento são insignificantes quando comparadas à altura inicial da camada. Entretanto, esta hipótese não pode ser aplicada nas análises do adensamento dos solos finos moles, onde grandes deformações em relação à espessura inicial da camada são originadas.

Como citado em Botelho (2001), Mikasa (1963) e Gibson et al. (1967) foram os que formularam importantes propostas para a definição da teoria do adensamento a grandes deformações, muito utilizada no estudo de adensamento de solos de finos moles como os rejeitos da mineração e os materiais dragados.

A teoria proposta por Gibson et al. (1967 e 1981) é a que melhor descreve a magnitude e o progresso do adensamento destes solos finos moles, sendo baseada nas seguintes hipóteses:

- meio saturado e constituído por três componentes – as partículas de solo, o esqueleto de solo formado por elas e os vazios preenchidos com água;

- completa interação entre o esqueleto de solo e os vazios preenchidos por água, ou seja, o princípio das tensões efetivas é válido;
- o fluido é newtoniano;
- a Lei de Darcy-Gersevanov governa o escoamento do fluido através do esqueleto de solo, sendo expressa em termos da velocidade relativa entre a água intersticial e as partículas sólidas;
- as partículas sólidas e a água que preenche os vazios do solo são incompressíveis;
- as massas das porções sólidas e fluidas do sistema são conservadas separadamente, não havendo interações químicas entre os seus constituintes.

A equação diferencial que governa o processo de adensamento a grandes deformações é dada por:

$$(1-G) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \frac{(1+e_0)}{(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] = \frac{1}{(1+e_0)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad 2.1$$

em que  $t$  é o tempo,  $a$  é a coordenada lagrangeana,  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $G$  é a densidade real dos grãos,  $e_0$  é o índice de vazios inicial,  $e$  é o índice de vazios em um tempo  $t$ ,  $k$  é o coeficiente de permeabilidade e  $\sigma'_v$  é a tensão efetiva vertical.

As relações constitutivas índice de vazios x tensão efetiva e índice de vazios x coeficiente de permeabilidade apresentadas na equação acima são definidas, respectivamente, como relações de compressibilidade e de permeabilidade, sendo representadas por vários modelos matemáticos, como os apresentados em Botelho (2001).

Deve-se destacar que a Equação 2.1 foi fundamentada no princípio da conservação da massa, considerando as condições de equilíbrio e continuidade do sistema, bem como o princípio das tensões efetivas e as relações de compressibilidade e permeabilidade do material. Devido ao fato do elemento de solo se deslocar no espaço durante o processo do adensamento, foi introduzido o sistema de coordenadas lagrangeanas ( $a$ ), de modo a facilitar a modelagem de problemas com contornos móveis.

Uma revisão sobre este sistema de coordenadas pode ser encontrada em Botelho (2001) e em Villar (2002).

## 2.4 - Contração dos solos finos

Quando um solo fino mole é submetido ao processo de ressecamento, as partículas sólidas do mesmo tendem a se aproximar umas das outras, devido à retirada da água dos poros. A este fenômeno dá-se o nome de contração do solo.

A dependência da contração com o teor de umidade é representada pela curva de contração, cuja forma geral se encontra apresentada na Figura 2.2.

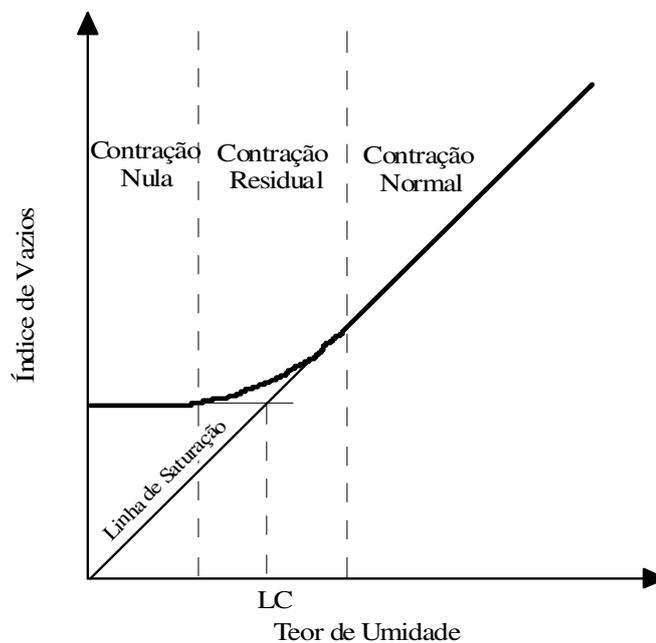


Figura 2.2 – Curva de contração.

A partir da curva apresentada na Figura 2.2, nota-se que a contração de um solo pode ser dividida em três fases: normal, residual e nula.

Na fase da contração normal, a perda de água é igual à variação de volume devida ao ressecamento. O solo fino mole permanece saturado, coincidindo o trecho da curva de contração com a chamada linha de saturação. Já na fase da contração residual, a perda de água devida ao ressecamento é maior que a redução de volume. Nesta etapa, há

entrada de ar pelo interior do solo, passando o mesmo a ocupar os vazios antes preenchidos pela água.

Finalmente, na fase da contração nula, nenhuma variação significativa de volume é observada no solo, apesar da perda de água ainda ocorrer.

O teor de umidade a partir do qual o solo fino mole começa a se desaturar é definido como limite de contração (LC) e pode ser obtido a partir da interseção dos prolongamentos dos trechos que caracterizam as fases das contrações normal e nula, como indicado na Figura 2.2. Assim, o limite de contração pode ser considerado como a fronteira entre as condições saturada e não saturada.

Mitchell (1976) mostrou que a magnitude da contração é dependente do tipo e porcentagem de mineral argiloso do solo submetido ao ressecamento, do seu teor de umidade volumétrico inicial, da tensão confinante a ele aplicada e do arranjo de suas partículas. Um outro fator que muito influencia a magnitude da contração de um solo é a sua plasticidade. Além disso, argilas com estrutura dispersa apresentam contração maior do que argilas com estrutura flokulada, desde que ambas possuam o mesmo teor de umidade inicial.

De acordo com Fox (1964), a contração normal continua ao longo de uma extensa faixa de teor de umidade volumétrico e a contração residual só tem início, no caso de solos finos, com uma sucção em torno de 1MPa. Logo, pode-se concluir que, mesmo para valores elevados de sucção, um solo fino ainda pode se encontrar na condição saturada.

## **2.5 – Trincas de ressecamento**

Do ponto de vista da resistência dos materiais, as trincas de ressecamento surgem em uma camada de solo fino quando as tensões de tração originadas na mesma, devido ao fenômeno da contração, excedem a resistência à tração do solo. Após se desenvolverem na região superficial de uma camada, as trincas se propagam verticalmente à medida que os índices de vazios ao longo da profundidade da mesma alcançam um valor limite, denominado índice de vazios na abertura da trinca –  $e_{cr}$ . Este valor varia com a profundidade da camada, sendo dependente da tensão vertical aplicada em uma determinada elevação.

A Figura 2.3 apresenta a configuração de uma camada de solo fino submetida ao ressecamento após o desenvolvimento das trincas.

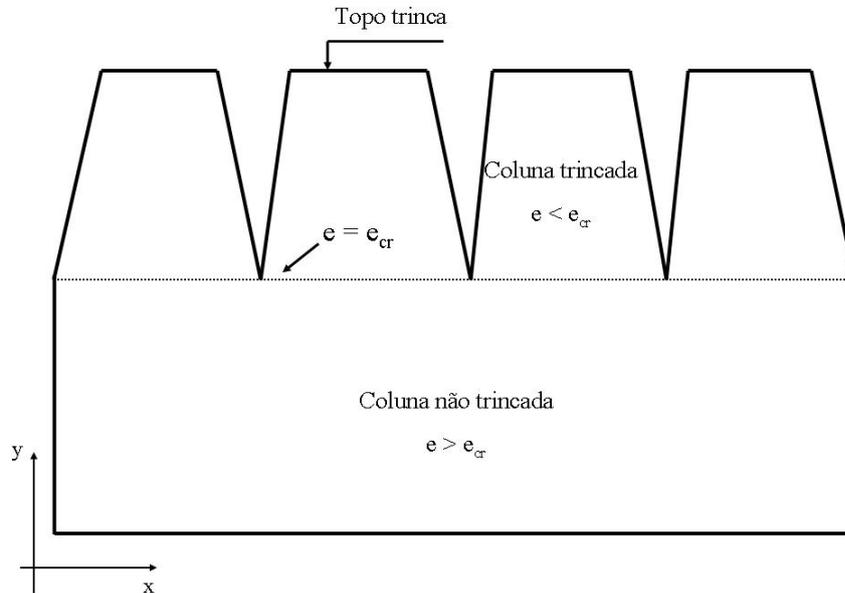


Figura 2.3 – Camada de solo fino após o desenvolvimento das trincas.

Analisando-se a Figura 2.3, pode-se concluir que, com o avanço das trincas em profundidade, a camada de solo fino é dividida em duas partes – coluna trincada e coluna não trincada ou intacta. Ao longo da coluna trincada, onde  $e < e_{cr}$ , predomina o ressecamento devido à contração tridimensional, enquanto que, na coluna não trincada, região com  $e > e_{cr}$ , o processo de secagem produz apenas contração vertical.

As trincas de contração são classificadas como primárias e secundárias. As trincas primárias são originadas pela concentração de tensões em locais da camada de solo com baixa resistência. Com a abertura das trincas primárias, há um alívio de tensões ao redor das mesmas, fazendo com que as tensões máximas passem a atuar na direção perpendicular às tensões que deram origem a elas. Esta inversão de direção de tensões provoca o desenvolvimento das trincas secundárias, que são perpendiculares às primárias. O desenvolvimento destas trincas divide uma extensa área de solo fino submetido ao ressecamento em pequenas áreas, formando polígonos. De acordo com Corte e Higashi (1964), quanto menor a espessura da camada de solo, maior é o número de lados dos polígonos e menor o seu tamanho.

Deve-se destacar que o início e a propagação das trincas de ressecamento em uma camada de solo fino são dependentes, também, da resistência ao cisalhamento deste material. Em camadas de solos finos sem ou com resistência ao cisalhamento desprezível, as trincas de ressecamento não se desenvolvem ou são fechadas logo depois de originadas, dado ao fato da coluna trincada não suportar nem o seu próprio peso.

Existem poucas informações e técnicas de ensaios disponíveis na mecânica dos solos para a determinação da resistência à tração dos solos. Entretanto, Abu-Hejleh (1993) estabeleceu a seguinte relação entre a resistência à tração de um solo fino ( $\sigma_t$ ) e a sua resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ):

$$\sigma_t = F.S_u \quad 2.2$$

em que F é um fator determinado experimentalmente, dependente das características físicas e de resistência do material.

Lau (1987), observando as trincas de contração originadas durante um estudo em um pavimento de solo/cimento, concluiu que a intensidade das trincas varia proporcionalmente com a porcentagem de argila e que altas taxas de evaporação podem levar ao aparecimento de trincas com profundidade, espessura e amplitude substanciais.

## **2.6 – Modelo de ressecamento de solos finos proposto por Abu-Hejleh (1993)**

O modelo de ressecamento de solos finos proposto por Abu-Hejleh (1993) compreende os quatro processos a que uma camada de solo fino mole fica submetida no campo após a sua disposição/sedimentação: o adensamento sob compressão unidimensional, o ressecamento devido à contração unidimensional, a abertura e a propagação das trincas verticais e o ressecamento devido à contração tridimensional.

No modelo, são adotadas as seguintes hipóteses:

- O solo fino mole submetido ao ressecamento permanece saturado até o seu índice de vazios atingir o índice de vazios correspondente ao limite de contração –  $e_{\text{mín}}$ . Quando o solo alcança este valor, ele começa a se desaturar, não podendo mais o processo de seu ressecamento ser modelado por esta teoria.

- O solo fino é homogêneo, ou seja, suas propriedades não variam nas direções horizontal e vertical. Assim, as trincas de ressecamento são originadas, simultaneamente, em diferentes posições, atingindo, após se propagarem verticalmente, a mesma profundidade. Ao final do processo do ressecamento, têm-se trincas de profundidade e espaçamento uniformes.

- O fluxo de água unidimensional, correspondente à perda de massa, dá origem a deformações verticais/laterais somente durante o ressecamento devido à contração tridimensional. Durante o adensamento sob compressão unidimensional e o ressecamento devido à contração unidimensional, somente deformações verticais são originadas.

A Figura 2.4 apresenta, em forma de trajetórias de tensões total e efetiva, as diferentes fases do processo de ressecamento de um solo fino mole modeladas por Abu-Hejleh (1993). Deve-se destacar que estas trajetórias foram definidas para um elemento submetido a um mesmo nível de tensão vertical total, situado em uma elevação específica da camada do solo fino mole. Assim, a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) corresponde ao valor da tensão vertical a que a camada do solo está submetida nesta determinada profundidade, enquanto a menor ( $\sigma_3$ ), também conhecida como confinante, assume o valor da tensão horizontal.

Analisando-se as trajetórias de tensão total (tt) e tensão efetiva (te) apresentadas na Figura 2.4, pode-se notar que, na fase inicial do ressecamento, a tensão efetiva do solo fino mole é nula, sendo o valor da tensão total igual ao da poropressão – ponto W. Com a continuidade do processo, tem-se a dissipação/ decréscimo da poropressão. Durante as fases do adensamento e do ressecamento unidimensional, a deformação lateral é nula, pois não há nenhuma variação da tensão efetiva vertical. A trajetória de tensão efetiva, então, segue a linha  $k_0$ , indicando somente a existência de deformações verticais. Enquanto isso, a trajetória de tensão total apresenta o alívio das tensões horizontais totais devido à diminuição da poropressão. Ao longo dos trechos WK (tt) e OK (te), a poropressão é positiva, indicando a ocorrência do adensamento sob compressão unidimensional, enquanto que, ao longo dos trechos KM (tt) e KB (te), onde a poropressão é negativa (sucção), há a ocorrência do ressecamento devido à contração unidimensional.

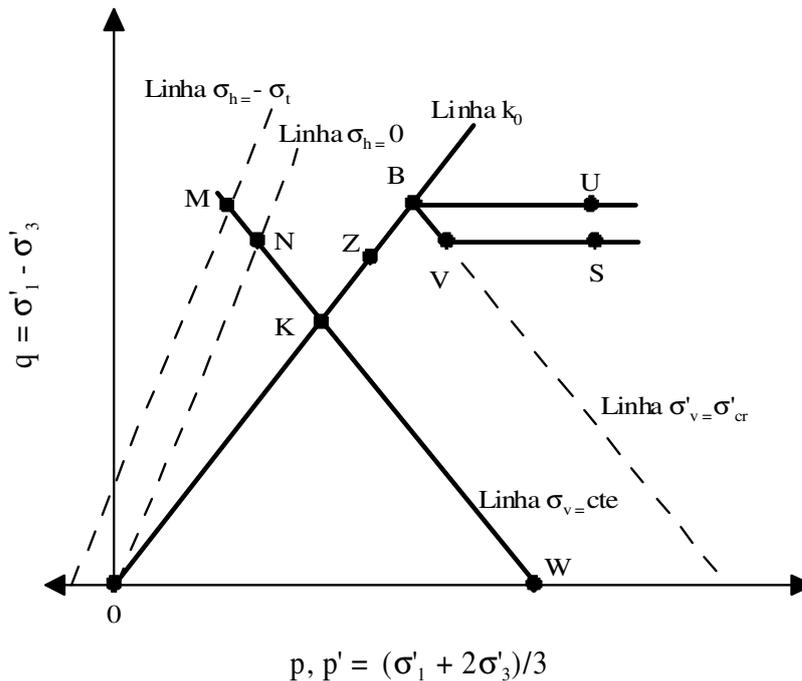


Figura 2.4 – Trajetórias de tensões total e efetiva do processo de ressecamento de um solo fino mole (Abu-Hejleh, 1993).

Como visto no item 2.5, uma trinca começa a se desenvolver, teoricamente, assim que a tensão de tração nela originada se iguala à resistência à tração do solo. Assim, se o solo não possuir nenhuma resistência à tração, as trincas se abrirão no ponto N (tt), onde a tensão lateral total é nula. Caso contrário, será necessária uma sucção mais elevada para a abertura da trinca, que abrirá no ponto M (tt), onde a tensão horizontal total se iguala à resistência à tração do solo. Este momento pode também ser representado pelo ponto B (te). Após o desenvolvimento da trinca, haverá o alívio das tensões de tração lateral total e efetiva, como pode ser visto, respectivamente, nos trechos MN (tt) e BV (te). Nestes trechos, não são verificadas deformações volumétricas significativas, embora um processo de descarregamento ocorra. No ponto N (tt), as tensões de tração laterais totais se anulam e a trinca abre completamente. Nesta fase, a trinca se propaga em profundidade até o índice de vazios do solo fino atingir o valor do índice de vazios na abertura da trinca -  $e_{cr}$ .

O trecho BU (te) representa a condição de contração tridimensional livre e isotrópica da parte trincada da camada, atribuída somente à variação da sucção. Caso

sejam desprezadas as deformações volumétricas originadas com a abertura da trinca, a trajetória das tensões efetivas para a contração tridimensional pode ser representada pelo trecho VS (te).

O modelo matemático proposto por Abu-Hejleh (1993) para representar o fenômeno do ressecamento é dividido em duas fases: compressão unidimensional e compressão tridimensional. A fase da compressão unidimensional, onde são observadas apenas deformações verticais, envolve o fenômeno do adensamento e a contração unidimensional devida à secagem do solo fino mole. Já a fase da compressão tridimensional, é caracterizada pelas deformações tridimensionais devidas à formação e propagação das trincas de ressecamento.

### **2.6.1 – Modelagem da fase da compressão unidimensional**

A equação utilizada por Abu-Hejleh (1993) para representar a compressão unidimensional devida aos processos do adensamento e do ressecamento é similar à derivada por Gibson, assumindo a forma geral expressa na Equação 2.1.

A seguinte relação de compressibilidade foi adotada por Liu e Znidarcic (1991) para a fase do adensamento unidimensional:

$$e = A_1(\sigma'_v + Z_1)^{B_1} \quad 2.3$$

em que  $e$  é o índice de vazios,  $\sigma'_v$  é a tensão efetiva vertical e  $A_1$ ,  $B_1$  e  $Z_1$  são coeficientes empíricos, obtidos do ensaio HCT.  $Z_1$  tem a mesma unidade da tensão efetiva e  $A_1$ , a unidade inversa a ela.  $B_1$  é adimensional.

Para a relação de permeabilidade foi adotada a relação de potência (Somogy, 1971):

$$k = Ce^D \quad 2.4$$

em que  $k$  é o coeficiente de permeabilidade e  $C$  e  $D$  são coeficientes empíricos obtidos do ensaio HCT.  $C$  tem a mesma unidade do coeficiente de permeabilidade, enquanto  $D$  é adimensional.

Como não há modelos disponíveis na literatura, Abu-Hejleh (1993) adotou como relações para este processo as mesmas relações de compressibilidade e permeabilidade utilizadas no modelamento do adensamento unidimensional.

### 2.6.2 - Modelagem da fase da compressão tridimensional

Baseado na Teoria de Gibson et al. (1967 e 1981), Abu-Hejleh (1993) propôs uma equação para o processo de ressecamento devido à compressão tridimensional. Posteriormente, Yao e Znidarcic (1997) introduziram nesta equação uma parcela para considerar, nas análises de ressecamento, a perda de água que também ocorre pelas paredes da trinca, passando a mesma a apresentar a seguinte forma:

$$(1-G) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \frac{\alpha(1+e_{cr})}{(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] + \frac{\partial}{\partial e} \left[ \frac{k(e+G)}{(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de_{cr}} \frac{\partial e_{cr}}{\partial a} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \eta E \frac{\partial \alpha}{\partial a} = \frac{1}{\alpha(1+e_{cr})} \frac{\partial e}{\partial t} \quad 2.5$$

em que  $t$  é o tempo,  $a$  é a coordenada lagrangeana,  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $G$  é a densidade real dos grãos,  $e_{cr}$  é o índice de vazios na abertura da trinca,  $e$  é o índice de vazios em um tempo  $t$ ,  $k$  é coeficiente de permeabilidade,  $\sigma'_v$  é a tensão efetiva vertical,  $\alpha$  é a “ $\alpha$  function”,  $E$  é a taxa de evaporação e  $\eta$  é o parâmetro de evaporação das paredes da trinca.

Deve-se destacar que a parcela  $\eta E \frac{\partial \alpha}{\partial a}$  foi introduzida por Yao e Znidarcic (1997) para levar em conta o efeito da evaporação nas paredes laterais da trinca

O índice de vazios no instante da abertura da trinca relaciona-se com a tensão vertical total através da “cracking function”. Esta relação pode ser obtida experimentalmente através de ensaio de laboratório ou de observações de campo.

A “ $\alpha$  function” foi introduzida no modelo para descrever a geometria das trincas desde o momento em que a contração tridimensional livre se inicia até um determinado índice de vazios  $e$ . É calculada pela relação entre o volume da coluna de solo trincada e a sua altura, sendo expressa em unidade de área.

Para a “cracking function” e para a “ $\alpha$  function” da Equação 2.5, Yao e Znidarcic (1997) desenvolveram as seguintes funções empíricas:

$$e_{cr} = \frac{1}{d} + \frac{1}{(b\sigma_{cr} + a)^c} \quad 2.6$$

$$\alpha = \frac{1+e}{1 + \frac{2}{3}e_{cr} + \frac{1}{3}e} \quad 2.7$$

em que  $\sigma_{cr}$  é a tensão vertical na abertura da trinca,  $e_{cr}$  é o índice de vazios na abertura da trinca,  $e$  é o índice de vazios e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  – parâmetros da equação, determinados experimentalmente (ver item 2.7.4).

Em estágios mais avançados do processo do ressecamento, a perda de água por evaporação ocorre não só a partir do topo da camada de solo fino, mas também através das paredes laterais das trincas. Entretanto, quantificar o fluxo evaporativo a partir destas regiões é muito complexo, dadas as diversas condições de contorno que influenciam a transferência de água do interior do solo para a atmosfera, como as profundidades/larguras das trincas, velocidade do vento no topo da camada, gradiente de temperatura e teor de umidade do material. Assim, para que a perda de água através das paredes laterais das trincas seja considerada nas análises do ressecamento, foi introduzido, na Equação 2.5, o parâmetro  $\eta$ . Este parâmetro multiplica a taxa de evaporação imposta sobre o topo da camada e é específico do local onde se dá o ressecamento, variando em função do clima e das configurações das próprias trincas (Yao et al., 2002).

Como relação de compressibilidade para o ressecamento tridimensional, foi adotada uma relação exponencial expandida do caso do adensamento unidimensional, expressa pela Equação 2.8.

$$e = A_2(\sigma'_v + Z_2)^{B_2} \quad 2.8$$

em que  $A_2$ ,  $B_2$  e  $Z_2$  são parâmetros empíricos, determinados a partir do ensaio da sucção.

Segundo Abu-Hejleh (1995), a relação constitutiva de permeabilidade durante a contração tridimensional é assumida como a mesma da contração unidimensional.

Finalmente toda esta teoria foi implementada primeiramente em um programa computacional de elementos finitos não lineares denominado CADA – “Consolidation And Desiccation Analysis”, e demonstrou boa eficiência nas análises da secagem de uma lama disposta em uma área hipotética (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995), possibilitando um grande avanço aos estudos de ressecamento de solos finos moles de alta compressibilidade. Posteriormente, a contribuição de Yao e Znidarcic (1997) sobre a evaporação pelas paredes e topo das trincas deu origem a um programa computacional de diferenças finitas chamado CONDES, que foi usado na validação da teoria de ressecamento (Oliveira Filho, 1998).

## **2.7 - Ensaio de laboratório empregados na determinação das relações e propriedades constitutivas de um solo fino mole**

Como visto na seção anterior, as relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade para as fases do adensamento e do ressecamento, a “cracking function”, e a “ $\alpha$  function”, além das informações sobre contração de um solo fino mole, são essenciais para a avaliação do seu processo de secagem a partir do modelo desenvolvido por Abu-Hejleh (1993). Todas essas funções e parâmetros podem ser obtidos experimentalmente, a partir dos ensaios de laboratório como os apresentados nos itens a seguir.

### **2.7.1 – Ensaio da contração livre**

O ensaio da contração livre – “free shrinkage test”, foi desenvolvido por Abu-Hejleh (1993) para determinar a curva de contração e estimar a “ $\alpha$  function” do solo fino mole utilizado na modelagem da teoria do ressecamento.

É um ensaio de simples execução e consiste em se colocar uma amostra representativa do solo fino mole em um recipiente cilíndrico com, aproximadamente, 5cm de altura e 10cm de diâmetro, e deixá-la contrair livremente.

Durante o período de tempo em que a amostra se contrai por evaporação, medidas constantes de sua massa, altura e diâmetro devem ser realizadas, a fim de que as variações do seu teor de umidade e de seu volume de água possam ser obtidas. O final do ensaio se dá, quando, após várias medidas sucessivas, não mais se verifica mudanças significativas de massa e volume da amostra. Concluído o ensaio, a amostra é submetida à secagem em estufa, para que a sua massa seca seja determinada.

Uma vez assegurado que o volume de sólidos se manteve constante ao longo do período do ensaio, a diferença entre os volumes inicial e final da amostra, obtida após a sua secagem em estufa, expressa a quantidade de água que dela foi extraída.

A partir dos dados coletados, pode-se traçar a curva de contração do solo, de onde se obtém o índice de vazios correspondente ao limite de contração do solo –  $e_{\text{mín}}$ , bem como se determinar a relação entre o volume de uma coluna de solo trincado e a sua altura, ou seja, uma estimativa para a “ $\alpha$  function”.

### **2.7.2 – Ensaio do adensamento induzido por percolação**

O ensaio do adensamento induzido por percolação, “Seepage Induced Consolidation Test” – é uma técnica baseada no conceito do adensamento hidráulico, conhecida no Brasil como HCT, e fornece dados confiáveis para a estimativa das relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade correspondentes à fase do adensamento de um solo fino mole.

O conjunto de equipamentos necessário à sua execução se encontra apresentado na Figura 2.5 (Botelho 2001), sendo composto pela célula triaxial modificada, pela

bomba de fluxo, pelo painel de controle de pressão, pelo transdutor diferencial de pressão e pelos sistemas de carregamento e de aquisição de dados.

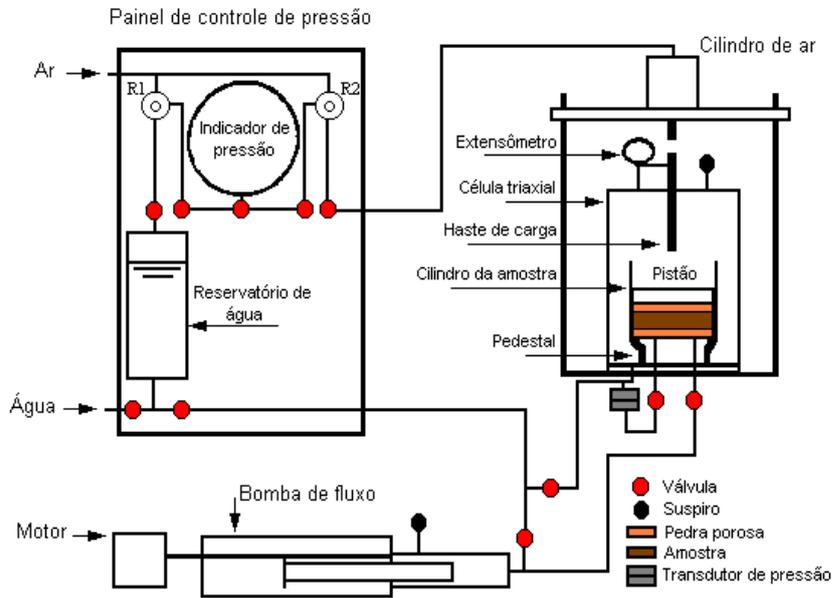


Figura 2.5 – Esquema do ensaio do adensamento induzido por percolação (Botelho, 2001).

A técnica do ensaio consiste na aplicação de uma força de percolação descendente, imposta pela bomba de fluxo, a um corpo de prova do solo fino mole, provocando um fluxo constante ao longo de toda a sua extensão e, em conseqüência, o seu adensamento. Concluída a fase do adensamento induzido por percolação, inicia-se a fase do carregamento do corpo de prova, realizada como num estágio de adensamento edométrico convencional, sendo o ensaio concluído com a etapa da permeabilidade, que é realizada sob velocidade de percolação, também imposta pela bomba de fluxo. Durante as etapas de adensamento induzido por percolação e de permeabilidade, a poropressão gerada na base do corpo de prova é medida por um transdutor diferencial de pressão.

As relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade do adensamento são determinadas nas condições de regime permanente do ensaio, a partir de uma análise implementada no programa SICTA, desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992).

Maiores informações sobre os métodos de execução e sobre as análises dos dados de um ensaio HCT serão apresentados no Capítulo 3.

De acordo com Botelho (2001), o ensaio HCT tal como sugerido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992) é eficiente e conveniente, resultando em economia de tempo quando comparado aos outros disponíveis na literatura para a determinação das funções de compressibilidade e permeabilidade de um solo fino mole. Além disso, ele permite a determinação das características de adensamento para uma ampla faixa de tensões efetivas.

### **2.7.3 – Ensaio da Sucção**

O ensaio da sucção permite a definição das relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade correspondentes à fase do ressecamento de um solo fino mole (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1995).

Neste ensaio, a água é retirada da base de um corpo de prova colocado no interior de um oedômetro a uma velocidade constante, controlada pela bomba de fluxo. Em consequência, um menisco capilar é criado no topo do corpo de prova, aumentando a tensão efetiva e a correspondente compressão do mesmo. Como o corpo de prova permanece saturado durante todo o ensaio, a sua variação de volume é igual ao volume de água retirado, sendo esta variação utilizada na determinação do seu índice de vazios médio em vários instantes do ensaio. A sucção na base do corpo de prova é também medida em vários instantes do ensaio por um transdutor de pressão, para a determinação da tensão efetiva nesta posição. Para uma baixa vazão de fluxo, a tensão efetiva ao longo do corpo de prova é uniforme, possibilitando a determinação direta da relação tensão efetiva x índice de vazios para o ressecamento.

Obtida a relação de compressibilidade, a velocidade de retirada de água é maximizada, de modo a produzir um gradiente de pressão significativo no interior do corpo de prova. Como este gradiente depende da característica de permeabilidade do solo fino mole, os dados obtidos durante esta etapa do ensaio são utilizados, em associação com a relação constitutiva de compressibilidade, na estimativa indireta da relação constitutiva de permeabilidade.

#### **2.7.4 – Ensaios para a determinação da “cracking function”**

A “cracking function” pode ser obtida a partir do ensaio de ressecamento em uma centrífuga, como realizado por Oliveira Filho (1998). A grande vantagem da centrífuga é que ela permite a imposição sobre uma amostra de solo de um nível de tensão correspondente à condição de campo, fazendo com que as trincas se propaguem gradualmente ao longo da mesma. Durante a realização do ensaio, as aberturas e profundidades das trincas, além das tensões totais e sucções desenvolvidas, são determinadas de modo preciso. Além de Oliveira Filho (1998), maiores informações sobre este ensaio podem também ser encontradas em Znidarcic et al. (2000).

Silva (2003) encontrou uma relação satisfatória para a “cracking function” ao monitorar os índices de vazios e as tensões verticais a eles correspondentes no momento da abertura da trinca numa área teste onde se depositou um rejeito fino da mineração. Assim, demonstrou que, assegurado um controle preciso sobre o monitoramento do fenômeno de propagação das trincas, a “cracking function” pode também ser estimada a partir de uma experiência de campo.

#### **2.7.5 Conclusões preliminares sobre algumas relações constitutivas**

Abu-Hejleh e Znidarcic (1995), ao analisarem as funções de compressibilidade e permeabilidade correspondentes ao adensamento e ao ressecamento do solo fino mole utilizado na modelamento da teoria proposta por Abu-Hejleh (1993), observaram que, apesar das mesmas terem sido obtidas, respectivamente, dos ensaios HCT e da sucção, possuíam um comportamento idêntico, ou seja, parâmetros iguais. Assim, utilizaram nas análises de ressecamento por eles realizadas, somente os parâmetros obtidos dos ensaios HCT, independentemente da fase do processo que estivessem avaliando.

Posteriormente, Znidarcic et al. (2000), ao compararem, também, os resultados dos ensaios HCT e da sucção para as funções de compressibilidade das fases do adensamento e do ressecamento de uma argila fosfática, identificaram a igualdade entre os parâmetros obtidos. Resultados similares já haviam sido reportados por Oliveira Filho (1998) para a Georgia Kaolin.

Assim, supõe-se que, independentemente das fases do processo do ressecamento, os parâmetros das relações constitutivas de permeabilidade e compressibilidade sejam, praticamente, os mesmos. Entretanto, esta hipótese deve ser analisada cuidadosamente antes de ser generalizada a todos os tipos de solo fino mole de alta compressibilidade. Recomenda-se que, antes da realização de qualquer análise, as características do solo fino mole que será submetido ao ressecamento sejam comparadas com as dos solos que deram origem a esta hipótese.

## **2.8 – A influência da evaporação no processo de ressecamento de um solo fino mole**

Evaporação é o processo pelo qual a água é convertida de líquido para vapor. Também denominada vaporização, necessita de energia para fazer a conversão entre estes estados físicos, sendo a mesma fornecida pela radiação solar, pelo calor captado através do contato fluido/atmosfera ou pelo calor armazenado no próprio corpo da água. Sua magnitude depende, dentre outros fatores, da velocidade do vento, da latitude, da estação do ano, hora do dia e condição do céu, da pressão atmosférica e da qualidade da água. Devido aos inúmeros fatores que influenciam a sua magnitude, as taxas de evaporação são de difícil determinação.

De acordo com Villar (2002), para um determinado grupo de condições de contorno, a evaporação ocorrerá de uma superfície de água livre ou de um solo em uma temperatura específica na proporção da diferença entre a chamada pressão de vapor de saturação da superfície de água, ou daquela de onde a massa líquida estiver contida, e a pressão de vapor do ar acima desta superfície. O mecanismo de transporte de moléculas de água continuará até que as pressões nos dois meios se igualem.

A pressão de vapor pode ser entendida como a diferença entre as pressões exercidas pelo ar úmido e pelo ar seco, ou seja, a pressão parcial do vapor de água na atmosfera. Já a pressão de vapor de saturação, é a pressão máxima em um espaço saturado, sendo função apenas da temperatura.

No contato do ar imediatamente próximo a uma superfície de água, condensação e vaporização podem ocorrer ao mesmo tempo. Se o ar próximo à superfície da água estiver não saturado, a taxa de evaporação excederá a de condensação, resultando em uma evaporação efetiva. Já em um espaço saturado, as duas taxas, mantidas iguais às

temperaturas da água e do ar, se compensam. A vaporização remove calor do líquido, enquanto a condensação adiciona (Villar, 2002).

Vários são os métodos utilizados para a estimativa da evaporação. Dentre eles, se destacam as aproximações por balanço hídrico, energético ou aerodinâmico e a estimativa por tanques, muito utilizada na determinação de taxas de evaporação de reservatórios reais. Maiores informações sobre estes métodos podem ser encontradas em Villar (2002) e Silva (2003).

Sabe-se que a evaporação pode ocorrer, também, a partir de um solo úmido. De acordo com Linsley et al. (1978), a taxa de fluxo evaporativo partindo de uma superfície de solo saturado é aproximadamente a mesma de uma superfície de água livre adjacente, na mesma temperatura. Assim, os métodos desenvolvidos para a sua estimativa a partir de um reservatório podem ser aplicados, após alguns ajustes e análises, na estimativa da evaporação a partir da superfície de um solo. Entretanto, deve-se destacar que estes métodos fornecem somente a estimativa da evaporação potencial, sendo que a taxa real na superfície de um solo, principalmente quando este se encontra na condição não saturada, é muito menor que o potencial de evaporação (Wilson et al., 1993).

### **2.8.1 – Evaporação potencial x evaporação real**

A evaporação potencial (EP) é considerada como a máxima taxa de transferência de vapor que ocorre entre uma superfície livre de água e a atmosfera, sob dadas condições climáticas. É verificada em um solo quando se tem água livre suficiente sobre a sua superfície. A evaporação real (ER), também classificada como efetiva ou atual, é a verificada em estágios mais avançados do processo de secagem, quando o solo começa a perder água dos vazios, ou seja, a se desaturar. Apresenta a tendência de diminuir exponencialmente com o tempo, dado o rebaixamento do nível de água (NA) e a formação da crosta de ressecamento no topo da camada de solo, que dificulta a passagem de água de seu interior para a atmosfera.

Definindo-se como eficiência de evaporação (CE) a relação entre a evaporação real e potencial pode-se avaliar a variação do fluxo evaporativo de um solo a partir da Figura 2.6.

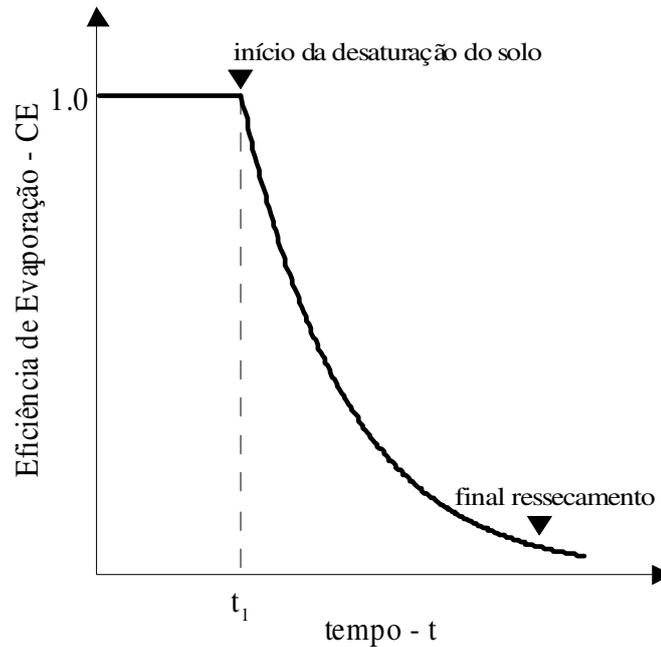


Figura 2.6 – Eficiência de evaporação em um solo em função do tempo.

Avaliando-se a Figura 2.6, pode-se perceber que, em um primeiro estágio, onde há água livre suficiente sobre a superfície do solo, a evaporação potencial é igual à real, ou seja,  $CE=1$ . A partir de  $t_1$ , instante de tempo no qual o solo começa a se desaturar, inicia-se o segundo estágio, onde a evaporação real apresenta um decréscimo com o aumento do tempo, assumindo CE valores cada vez menores que 1. A taxa de evaporação real continuará a decrescer até CE apresentar um valor próximo a zero, situação que caracteriza a existência de um pequeno fluxo evaporativo ou até mesmo a interrupção deste processo.

De acordo com Villar (2002), existem vários métodos para o cálculo do fluxo evaporativo a partir da superfície de um solo. Dentre eles, pode-se citar os de Penman (1948), Thornthwaite (1948), Turc (1954), Crowe (1957) e de Wilson et al.(1993). O método de Wilson et al. é, na realidade, uma modificação do de Penman. Ele calcula a evaporação com base na pressão de vapor real da superfície do solo e em processos de transferência de calor e massa acoplados no perfil abaixo do contorno atmosfera-solo, sendo muito utilizado na obtenção da taxa real de evaporação de superfícies de solos não saturados e sem cobertura vegetal.

## **2.9 – Algoritmo numérico para as análises de adensamento unidimensional a grandes deformações e de ressecamento de solos finos moles – CONDES**

### **2.9.1 – Características gerais do CONDES**

Desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997), o CONDES é um programa computacional empregado na solução das equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem que modelam os processos de adensamento e ressecamento de solos finos moles em termos da variável primária, índice de vazios.

Utilizando o método das diferenças finitas (MDF), através de uma aproximação central, esse programa escrito em linguagem de programação FORTRAN fornece a distribuição do índice de vazios ao longo da camada de solo em instantes de tempo fornecidos pelo usuário na definição da marcha no tempo. Como variáveis secundárias são fornecidas: a distribuição das poropressões ao longo da camada, a altura da camada de solo, a espessura da camada, a geometria das trincas de ressecamento, o teor de sólidos e o peso específico seco médio em cada instante.

O programa CONDES utiliza uma plataforma DOS e necessita, para a sua execução, de um arquivo do tipo DOSXMF.EXE. Os dados relativos às características do material, condições de contorno e evolução no tempo são fornecidos através de um arquivo de entrada tipo texto não formatado.

É um software numérico muito flexível e incorpora uma interface de entrada que permite a um usuário simular uma variedade de condições de campo, incluindo distribuição de índices de vazios inicial, estágios de enchimento e diversas condições de contorno. Além disso, dispõe de uma equação particular para realizar a simulação na fronteira entre solo trincado/não trincado e de um algoritmo especial para tratar com os problemas numéricos encontrados quando se atinge elevadas variações de índices de vazios próximos aos contornos, ou seja, da base e do topo da camada de solo fino.

No CONDES, as equações governadoras do adensamento e do ressecamento, as condições de contorno e a equação que modela os fenômenos físicos na interface solo trincado/não trincado são discretizadas, espacialmente, em uma malha uniforme, sendo adotada uma forma mista dos métodos da diferenças central e avançada com um esquema de integração implícito no tempo. No início de uma análise, mais de cinco mil

e um nós são dispostos ao longo do domínio espacial (Yao et al, 2002), número este suficiente para a precisão de uma análise no campo da engenharia geotécnica. Entretanto, em casos onde se faz necessária a utilização de uma malha mais refinada, com maiores números de nós e menores intervalos de tempo, uma malha não uniforme é gerada, automaticamente, pelo software, podendo o número de nós atingir um valor em torno de quinze mil. Além disso, o CONDES utiliza o método de Newton para a linearização da solução das equações discretizadas. Maiores informações sobre os métodos e técnicas numéricas empregadas pelo CONDES para as soluções das equações que modelam os processos do adensamento e do ressecamento podem ser obtidas em Yao e Znidarcic (1997) e Yao et al. (2002).

Cabe ressaltar que este algoritmo só fornece solução para o adensamento e ressecamento de solos finos moles homogêneos, de alta compressibilidade, baixa resistência e baixa permeabilidade, com distribuição uniforme ou não uniforme de índice de vazios. Além disso, só simula os processos para a condição de solo saturado, sendo automaticamente interrompido quando o índice de vazios do solo atinge, em qualquer instante de tempo, o índice de vazios correspondente ao limite de contração -  $e_{\text{mín}}$ . Esta condição, entretanto, não constitui uma limitação para o programa, pois se sabe que, a partir do limite de contração, embora a perda de água dos vazios do solo ainda continue a ocorrer, nenhuma variação volumétrica/deformação é significativa no mesmo.

Oliveira Filho (1998) demonstrou a boa concordância entre os dados dos ensaios de laboratório por ele realizados em uma centrífuga e as predições do CONDES, validando este modelo numérico e provando ser o mesmo eficiente para a resolução das equações que modelam os processos do adensamento e do ressecamento de um solo fino mole, dado a inexistência, até o presente momento, de soluções analíticas para elas.

### **2.9.2 – Dados dos arquivos de entrada para o CONDES**

Um arquivo de entrada para a realização de uma análise de adensamento/ressecamento via CONDES deve conter todos os parâmetros das relações constitutivas do solo mole, algumas características geotécnicas deste material, a altura

inicial ( $H_0$ ) da camada ou o histórico do seu enchimento e as condições de contorno que influenciam a ocorrência destes processos.

Todos os dados que devem estar contidos em um arquivo de entrada são apresentados a seguir.

a - Parâmetros das relações constitutivas de compressibilidade e de permeabilidade

Os parâmetros  $A_1$ ,  $B_1$  e  $Z_1$ , correspondentes à função de compressibilidade para a contração unidimensional, os parâmetros  $A_2$  e  $B_2$ , relativos à mesma função para a contração tridimensional, e os valores de  $C$  e  $D$  da função de permeabilidade são os primeiros dados solicitados pelo CONDES para as análises do adensamento e do ressecamento de um solo fino mole. Os parâmetros  $A_2$  e  $B_2$  são idênticos a  $A_1$  e  $B_1$  (Yao et al., 2002) e  $Z_2$  calculado automaticamente pelo software. Já os parâmetros  $C$  e  $D$  apresentam os mesmos valores para o adensamento e para o ressecamento.

b - Parâmetros da “cracking function”

São os valores  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  da Equação 2.6, necessários à simulação do processo de ressecamento de um solo. Podem ser obtidos a partir da equação da reta de ajuste dos dados índices de vazios e tensões totais a eles correspondentes na abertura das trincas.

c - “ $\eta$  function”

Como visto no item 2.6.2,  $\eta$  é utilizado pelo CONDES para multiplicar a taxa de evaporação imposta no topo de uma camada de solo submetida ao processo do ressecamento, a fim de que a perda de água pela parede lateral da mesma possa ser considerada em uma análise. Segundo Oliveira Filho (1998), este valor deveria ser determinado experimentalmente. Entretanto, dado à inexistência de ensaios para a sua obtenção, tem-se estimado valores para  $\eta$  em função das características atmosféricas da região onde se dá a ocorrência do processo do ressecamento. Utilizando valores de  $\eta$  entre 2.0 e 3.0, Oliveira Filho (1998) verificou boas aproximações entre os resultados das simulações e dos ensaios por ele realizados em uma centrífuga.

d - Índice de vazios correspondente à formação da crosta –  $e_{cv}$

É o valor de índice de vazios a partir do qual o solo se torna resistente o suficiente para ser considerado uma crosta (Yao e Znidarcic, 1997). É determinado experimentalmente.

e - Altura inicial da camada

Corresponde à altura da camada no início de uma simulação. Para uma análise inicial de adensamento onde a fase do enchimento não é considerada este valor é igual a  $H_0$ . Se a fase do enchimento for considerada, este valor deve ser igual a 0. Nas simulações de adensamento divididas em estágios ou na análise do ressecamento posterior a uma análise de adensamento, o valor da altura inicial da camada deve ser idêntica à altura final da simulação anterior.

f - Estágio de enchimento

O estágio de enchimento pode ou não ser considerado na análise inicial do adensamento de um solo fino mole. Ele caracteriza a constituição, ou seja, a formação da camada de solo podendo ser classificado como enchimento nulo (EN), contínuo (EC) ou instantâneo (EI) em função da taxa/altura de disposição do material mole. A Figura 2.7 apresenta os estágios de enchimento acima descritos.

O enchimento é considerado nulo quando, em um intervalo de tempo, não ocorre nenhuma variação de altura na camada contida em um reservatório, ou seja, quando não há disposição do material. Já o enchimento contínuo é caracterizado pela disposição constante do solo fino mole, numa maior ou menor razão, em uma barragem de rejeito. É o tipo de enchimento mais utilizado na disposição de rejeitos da mineração. E quando a disposição do solo fino mole é realizada durante um intervalo pequeno de tempo ou num tempo específico, o enchimento é classificado como instantâneo.

Os estágios de enchimento são caracterizados pelos tempos inicial e final de disposição e pela altura/razão com que o solo fino mole é depositado em um reservatório. Além disso, as informações do enchimento devem cobrir todo o tempo da simulação. E quando o estágio de enchimento for considerado em uma análise de adensamento, além de se adotar altura inicial da camada igual a zero, deve-se também impor, sobre o topo da mesma, a condição de contorno de sobrecarga nula.

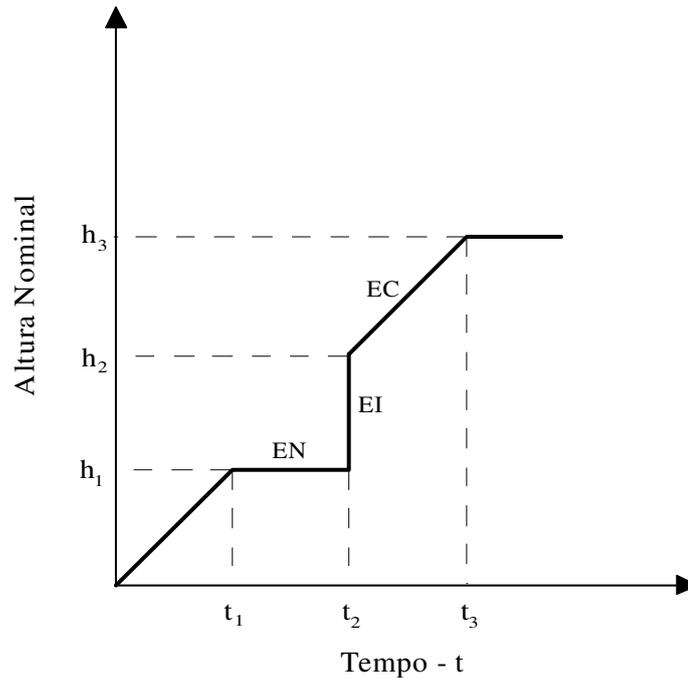


Figura 2.7 – Estágios de enchimento.

#### g - Condições de contorno

Dois tipos de condição de contorno são utilizadas pelo CONDES nas análises do adensamento unidimensional a grandes deformações e do ressecamento de um solo fino mole: Dirichlet e Newman. A de Dirichlet corresponde a uma condição de contorno do tipo tensão, enquanto a de Newman está relacionada com uma condição de contorno do tipo velocidade (Yao et al., 2002).

Na condição do tipo Dirichlet, todas as tensões nos contornos são convertidas em índices de vazios através do princípio das tensões efetivas e das funções características do solo. De acordo com Yao et al. (2002), esta condição de contorno pode ser expressa pela Equação 2.3, sendo empregada nas simulações onde as tensões estão relacionadas a fatores como sobrecarga ou as poropressões são controladas nos contornos. Já a condição do tipo Newman, associada à velocidade da água nos contornos, é formulada a partir da função velocidade para a compressão unidimensional e da equação do ressecamento tridimensional, sendo utilizada nas simulações onde a velocidade de água está relacionada a fatores como taxa de evaporação ou quando uma análise de adensamento e/ou ressecamento é dominada pela retirada de água dos poros do solo fino mole.

Segundo Yao et al. (2002), não é possível controlar, no campo, as condições do tipo Dirichlet e Newman em um determinado contorno no mesmo tempo. Entretanto, sabe-se que ambas podem ser dominantes em um contorno em um idêntico intervalo de tempo. Nas análises via CONDES, somente uma delas pode ser imposta sobre um contorno, ou seja, sobre a base/topo da camada do solo fino mole e sobre a parede lateral das trincas, após o início e propagação do ressecamento.

Como condições de contorno para o topo de uma camada de solo fino mole podem ser impostas a do tipo sobrecarga, utilizada na simulação da fase do adensamento, e a do tipo evaporação, empregada na fase do ressecamento. A condição do tipo sobrecarga simula a aplicação de um carregamento adicional sobre a camada de topo permeável, devendo ser expressa em unidade de tensão, enquanto a do tipo evaporação corresponde a uma situação onde há a retirada de água a uma taxa constante desta região, devendo ser expressa, portanto, em unidade de velocidade (Yao e Znidarcic, 1997).

Já para a base da camada, há quatro tipos de condição de contorno que podem ser utilizadas nas análises de adensamento e ressecamento via CONDES: base impermeável, carga de poropressão, base permeável e tipo velocidade, ou percolação.

A condição de contorno base impermeável simula a situação de nenhum fluxo, ou seja, de velocidade nula na região inferior de uma camada de solo fino mole. Já a condição de contorno de carga de poropressão simula a situação de uma carga de água atuando sobre a base da camada de solo, podendo ela apresentar valor positivo, quando o NA se encontrar acima da base da camada, ou negativo, quando o NA estiver situado em cota inferior à da base da camada. Um cuidado que deve ser tomado por um usuário quando esta condição de contorno for a escolhida para uma simulação é o de se verificar se a carga de poropressão imposta na base é menor que a tensão total devida ao peso próprio da camada aplicada nesta mesma região. Se a carga de poropressão na base for maior que a tensão total nela aplicada, uma condição de instabilidade geotécnica será causada, impedindo o avanço da análise via CONDES.

A condição de contorno permeável simula a condição de base drenada, com carga de poropressão nesta região sempre coincidente com a posição do NA no topo da camada de solo. E a condição tipo velocidade, caso mais geral de fluxo no contorno,

simula uma situação de campo onde ocorre uma retirada de água, a uma vazão constante, da base da camada de solo.

#### h - Índice de vazios mínimo

É o valor de índice de vazios correspondente ao limite de contração do solo nas análises de ressecamento e constitui o parâmetro de interrupção para as análises via CONDES. No caso de análises de adensamento apenas, o valor do índice de vazios mínimo pode assumir um valor arbitrário e pequeno (maior que zero).

#### i - Tempo inicial

Especifica o tempo onde as análises do adensamento e do ressecamento de uma camada de solo fino mole terão início. Na análise do adensamento, o tempo inicial é tomado como zero ou como um instante  $t$  qualquer, no caso da análise ser continuidade de uma anterior. Na análise do ressecamento, o tempo inicial é assumido, geralmente, como o tempo final da análise do adensamento.

#### j - Tempos específicos para a emissão dos arquivos de saída

Os tempos ou momentos pré-selecionados para as análises dos processos de adensamento e ressecamento de um solo fino mole devem ser definidos pelo usuário do CONDES. São para estes tempos que o algoritmo numérico fornece os arquivos de saída, onde se encontram as informações das variações da altura da camada, do índice de vazios ao longo da profundidade e outras características do solo fino mole ao longo da ocorrência dos fenômenos do adensamento e do ressecamento, além dos dados profundidade e volume das trincas, quando o processo de secagem do solo é considerado na simulação.

#### k - Intervalo de tempo máximo

É o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) usado na marcha do tempo. De acordo com Yao e Znidarcic (1997), a escolha do intervalo de tempo máximo é função da precisão requerida para uma análise e do tempo que o usuário pretende gastar na simulação da mesma.

### 1 – Perfil de índice de vazios inicial

Nas análises do adensamento que são continuidade de uma anterior ou nas análises do ressecamento que se iniciam após a conclusão do fenômeno do adensamento, o usuário deve fornecer ao algoritmo o perfil de índice de vazios inicial, ou seja, os valores de índices de vazios ao longo da profundidade da camada.

A possibilidade de se fornecer a uma análise um perfil de índice de vazios inicial permite que a fase do adensamento seja realizada em várias etapas, sob diferentes condições de contorno. A fase do ressecamento, entretanto, só pode ser analisada em uma única etapa, pois o CONDES só consegue analisar este processo em uma camada que não apresente trincas pré-existentes.

Além dos dados acima apresentados, devem ser fornecidos ao software os valores da densidade real dos grãos do solo fino mole ( $G$ ) e do específico da água -  $\gamma_w=9,81$  kN/m<sup>3</sup>.

Ressalte-se que todos os dados acima apresentados são essenciais para as simulações dos processos do adensamento e do ressecamento via CONDES, podendo ser fornecidos ao mesmo por um usuário de forma iterativa, onde o próprio software solicita as informações após ser aberto no ambiente DOS, ou através de um arquivo de dados previamente elaborado em um editor de textos.

### **2.9.3 - Simulação via CONDES**

Após o fornecimento de todos os dados necessários às simulações do adensamento e do ressecamento, o algoritmo CONDES inicia, automaticamente, as análises.

A análise do ressecamento só é iniciada quando a velocidade de fluxo ascendente em direção ao topo da camada, devida ao fenômeno do adensamento, se igualar à taxa de evaporação. Antes deste momento, o CONDES só analisa o adensamento, mesmo para o caso das simulações onde o usuário já tiver imposto todas as condições de contorno para a análise do processo do ressecamento.

Assim como o início da simulação é automático, o seu término também o pode ser, independentemente do tempo final estipulado pelo usuário para a conclusão de sua execução. Quando o valor do índice de vazios mínimo é atingido em uma análise, o

algoritmo interrompe/conclui a simulação. E em uma simulação da fase do adensamento, o alcance da condição de estado permanente também pode interromper a execução da análise via CONDES.

Além disso, cabe ressaltar que, durante a realização de uma simulação, o próprio CONDES, automaticamente, acusa os erros que podem comprometer a precisão de uma análise, como as instabilidades numéricas, combinação inapropriada dos parâmetros do solo fino mole/condições de contorno, instabilidades devidas a altos valores de carga de poropressão na base e outros. Assim, cabe a um usuário, após ser notificado da existência de erros nas análises, revisar os dados de entrada que ele mesmo forneceu ao programa, evitando-se a execução de simulações não realistas.

#### **2.9.4 - Dados dos arquivos de saída do CONDES**

Os arquivos de saída são gerados automaticamente pelo CONDES e exibem as soluções das simulações de adensamento e ressecamento de um solo fino mole por ele executadas. São classificados como input, vd.out, ts.out e tc.out.

O arquivo input exhibe os dados que deram origem à simulação, além do tempo de parada de sua execução e o perfil de índice de vazios correspondente a este instante. Após ser reorganizado, o input da fase do adensamento pode ser transformado em um arquivo de entrada para uma análise posterior, seja ela continuidade deste processo (adensamento em estágios) ou partida para a fase do ressecamento.

O arquivo vd.out exhibe os perfis índices de vazios x elevação para os tempos de análise definidos pelo usuário no arquivo de entrada para as simulações. A variação do teor de sólidos, da poropressão e de “ $\alpha$  function” ao longo da profundidade da camada do solo e o perfil da condição de regime permanente são também exibidos neste arquivo. Ressalte-se que a ocorrência da condição de regime permanente só é possível na fase do adensamento, onde a condição do tipo velocidade (Newman) só é imposta sobre um contorno.

Já o arquivo ts.out exhibe a altura da camada e a densidade seca média do solo em vários momentos da análise, além de indicar a altura total de sólidos ( $H_s$ ). Enquanto isso, o arquivo tc.out apresenta algumas características das trincas, como profundidade, volume e outras, ao longo do tempo da análise de ressecamento.

### **EXPERIÊNCIA DE CAMPO E ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Este capítulo apresenta uma breve caracterização geotécnica da lama cujo processo de ressecamento foi analisado, a experiência de campo relatada em Silva (2003) e a descrição dos ensaios de adensamento induzido por percolação e de contração livre realizados ao longo deste trabalho.

Ressalte-se que a experiência vivenciada por Silva (2003) foi de fundamental importância para a realização deste trabalho, pois forneceu dados para a calibração do modelo de ressecamento implementado no programa computacional CONDES. Diversas condições de contorno e vários modos de disposição foram considerados para avaliar a eficiência do processo de secagem.

#### **3.1 – Caracterização Geotécnica da Lama**

Durante o processo de beneficiamento de alguns tipos de minério, grandes quantidades de rejeitos são gerados e descartados pela mineradora responsável em barragens de contenção ou pilhas. Estes materiais apresentam características físicas, hidráulicas e de resistência variáveis em função do tipo de material lavrado e da própria tecnologia empregada nos processos de beneficiamento e de disposição. Assim sendo, as características geotécnicas de um rejeito correspondem a um valor médio, obtido a partir de análises de um conjunto de dados que variam entre si devido aos diversos fatores que influem na gênese deste material.

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa que há mais de 25 anos explora o minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, onde se encontram abundantes reservas deste material. A sua unidade de beneficiamento,

localizada em Germano, Município de Mariana, produz, anualmente, cerca de 13.5 milhões de toneladas métricas seca (TMS) de concentrado, gerando, respectivamente, 6.5 e 2.0 milhões de toneladas de rejeito arenoso e lama. O rejeito arenoso, proveniente da flotação convencional, dado às suas satisfatórias características de drenabilidade e resistência, tem sido empilhado na Cava Exaurida do Germano e na área a jusante da Barragem do Germano. Já a lama, proveniente da deslamagem e do processo de recuperação de minério de ferro nas colunas “recleaner”, tem sido disposta no reservatório da Barragem do Germano, dado ao seu elevado teor de sólidos inicial e às suas baixas características de drenabilidade e resistência. Entretanto, a Samarco já vem implantando o projeto de secagem deste material, dispondo-o em camadas pouco espessas nas baías de ressecamento. Lançada nas baías, a lama é exposta às condições atmosféricas após a conclusão dos fenômenos da sedimentação/adensamento e a drenagem de toda a água a ela sobreposta para ser submetida ao processo do ressecamento, no qual a evaporação exerce um papel preponderante. Com a implantação do projeto de secagem de lama, uma maior vida útil pode ser concedida à Barragem do Germano. Além disso, este projeto conferirá à barragem maior estabilidade e recuperação ambiental, possibilitando a sua desativação.

Na Tabela 3.1, encontram-se algumas características geotécnicas da lama obtidas a partir de ensaios de laboratório. As frações granulométricas apresentadas nesta tabela foram obtidas a partir da análise da curva granulométrica da Figura 3.1.

Ressalte-se que as amostras de lama utilizadas nestes ensaios foram retiradas da área teste onde Silva (2003) estudou o processo do ressecamento e que os procedimentos e equipamentos empregados na realização dos mesmos foram os estipulados pelas normas técnicas da ABNT para a determinação do peso específico dos grãos – NBR 6508/84, dos limites de consistência – NBR 6459/84 e NBR 7180/84, e da granulometria de um solo – NBR 7181/84.

Analisando-se as informações apresentadas na Tabela 3.1, pode-se concluir que a lama é um solo muito fino, sendo classificada, de acordo com a NBR 6502/95, como um silte argiloso. E por apresentar índice de plasticidade, grandeza que expressa a diferença numérica entre os limites de liquidez e plasticidade, igual a 6, pode ser também classificada como um solo pouco plástico. Já o elevado valor de densidade real

dos grãos encontrado para a lama pode ser devido à considerável quantidade de partículas de ferro nela presente.

Tabela 3.1 – Características geotécnicas da lama.

Densidade real dos grãos - G		3.89
Limites de consistência	LL (%)	28
	LP (%)	22
Granulometria	Argila (%)	27
	Silte (%)	69
	Areia (%)	4
	Pedregulho (%)	0

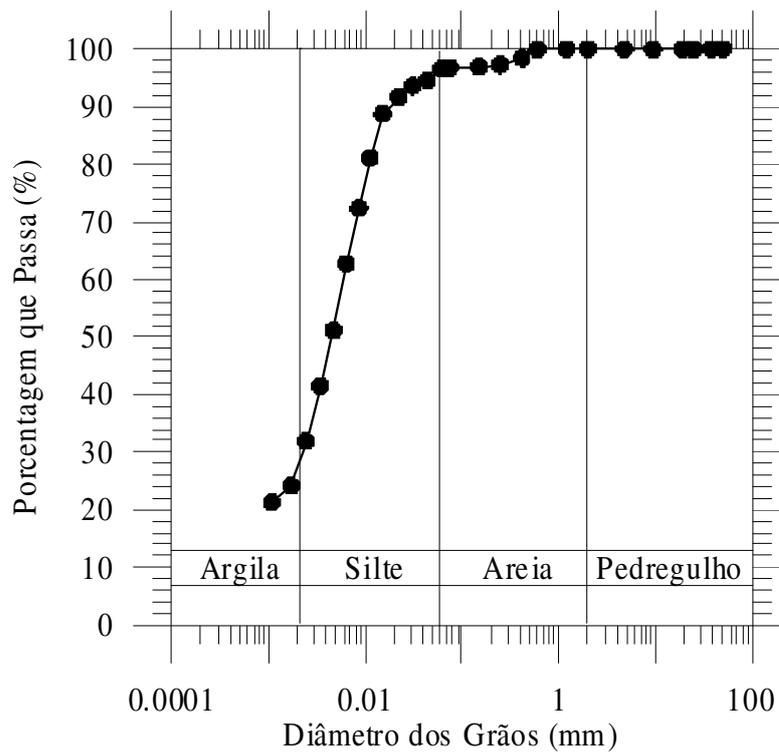


Figura 3.1 – Curva granulométrica da lama.

### 3.2 – Estudo em Campo do Processo de Ressecamento de Lama

A fim de se estudar o processo do ressecamento em campo, Silva (2003) monitorou a secagem de uma camada de lama disposta em uma área teste a jusante do reservatório destinado ao descarte deste material na Barragem do Germano.

Vários equipamentos e instrumentos foram instalados nessa área para o monitoramento de algumas características da lama e das condições de contorno que exercem influência no processo do ressecamento, principalmente as condições de drenagem da base e do topo da camada de lama.

Dentre os instrumentos utilizados para o monitoramento das características da lama, estavam os sensores TDR – “Time Domain Reflectometry”, que permitem a determinação da umidade volumétrica de um solo, de temperatura e de sucção. Quatro conjuntos constituídos por cada um destes sensores foram instalados em alturas pré-estabelecidas da camada de lama, sendo os dados por eles coletados armazenados em um “Datalogger” a cada intervalo de tempo de 15 minutos.

Já as condições de contorno da base e do topo da camada foram monitoradas, respectivamente, pelos piezômetros Casagrande/tensiômetros e por uma estação meteorológica que permitia, dentre outros dados, a obtenção das taxas de evaporação. Além disso, foram instalados também, na área teste, um medidor de recalque (régua graduada) e um tanque de evaporação. A Figura 3.2 apresenta a área teste onde o processo do ressecamento foi estudado e os equipamentos e instrumentos utilizados no seu monitoramento.

A área destinada ao estudo do ressecamento apresentava uma seção plana de  $4854\text{m}^2$  e altura de 3m, tendo sido preenchida pelo bombeamento de lama. O seu enchimento foi escalonado, sendo permitida a drenagem da água sobrenadante, presente no topo da camada de lama após o processo da sedimentação, por um vertedouro situado no lado oposto ao do ponto de lançamento.

Ao final do lançamento e após a conclusão de todo o processo da sedimentação, obteve-se uma camada de lama de 1.35m de altura (Silva, 2003), sendo este valor adotado como altura inicial para o estudo, em campo, do processo do ressecamento. Assim, o processo do adensamento teve início com a camada de lama apresentando uma

altura de 1.35m, tendo sido concluído com a mesma apresentando uma espessura de 1.08m, aproximadamente 55 dias após o final do enchimento.



Figura 3.2 – Área teste utilizada para o estudo do ressecamento de lama em campo.

Após este período, foi mantida uma camada de água sobre o topo da camada de lama por aproximadamente 83 dias, a fim de se evitar o início do ressecamento antes da conclusão da instalação, na área teste, de todos os instrumentos necessários ao monitoramento das condições de contorno que governariam a sua ocorrência. Após este intervalo de tempo, ou seja, 138 dias após a interrupção do bombeamento de lama/início do monitoramento da fase de adensamento, realizou-se a drenagem da área teste, dando-se início à fase do ressecamento. O monitoramento deste processo, entretanto, só foi iniciado dois dias após a drenagem – dia 140.

Iniciado com o topo da camada de lama na elevação 1.08m, o processo do ressecamento prosseguiu durante 70 dias, quando o seu monitoramento foi interrompido. Neste instante, a altura da camada de lama era de 92cm. A Figura 3.3 apresenta a variação da altura da camada de lama ao longo de todo o processo, que compreende as fases do adensamento e do ressecamento, quando ocorreram as deformações tridimensionais/abertura das trincas.

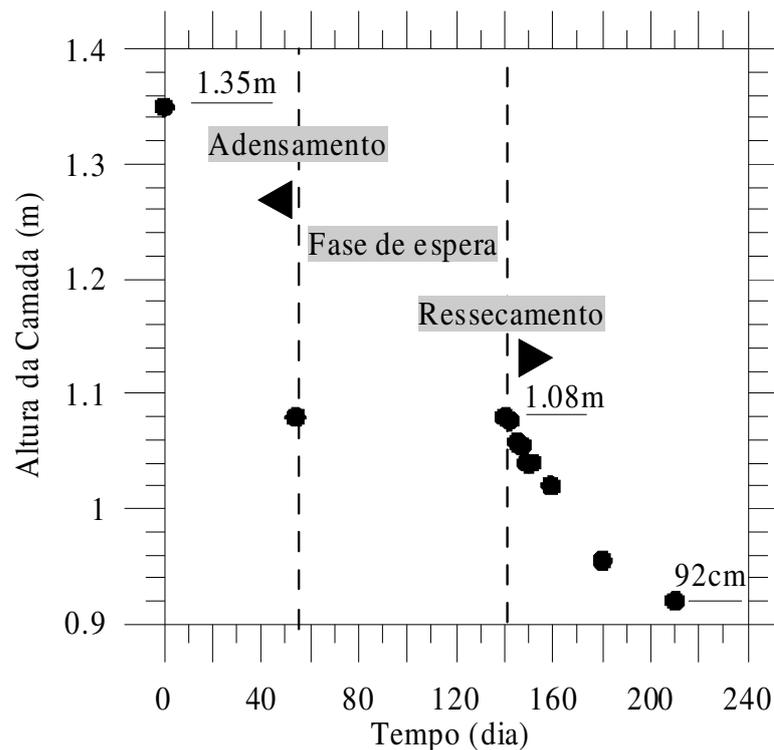


Figura 3.3 – Curva variação altura da camada de lama x tempo (Silva, 2003).

Analisando-se a Figura 3.3, nota-se que os recalques sofridos pela camada de lama durante as fases do adensamento (dias 0 a 55) e do ressecamento (dias 138 a 210) foram, respectivamente, de 27 e 16cm. Assim, pode-se concluir que, devido aos processos do adensamento e do ressecamento, a camada de lama sofreu um recalque total de 43cm. O trecho reto da curva corresponde ao período em que foi mantida a lâmina de água sobre o topo da camada de lama.

Ressalte-se que, além do monitoramento dos instrumentos instalados na área teste, foram realizadas amostragens para a obtenção dos teores de umidade e dos pesos específicos da lama durante todo o período do estudo, tanto na fase do adensamento quanto na do ressecamento. Nas amostragens realizadas durante a fase do adensamento e início do ressecamento, utilizou-se o amostrador do tipo caneco, enquanto que, nas etapas restantes do ressecamento, utilizou-se o extrator de amostras do tipo pistão, dado à maior consistência da lama e às dificuldades de cravação do caneco. Após serem coletadas, as amostras eram levadas ao laboratório e submetidas aos ensaios de determinação do teor de umidade e do peso específico natural.

Outras propriedades medidas em campo foram as aberturas e profundidades das trincas ao longo do tempo. Três trincas aleatórias foram escolhidas e monitoradas durante todo o processo do ressecamento, possibilitando a obtenção da “cracking function”.

### **3.2.1 - Dados obtidos no estudo do ressecamento em campo**

Apresenta-se, a seguir, a variação de alguns índices característicos do rejeito fino e os dados que influenciaram as condições de contorno da base e do topo da camada de lama durante o processo do ressecamento. Obtidos por Silva (2003), estes dados foram essenciais para a calibração do modelo de ressecamento, principal objetivo deste trabalho.

#### **3.2.1.1 – Variação dos índices físicos da lama durante o processo de ressecamento**

As Figuras 3.4 a 3.7, apresentam, respectivamente, as variações dos teores de umidade e de sólidos, do peso específico natural e do índice de vazios da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo de ressecamento, sendo utilizados os dados referentes às amostragens/ensaios de laboratório realizados nos dias 142 (fase inicial do ressecamento), 159, 180 (fase intermediária) e 210 (final do monitoramento do processo do ressecamento) para as suas obtenções. Ressalte-se que os valores de profundidade correspondem às médias das posições/elevações onde foram realizadas as retiradas de amostras.

Analisando-se as Figuras 3.4 a 3.7, pode-se observar que, o teor de umidade e o índice de vazios da camada de lama decresceram em profundidade ao longo do período do ressecamento, enquanto que o teor de sólidos e o peso específico natural cresceram em profundidade ao longo do mesmo período.

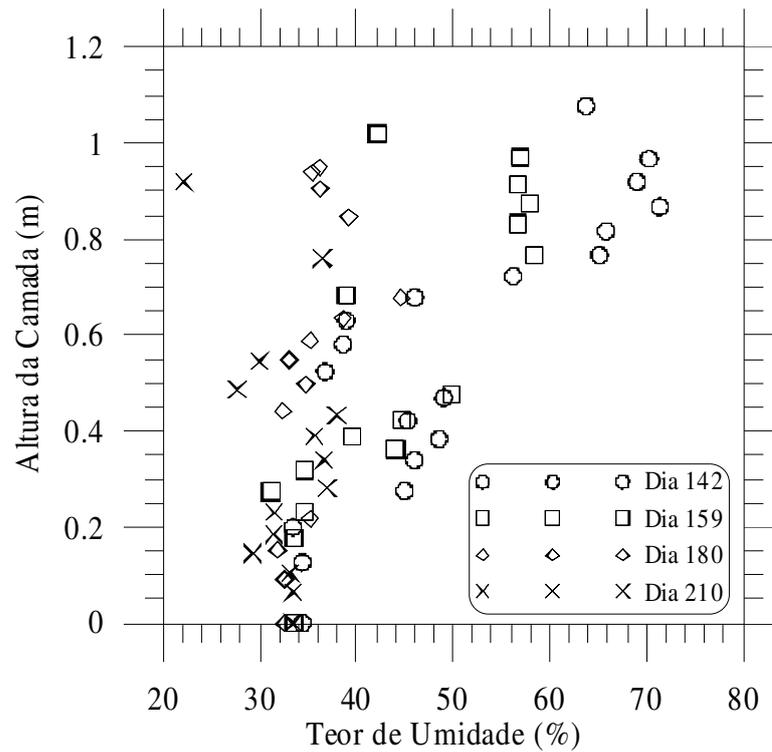


Figura 3.4 – Variação do teor de umidade da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo do ressecamento (Silva, 2003).

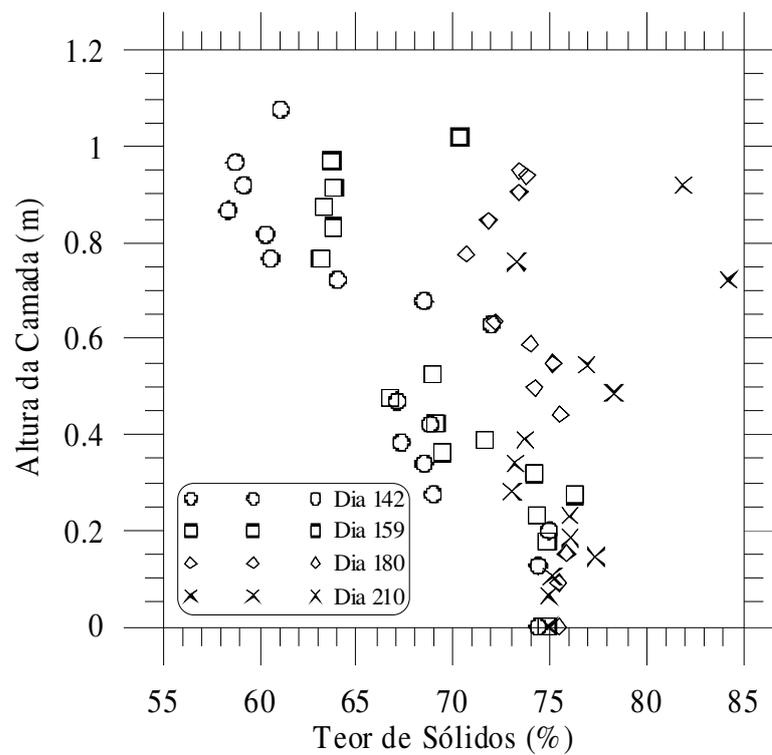


Figura 3.5 – Variação do teor de sólidos da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo do ressecamento (Silva, 2003).

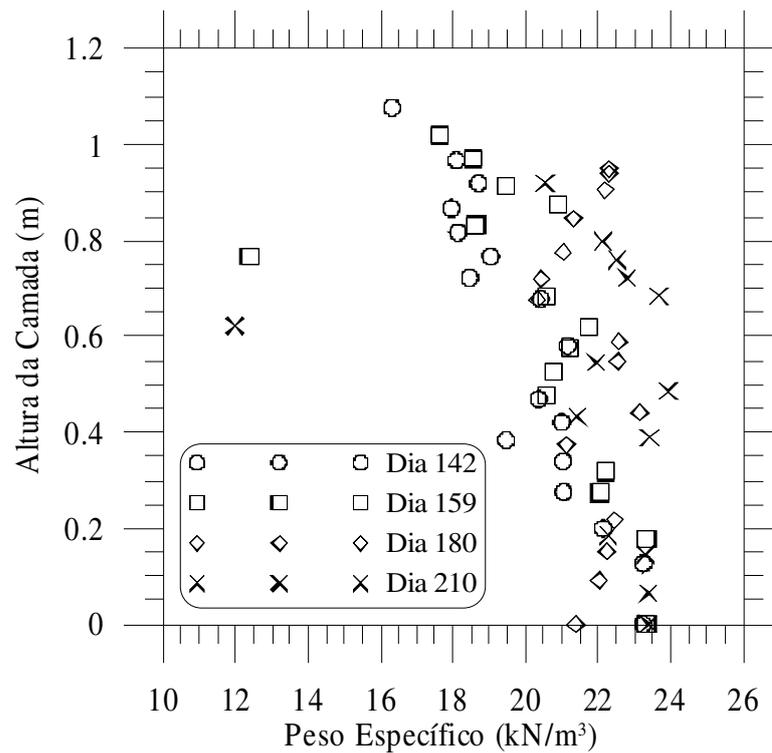


Figura 3.6 – Variação do peso específico natural da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo do ressecamento (Silva, 2003).

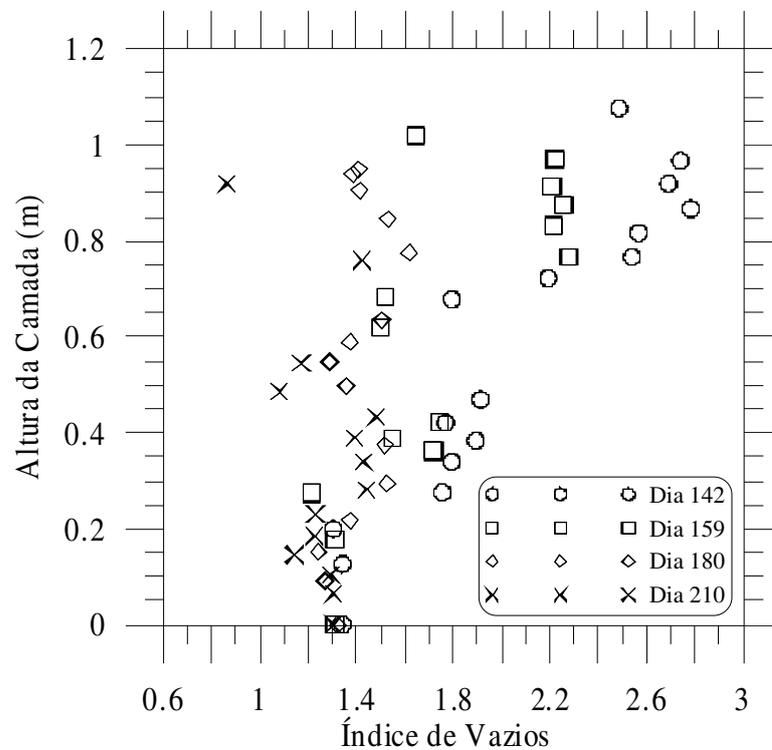


Figura 3.7 – Variação do índice de vazios da lama ao longo da profundidade da camada durante o processo do ressecamento (Silva, 2003).

As variações destes índices físicos ao longo da profundidade podem ser explicadas a partir das condições de contorno às quais estavam submetidos o topo e a base da camada de lama. Como na base da camada dominava a sucção, cuja magnitude aumentava com o tempo de ressecamento, o volume de vazios era menor nesta região, e, portanto, menores eram o índice de vazios e o teor de umidade. Em oposição, dado ao maior contato entre as partículas sólidas da lama, maiores eram o teor de sólidos e o peso específico natural nesta mesma região. Já no topo da camada, atuava a evaporação, que provocava um fluxo de água ascendente em direção a esta região. Assim, mais elevado era o volume de vazios e/ou de água nesta área e, conseqüentemente, maiores eram o índice de vazios e o teor de umidade, enquanto que o teor de sólidos e o peso específico natural apresentavam valores inferiores aos encontrados na base da camada.

Ressalte-se, ainda, que as variações destes índices físicos foram mais significativas no topo da camada de lama, diminuindo com a profundidade em direção à sua base, onde pouca variação ocorreu ao longo do período do ressecamento. Além disso, analisando-se os perfis de índice de vazios e teor de umidade *versus* altura da camada para o dia 210, notou-se que estes valores no topo da camada foram inferiores aos encontrados na base. Esta modificação foi devida à formação de uma crosta sobre o topo da camada de lama, ocorrência comum em estágios avançados do ressecamento e que diminui ou até mesmo paralisa o desenvolvimento deste processo.

Outro importante dado obtido durante o processo de ressecamento em campo foi a evolução da profundidade das trincas com o tempo, que se encontra apresentada na Figura 3.8. Nesta figura, se encontram exibidas as variações das profundidades de duas das três trincas monitoradas em campo – TC01 e TC02.

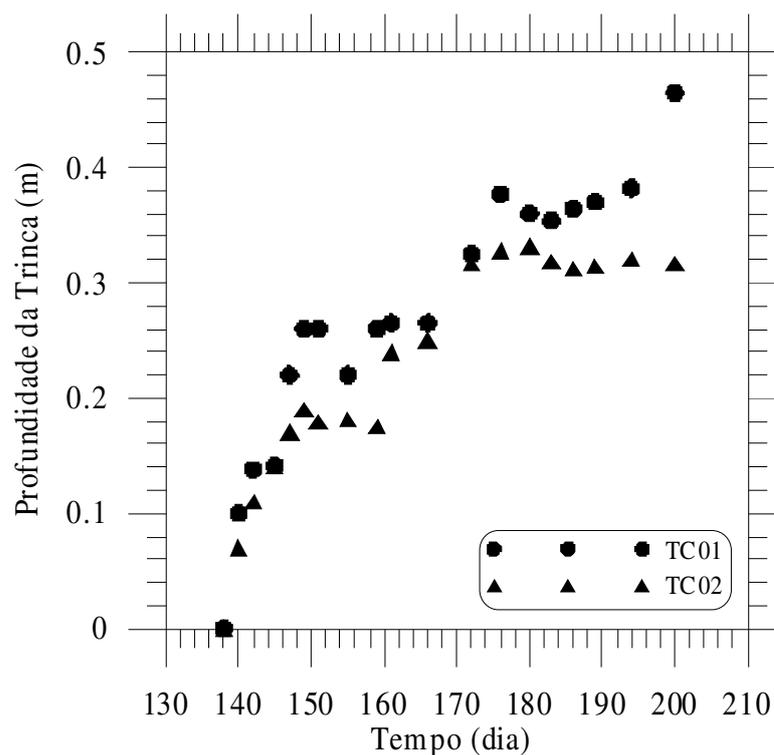


Figura 3.8 – Profundidade das trinças x tempo (Silva, 2003).

Analisando-se a Figura 3.8, notou-se que, em estágios mais avançados do ressecamento, a TC01 se propagou com mais intensidade que a TC02. Esta ocorrência pode ser explicada pela não homogeneidade da camada, o que fez com que a trinca TC01, situada em uma região de maiores discontinuidades, se propagasse com mais intensidade que a TC02. Além disso, como as trinças se encontravam bem próximas, o maior desenvolvimento de TC01 pode ter interrompido a propagação em profundidade de TC02.

Silva (2003) também determinou, na própria área teste do ressecamento, a “cracking function” do solo, cuja forma se encontra apresentada na Figura 3.9. Para definição desta função característica, foram utilizados os dados índice de vazios *versus* tensão vertical total obtidos durante o monitoramento da propagação em profundidade das trinças de campo TC01 e TC02. Um ajuste entre os dados destas duas trinças foi adotado, a fim de melhor definir a “cracking function”, expressa pela Equação 2.6.

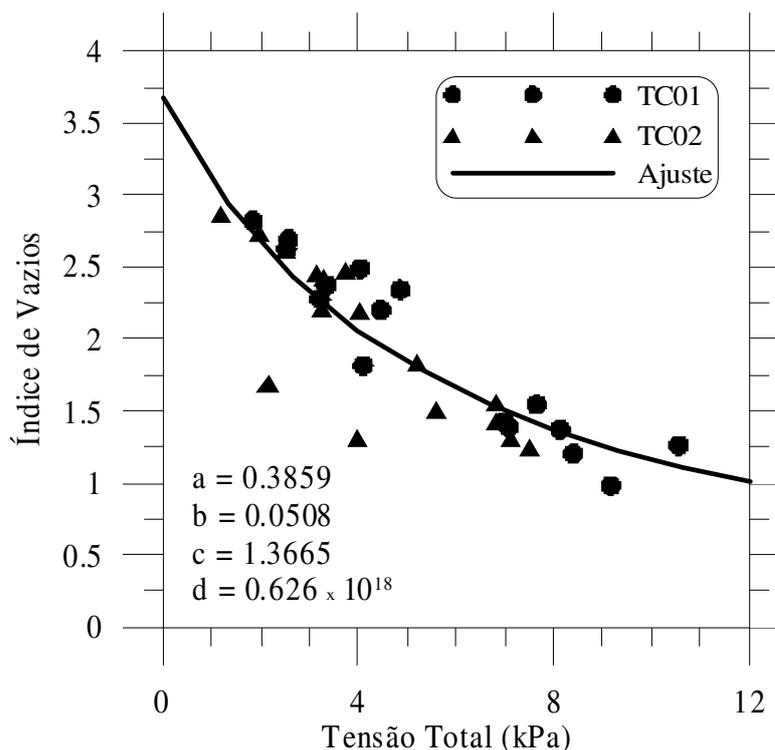


Figura 3.9 – “Cracking function” (Silva, 2003).

### 3.2.1.2 – Variação das condições de contorno da base e do topo da camada de lama com o tempo de ressecamento

Os valores de carga piezométrica e de taxa de evaporação que definiram as condições de contorno para a base e o topo da camada de lama durante todo o processo do ressecamento se encontram apresentados, respectivamente, nas Figuras 3.10 e 3.11.

Avaliando-se a Figura 3.10, concluiu-se que, durante a fase do adensamento – dias 0 a 55, a carga piezométrica na base da camada de lama variou entre 0.40 e 0.28m. O pico da curva (dia 110; 0.70m) pode ter sido devido ao índice pluviométrico ocorrido no dia 105, que originou uma espessa lâmina de água sobre o topo da camada de lama. Acredita-se que, devido a esta maior diferença de carga de poropressão entre a base e o topo da camada, um adensamento adicional tenha ocorrido. Entretanto, devido à ausência de dados mais detalhados deste período, esta ocorrência foi desconsiderada nas análises realizadas por este trabalho. Já para a fase do ressecamento – dias 140 a 210, observou-se uma variação de carga piezométrica na base entre 0 e –1.10m (sucção).

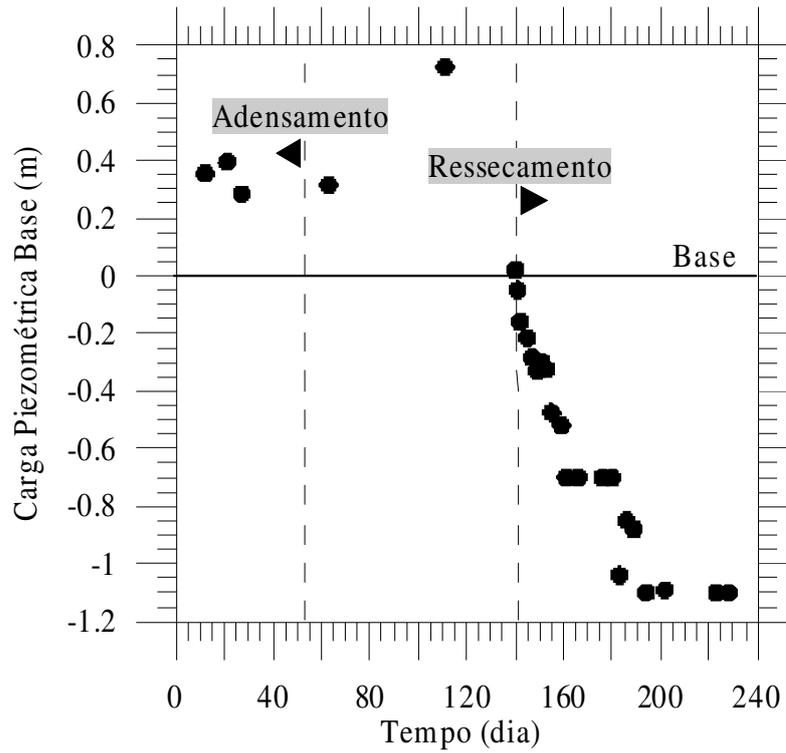


Figura 3.10 – Variação da carga piezométrica ao longo das fases do adensamento e do ressecamento da lama (Silva, 2003).

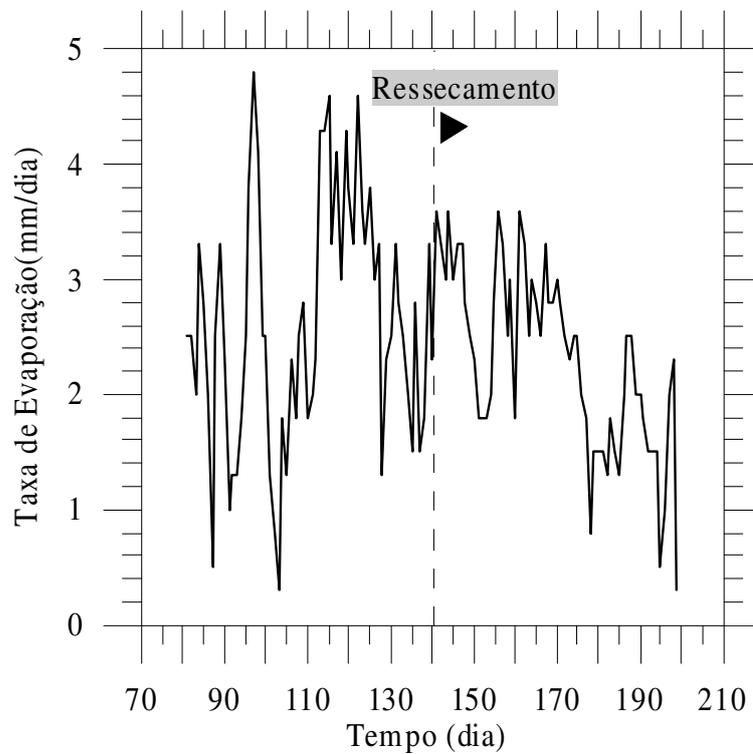


Figura 3.11 – Variação da taxa de evaporação ao longo da fase de ressecamento da lama (Silva, 2003).

Ressalte-se que as cargas piezométricas na base da camada foram obtidas, nas fases do adensamento e do ressecamento, a partir dos piezômetros Casagrande e dos tensiômetros instalados na área teste.

Analisando-se a Figura 3.11, notou-se que a taxa de evaporação durante a fase do ressecamento variou de 3.60 mm/dia (fase inicial) a 0.30 mm/dia (fase final). Assim, uma taxa de evaporação média de 2.0 mm/dia pode ser identificada como representativa para o período do ressecamento.

### **3.3 – Ensaios de Laboratório Realizados**

Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição e os resultados dos ensaios de laboratório realizados para a obtenção dos parâmetros da lama necessários ao estudo numérico do processo de seu ressecamento.

#### **3.3.1 – Ensaio da contração livre**

O ensaio da contração livre foi realizado para a determinação do limite de contração da lama e teve início com a disposição de uma amostra representativa deste material no equipamento (cilindro) destinado à sua execução, como mostra a Figura 3.12.

O cilindro destinado à realização do teste era constituído por uma base de acrílico sobre a qual se assentava um anel removível moldado em acrílico transparente, com 6.19cm de altura e 11.55cm de diâmetro. Também constituía o equipamento, um colarinho de 2.9cm de altura e de diâmetro igual ao anel. Este colarinho era colocado sobre o anel no estágio inicial do ensaio, a fim de que uma altura representativa da amostra de lama fosse obtida após o processo da sedimentação. Concluído o processo da sedimentação, toda a água sobrenadante era drenada e o colarinho retirado.

Cabe ressaltar que a amostra de lama utilizada neste ensaio foi retirada, também, da área teste e que, na parede lateral e no fundo do cilindro, foi passada uma camada de vaselina para eliminar o atrito entre a amostra de lama e os contornos do recipiente. Medidas da altura, diâmetro e do peso da amostra eram realizadas freqüentemente,

várias vezes ao dia, principalmente na fase inicial do ensaio, com o auxílio de um paquímetro, de uma régua graduada e de uma balança de alta precisão.



Figura 3.12 – Fase inicial do ensaio da contração livre.

No primeiro dia após o início do ensaio, depois de verificado o fim do processo da sedimentação, executou-se a drenagem da água sobrenadante, ficando apenas uma fina camada (película de água) sobre a amostra. No segundo dia, não foi identificada nenhuma camada de água sobre a amostra, ficando o topo exposto diretamente às condições de temperatura do laboratório, como mostra a Figura 3.13.

Após 7 dias do início da realização do ensaio, notou-se o desprendimento total da amostra das paredes laterais do cilindro. Nesta data, esta parede foi retirada e a amostra exposta pelo topo e pela lateral às condições ambientes, como mostra a Figura 3.14. A variação de diâmetro da amostra durante esta fase inicial do ensaio foi de 4.5mm.

Quando se notou a pouca variação de volume do corpo de prova, embora a perda de água ainda ocorresse, o ensaio foi finalizado. Após 15 dias do início do ensaio foram realizadas as últimas medições de altura, de diâmetro e de peso da amostra, sendo a mesma, em seguida, colocada em uma estufa, a uma temperatura de 110°C, por um período de 24 horas, para a determinação de sua massa seca. A Figura 3.15 apresenta a amostra de lama na fase final do ensaio da contração livre onde se verificou uma

variação de diâmetro, altura e peso da amostra de, respectivamente, 13.6mm, 26.1mm e 469.6g. Com estes dados, traçou-se a curva de contração, apresentada na Figura 3.16.



Figura 3.13 – Topo da amostra exposto às condições de temperatura do laboratório.



Figura 3.14 – Topo/lateral amostra expostos às condições de temperatura do laboratório.



Figura 3.15 – Amostra de lama na fase final do ensaio da contração livre.

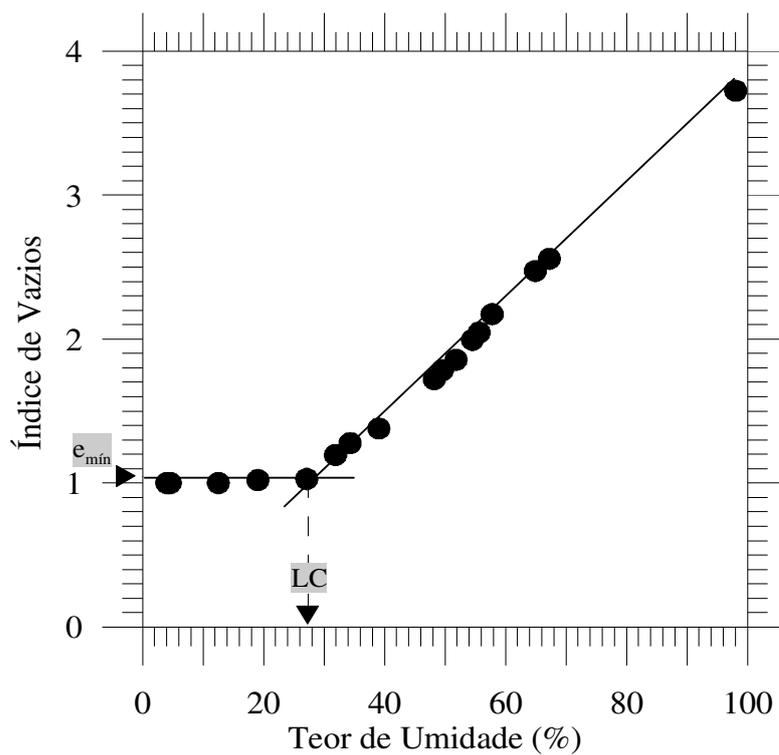


Figura 3.16 – Curva de contração da lama.

Analisando-se a Figura 3.16, pode-se concluir que o índice de vazios mínimo da lama é igual a 1.05, sendo o teor de umidade correspondente ao limite de contração

(LC) da ordem de 27%. Ressalte-se que este valor é superior ao encontrado para o limite de plasticidade, apresentado na Tabela 4.1, o que não tem sentido físico. Esta não conformidade pode ser explicada pelos diferentes métodos executivos (procedimentos) empregados nos ensaios padrão para a determinação do limite de contração e o da contração livre. O ensaio da contração livre é realizado em uma amostra de solo sob a mesma condição em que ela foi extraída no campo, sem nenhuma preparação (separação de frações), como realizado no ensaio convencional. Entretanto, o ensaio da contração livre fornece, para as análises de ressecamento, um limite de contração mais representativo da condição de campo. Como o ponto principal deste trabalho é o ressecamento, esta discussão não será levada à frente. Além disso, se o limite de contração real do solo for menor que o encontrado no ensaio da contração livre, as análises de ressecamento só se tornarão um pouco conservadoras, dado à interrupção das mesmas antes do alcance do índice de vazios mínimo real.

### **3.3.2 - Ensaio de adensamento induzido por percolação**

A fim de se obter os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade necessários ao estudo numérico do processo de ressecamento da lama, foram realizados ensaios de adensamento induzido por percolação, utilizando-se a bomba de fluxo, em três corpos de prova (CP) de uma amostra representativa deste material. Ressalte-se que a amostra utilizada nestes ensaios foi retirada da área teste apresentada no item 3.2 e, por apresentar-se em adiantado estado de ressecamento, foi dissolvida em água para se aproximar da condição inicial, ou seja, a um fluido de alta viscosidade. Os corpos de prova submetidos aos ensaios foram, portanto, obtidos de uma amostra reconstituída da lama.

### **3.3.2.1 – Procedimentos e técnicas utilizadas na realização dos ensaios de adensamento induzido por percolação**

Os procedimentos e técnicas utilizadas na realização dos ensaios foram os mesmos empregados por Botelho (2001). O ensaio se iniciava com a montagem da célula triaxial e a sua conexão, por meio de mangueiras plásticas, ao reservatório de água e à bomba de fluxo. Para a realização do ensaio utilizando-se a amostra de lama, a base da célula triaxial foi substituída pela base modificada, onde era acoplado um tubo de acrílico para conter o material. Destaca-se que esta substituição é realizada, de modo particular, no ensaio de adensamento induzido por percolação em amostras de solos moles (Botelho, 2001).

Após a montagem do sistema, eram realizadas a retirada de bolhas de ar da linha e a saturação da pedra porosa localizada na base da célula. Em seguida, a lama era despejada no tubo de acrílico e, após um intervalo de tempo necessário à sua sedimentação, preenchia-se com água destilada o volume restante do tubo.

Completado o volume do tubo de acrílico com água, colocava-se o papel filtro em sua borda superior, iniciando-se, em seguida, a descida do pistão de acrílico até o mesmo alcançar o topo da amostra de lama. Quando o pistão encostava no topo da amostra, a altura inicial do corpo de prova era obtida. Concluído este procedimento, a célula triaxial era fechada e preenchida com água, sendo aplicada uma contrapressão para a saturação do sistema. Em seguida, a haste de carregamento, peça acoplada ao cabeçote da célula triaxial, era destravada e encostada levemente sobre o pistão de acrílico, sendo obtida, através do uso de um extensômetro, a leitura de referência para as demais medições realizadas nas fases posteriores do ensaio. As Figuras 3.17 e 3.18 mostram esta fase inicial do ensaio HCT.

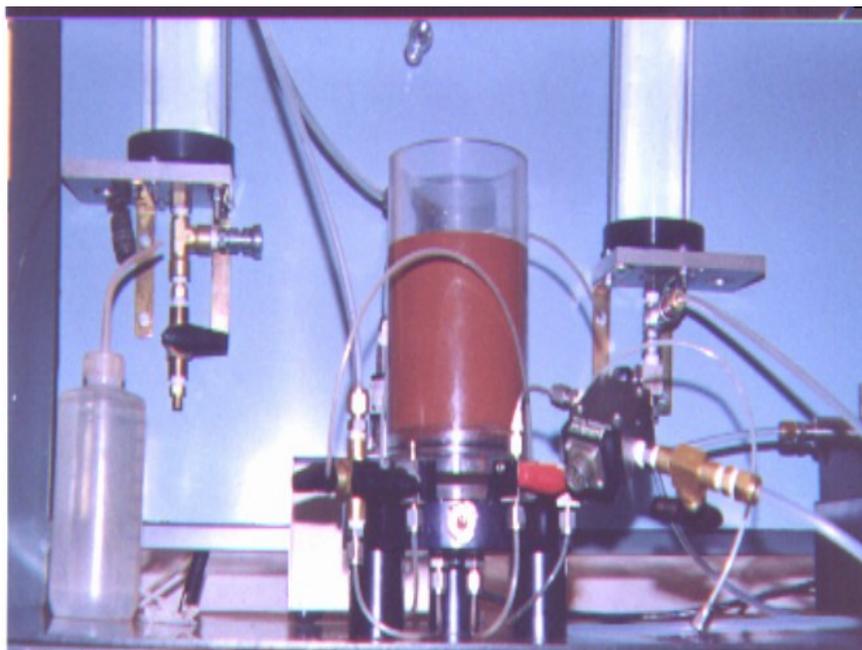


Figura 3.17 – Preparação do corpo de prova para a realização do ensaio HCT.

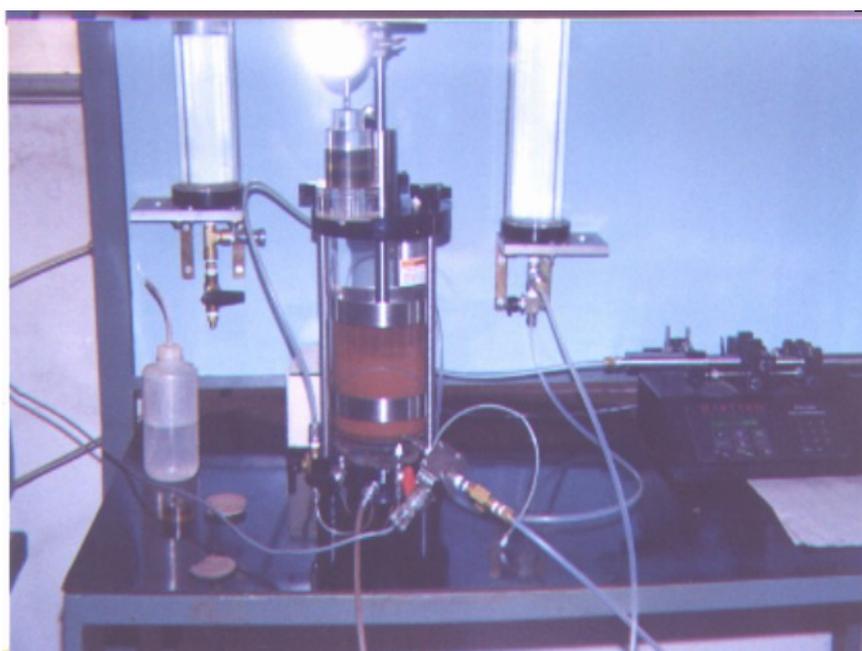


Figura 3.18 – Configuração do sistema (célula triaxial e bomba de fluxo) para a realização do ensaio HCT.

Após concluir esta primeira fase do ensaio, que corresponde à preparação do corpo de prova e montagem do sistema (célula triaxial e bomba de fluxo), permitia-se

ao corpo de prova adensar sob a ação do seu peso próprio e da tensão produzida pelo pistão de acrílico por um período mínimo de 12 horas.

Quando se despejava a amostra de lama no tubo de acrílico, colocava-se, também, uma quantidade do material em uma bandeja metálica para a determinação do índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula –  $e_{00}$ . Após a ocorrência do fenômeno da sedimentação da lama, cuja conclusão era notada pela permanência de uma camada de água clarificada (sobrenadante) sobre o topo da mesma, realizava-se a remoção de todo fluido e a extração de amostras de sua camada superficial (topo) para a determinação do teor de umidade. Com os valores dos teores de umidade, foram obtidos os índices de vazios correspondentes à tensão efetiva nula para os três corpos de prova de lama.

O ensaio do adensamento induzido por percolação iniciava-se após o período de tempo necessário para que o corpo de prova adensasse devido ao seu peso próprio e à tensão aplicada pelo pistão de acrílico e para que a contrapressão aplicada ao sistema eliminasse todas as bolhas de ar presentes. Em todos os ensaios realizados, este período foi da ordem de 18 horas. Esta fase do ensaio consistia em se gerar um fluxo pelo corpo de prova através da retirada de água em sua base pela bomba de fluxo. Ao retirar água da base do corpo de prova, com uma velocidade constante, a bomba de fluxo gerava uma diferença de pressão nesta região e, conseqüentemente, um fluxo descendente que provocava o adensamento da amostra. Conectado à base da célula triaxial, permanecia um transdutor diferencial de pressão que, conectado a um sistema de aquisição de dados, possibilitava a obtenção dos valores da poropressão na base do corpo de prova ao longo do tempo de forma precisa. Deve-se ressaltar que, na parte interna do transdutor, era que se situava o principal elemento para a medição da poropressão, ou seja, o diafragma, cujas deformações correspondiam à diferença de pressão aplicada na base do corpo de prova. A partir da equação de calibração do diafragma utilizado nos ensaios, tornou-se possível a obtenção das poropressões, cujos valores serão apresentados a seguir.

O ensaio do adensamento induzido por percolação se iniciava após o fechamento da válvula que ligava a base da célula triaxial ao reservatório de água. Com a válvula de ligação base da célula/bomba de fluxo aberta, a água era retirada do corpo de prova a uma velocidade constante, sendo as deformações verticais da amostra de lama medidas através do rebaixamento da haste apoiada sobre o pistão de acrílico. Quando a seringa

da bomba atingia a sua capacidade máxima de armazenamento, fechava-se a válvula de ligação base da célula/bomba de fluxo, interrompendo-se o modo de operação “infuse”, e abria-se a válvula que conectava a bomba de fluxo ao reservatório, permitindo-se a drenagem da mesma – “refuse”. Estas operações de reversão eram repetidas várias vezes até se atingir a condição de estado permanente, quando não se notava variações significativas da poropressão na base do corpo de prova com o tempo. Atingida esta condição, a altura do corpo de prova era medida, a fim de se determinar o valor do recalque durante essa fase do ensaio.

Concluído o adensamento induzido por percolação, dava-se início à fase do carregamento em etapas, que consistia na colocação de uma massa de 33kg sobre a amostra, ou seja, na aplicação de uma pressão de 50 kPa no topo da mesma. A Figura 3.19 mostra a configuração do sistema na fase do carregamento.

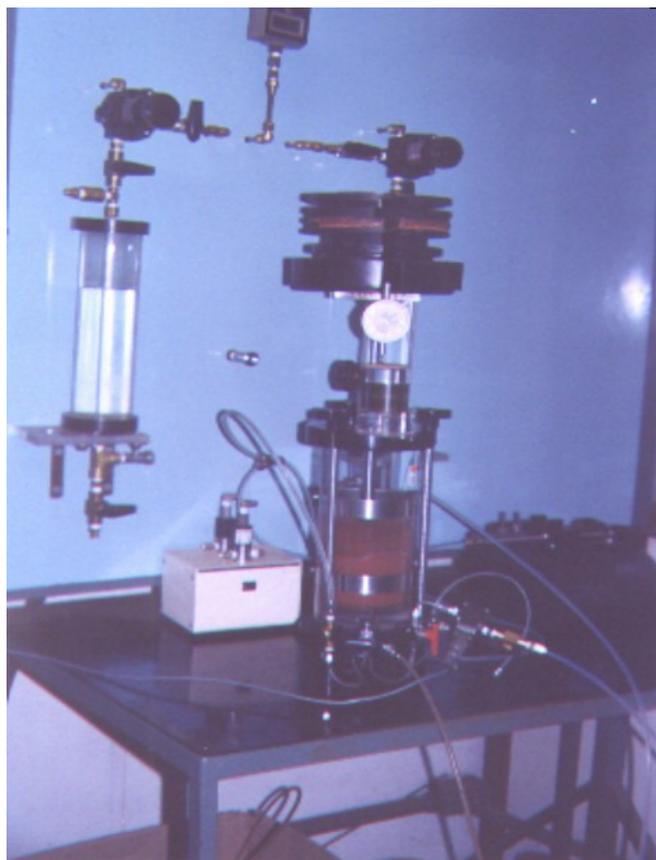


Figura 3.19 - Configuração do sistema na fase do carregamento.

A aplicação desta carga tinha por objetivo provocar uma maior deformação vertical na amostra de lama, possibilitando a obtenção de dados do adensamento em faixas mais elevadas de tensões efetivas, e era realizada em etapas para se evitar a ruptura abrupta do corpo de prova. As medidas das deformações verticais eram realizadas, respectivamente, no início e no final da fase do ensaio do carregamento.

Concluída a fase do carregamento em etapas, iniciava-se a última fase do ensaio HCT – o ensaio da permeabilidade, que consistia na retirada de água da base da amostra a uma velocidade cujo valor era cerca de dez vezes menor que o utilizado na fase do adensamento. Os procedimentos do ensaio eram também semelhantes ao da fase do adensamento, sendo realizada a reversão dos modos “infuse”/“refuse” até a condição de equilíbrio, verificada quando a poropressão na base da amostra de lama pouco variava com o tempo. Para este valor de poropressão (poropressão de equilíbrio), determinava-se o correspondente valor de coeficiente de permeabilidade. Em seguida, desmontava-se todo o sistema e coloca-se o corpo de prova em uma estufa, a uma temperatura de 110°C, para a obtenção de sua massa seca.

### **3.3.2.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de adensamento induzido por percolação**

Apresentam-se, a seguir, os resultados dos ensaios HCT realizados em três corpos de prova da amostra reconstituída da lama. Os corpos de prova preparados com esta amostra – CP 01, CP 02 e CP 03, foram submetidos aos ensaios HCT com diferentes teores de sólidos iniciais, estando estes valores situados em uma faixa dentro da qual acredita-se tenha sido o rejeito fino lançado na área teste. As demais características dos corpos de prova se encontram apresentadas na Tabela 3.2.

Os valores dos índices de vazios iniciais e dos teores de sólidos foram obtidos a partir dos teores de umidade iniciais dos corpos de prova, enquanto os valores dos índices de vazios para a tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ) foram definidos a partir do ensaio específico, conforme mencionado anteriormente. Os valores das alturas de sólidos e das alturas iniciais dos corpos de prova foram obtidos da seguinte forma:

$$H_s = \frac{m_s g}{G \gamma_w A} \quad 3.1$$

$$H_0 = (1 + e_{00}) H_s \quad 3.2$$

em que  $m_s$  é a massa da amostra seca,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $G$  é a densidade real dos grãos, igual a 3.89, e  $A$  é a área do corpo de prova da amostra.

Tabela 3.2 – Características dos corpos de prova de lama submetidos aos ensaios HCT.

Características dos Corpos de Prova	CP 01	CP 02	CP 03
Área - A (cm <sup>2</sup> )	61.93	61.93	61.93
Altura inicial - H <sub>0</sub> (cm)	7.34	10.52	10.22
Altura de sólidos - H <sub>s</sub> (cm)	1.33	2.49	2.36
Índice de vazios inicial - e <sub>0</sub>	6.88	3.41	3.43
Índice de vazios para $\sigma' = 0 - e_{00}$	4.53	3.23	3.33
Teor de umidade inicial - w (%)	176.88	87.71	88.29
Teor de sólidos inicial - P (%)	36.12	53.27	53.11
massa inicial - m <sub>0</sub> (g)	882.80	1124.93	1071.22
massa seca - m <sub>s</sub> (g)	318.84	599.31	568.92

As Figuras 3.20 a 3.25 apresentam os valores das poropressões geradas nas bases dos corpos de prova ao longo do tempo dos ensaios. Ressalte-se que, nas fases de adensamento induzido por percolação, foram aplicadas as velocidades de fluxo ( $q$ ) de 0.250ml/min (CP 01), 0.125ml/min (CP 02/estágio inicial) e 0.150ml/min (CP 02/demais estágios e CP 03), enquanto que, nas fases da permeabilidade, foram aplicadas velocidades de fluxo de 0.025ml/min (CP 01) e de 0.015ml/min (CP 02 e CP 03).

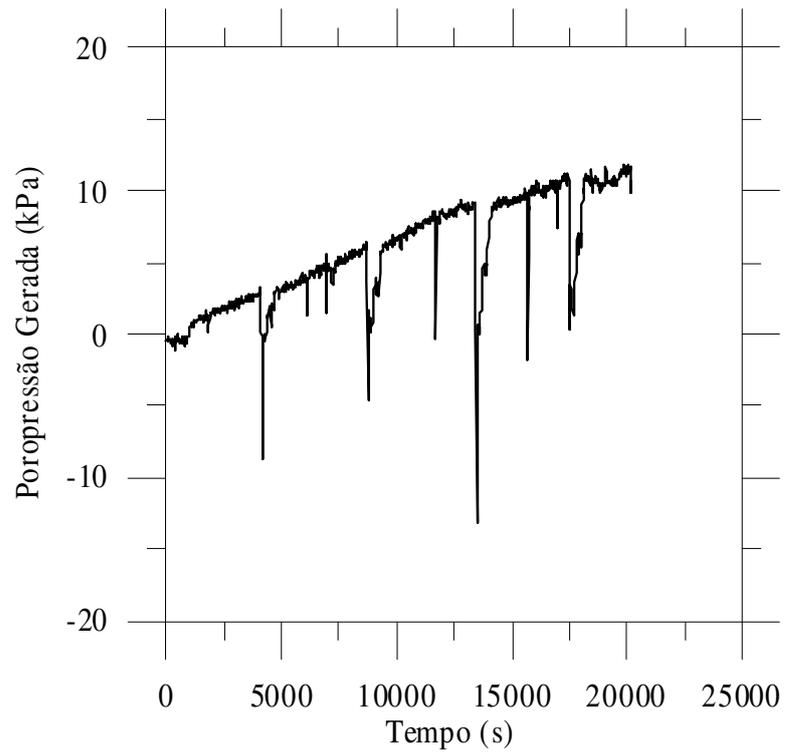


Figura 3.20 – Poropressão gerada na base do CP 01 durante o ensaio de adensamento induzido por percolação.

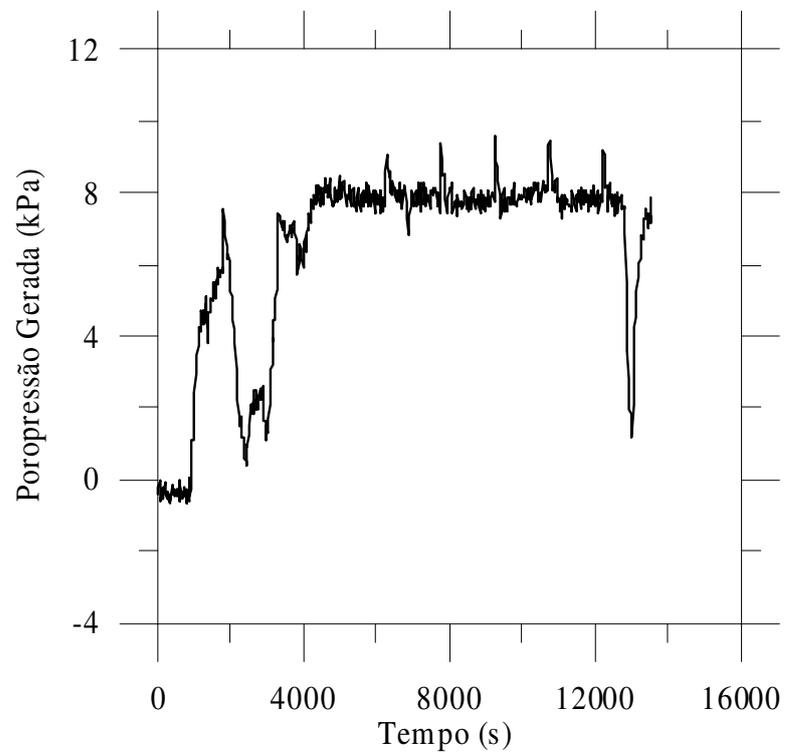


Figura 3.21 – Poropressão gerada na base do CP 01 durante o ensaio da permeabilidade.

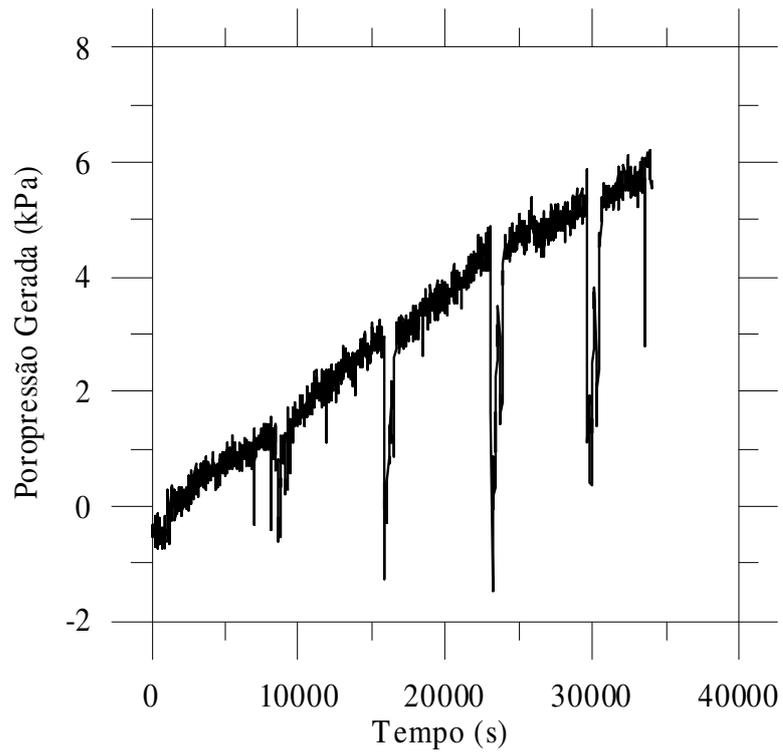


Figura 3.22 – Poropressão gerada na base do CP 02 durante o ensaio de adensamento induzido por percolação.

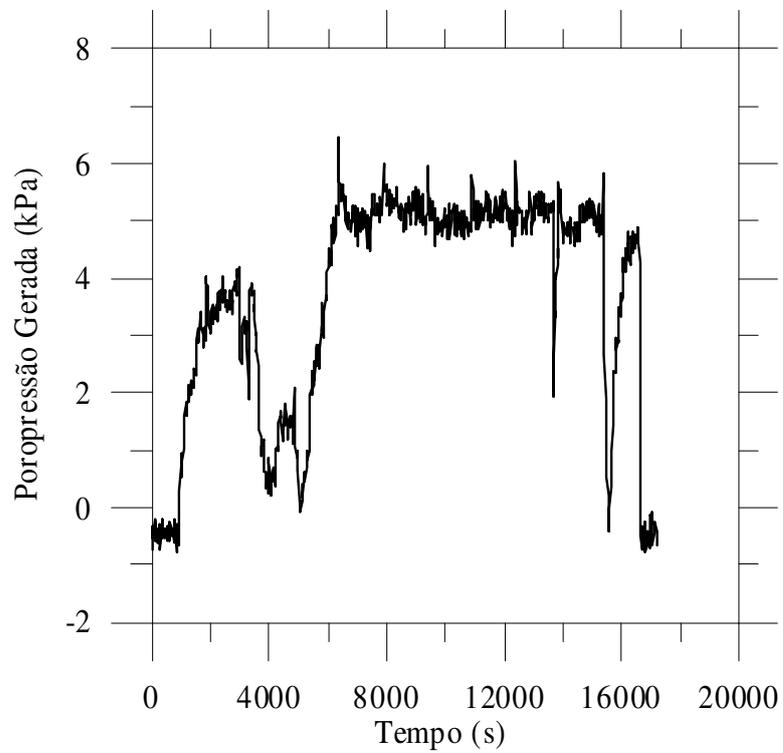


Figura 3.23 – Poropressão gerada na base do CP 02 durante o ensaio da permeabilidade.

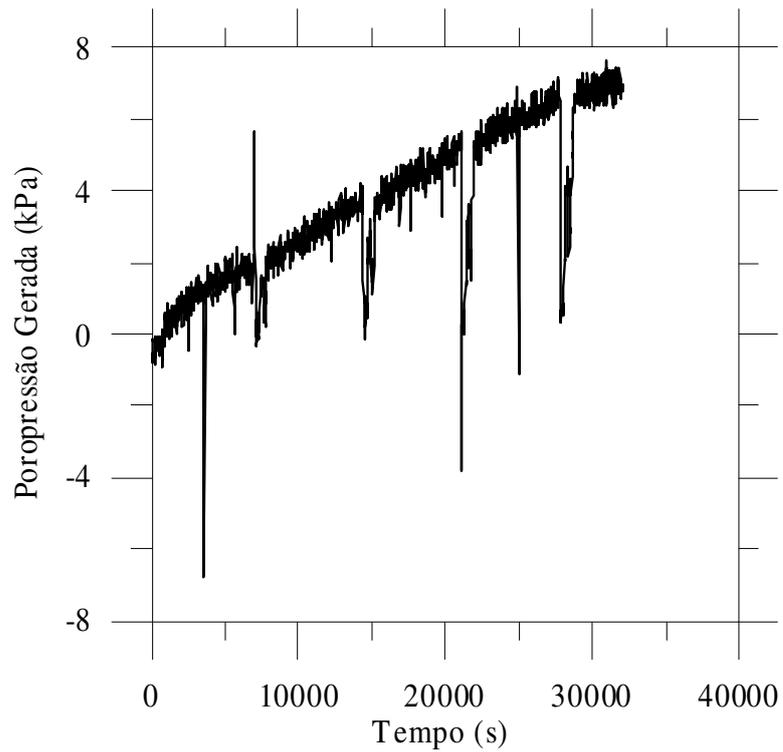


Figura 3.24 – Poropressão gerada na base do CP 03 durante o ensaio do adensamento induzido por percolação.

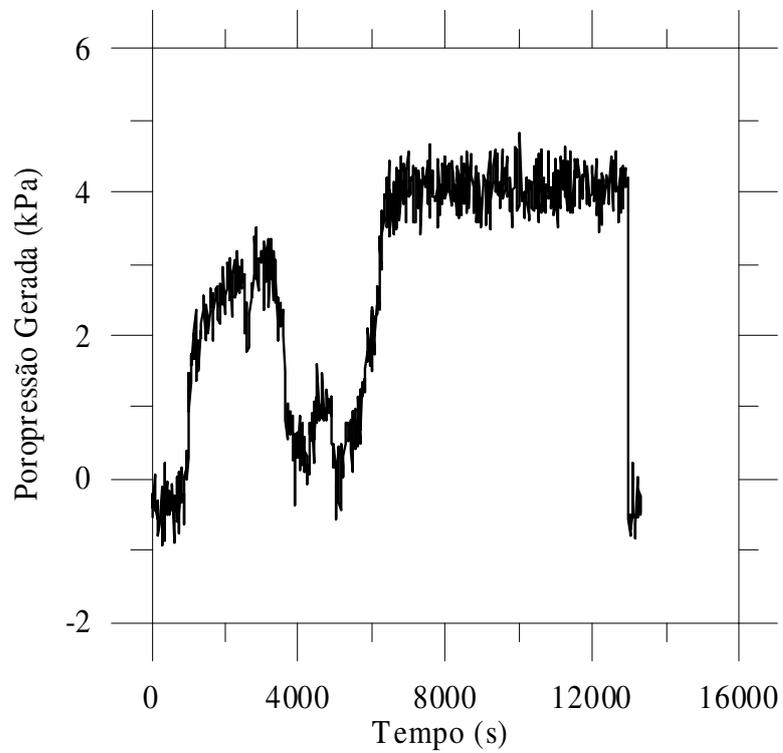


Figura 3.25 – Poropressão gerada na base do CP 03 durante o ensaio da permeabilidade.

Ao se analisar as Figuras 3.20 a 3.25, percebe-se várias quedas abruptas dos valores de poropressões geradas durante alguns intervalos de tempo dos ensaios de adensamento induzido por percolação e de permeabilidade. Deve-se destacar que estas variações representam os instantes em que foram realizadas as reversões das seringas da bomba de fluxo ou, como no caso do ensaio do adensamento realizado com o CP 02, o instante da mudança de velocidade de fluxo ( $q$ ).

### **3.3.2.3 - Análise dos resultados e obtenção dos parâmetros constitutivos de compressibilidade e permeabilidade da lama**

A análise dos resultados dos ensaios HCT com bomba de fluxo foi realizada empregando-se o programa computacional denominado SICTA – “Seepage Induced Consolidation Test Analysis”. Desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992), este programa tem como base um algoritmo de estimativa baseado no método de Gauss-Newton acoplado à técnica de busca linear e permite a obtenção dos parâmetros das funções de compressibilidade ( $A$ ,  $B$  e  $Z$ ) e de permeabilidade ( $C$  e  $D$ ), apresentadas no Capítulo 2. Maiores informações sobre este programa e sobre os procedimentos por ele empregados para a determinação dos parâmetros de compressibilidade e de permeabilidade podem ser encontradas também em Botelho (2001).

Como dados de entrada para o SICTA, devem ser fornecidos as características dos corpos de prova e os demais dados obtidos a partir dos ensaios realizados. Na Tabela 3.3 se encontram os principais dados utilizados nas análises dos parâmetros da lama, obtidos a partir da interpretação dos dados dos ensaios realizados nos três corpos de prova da amostra reconstituída deste material.

Tabela 3.3 – Dados utilizados na análise dos parâmetros da lama.

Corpo de prova	CP 01	CP 02	CP 03
Poropressão gerada no adensamento induzido por percolação - $\Delta u$ (kPa)	11.50	5.50	7.00
Tensão efetiva na base - $\sigma'_f$ (kPa)	12.72	7.23	8.00
Velocidade darciniana - $v$ (m/s)	$6.73 \times 10^{-7}$	$4.04 \times 10^{-7}$	$4.04 \times 10^{-7}$
Tensão efetiva (kPa)	50.00	50.00	50.00
Altura após adensamento por percolação (cm)	4.42	7.73	7.15
Altura final - $H_f$ (cm)	2.93	5.63	5.31
Índice de vazios final - $e_f$	1.20	1.26	1.25
Poropressão gerada no estado de equilíbrio/ensaio de permeabilidade - $\Delta u$ (kPa)	8.00	5.50	4.40
Coefficiente de permeabilidade - $k$ (m/s)	$2.37 \times 10^{-9}$	$3.95 \times 10^{-9}$	$4.70 \times 10^{-9}$

Destaca-se que a tensão efetiva na base ( $\sigma'_f$ ), correspondente ao final do ensaio do adensamento induzido por percolação, foi calculada pela Equação 3.3.

$$\sigma'_f = \sigma'_t + (\gamma_s - \gamma_w)z + \Delta u \quad 3.3$$

em que  $\sigma'_t$  é a tensão produzida pelo pistão de acrílico, igual a 0.10 kPa,  $(\gamma_s - \gamma_w)z$  é a tensão devida ao peso próprio do corpo de prova da amostra de lama e  $\Delta u$  é a poropressão gerada durante o ensaio.

Esta equação corresponde, na verdade, ao somatório de todas as tensões atuantes no corpo de prova, incluindo-se a tensão devida às forças de percolação, expressada pela parcela de poropressão ( $\Delta u$ ) gerada durante o ensaio.

Já o índice de vazios final ( $e_f$ ), obtido após o carregamento em etapas, foi determinado pela Equação 3.4.

$$e_f = \left( \frac{H_f}{H_s} \right) - 1 \quad 3.4$$

em que  $H_s$  é a altura de sólidos (Tabela 3.2) e  $H_f$  é a altura do corpo de prova após a aplicação da carga.

E o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) de cada um dos corpos de prova da amostra de lama foi calculado utilizando-se a Equação 3.5.

$$k = \frac{v H_f \gamma_w}{\Delta u} \quad 3.5$$

em que  $v$  é a velocidade darciniana, relação entre a velocidade de fluxo ( $q$ ) e a área do corpo de prova,  $H_f$  é a altura final do corpo de prova e  $\Delta u$  é a poropressão gerada no estado de equilíbrio, obtida no gráfico poropressão x tempo do ensaio de permeabilidade.

Analisando-se os valores dos coeficientes de permeabilidade encontrados para os três corpos de prova, pode-se concluir que os mesmos são característicos da lama em estudo, classificada como um silte argiloso.

Os dados apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3, juntamente com o peso específico das partículas sólidas da lama ( $\gamma_s = 38.16 \text{ kN/ m}^3$ ) e o peso específico da água ( $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/ m}^3$ ), foram utilizados como variáveis de entrada do programa SICTA, que, após ser executado, forneceu os parâmetros constitutivos das funções de compressibilidade e de permeabilidade para cada um dos três corpos de prova submetidos aos ensaios HCT. Os parâmetros obtidos se encontram apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros constitutivos das funções de compressibilidade e de permeabilidade dos corpos de prova da amostra de lama.

Parâmetro	CP 01	CP 02	CP 03
A ( $\text{kPa}^{-1}$ )	2.5438	2.1943	2.1366
B	-0.1920	-0.1418	-0.1370
C (m/s)	$1.0946 \times 10^{-9}$	$1.1123 \times 10^{-9}$	$1.5560 \times 10^{-9}$
D	4.2370	5.4833	4.9540
Z (kPa)	0.0495	0.0655	0.0392

Comparando-se os valores dos parâmetros obtidos para cada um dos três corpos de prova da amostra de lama, notou-se uma maior aproximação entre os encontrados para os CP 02 e 03, que apresentaram, inicialmente, semelhantes teores de sólidos. Com relação ao parâmetro C, observou-se que não houve variação da ordem de grandeza entre os valores encontrados para os corpos de prova com diferentes teores de sólidos iniciais. Entretanto, esta característica não foi verificada para os demais parâmetros (A, B, D e Z). Assim, espera-se que o teor de sólidos inicial de um solo submetido ao ressecamento influencie diretamente nas suas funções de compressibilidade e de permeabilidade.

As Figuras 3.26 e 3.27 apresentam, respectivamente, as curvas de compressibilidade e permeabilidade da lama, obtidas a partir de ensaios HCT utilizando-se a bomba de fluxo.

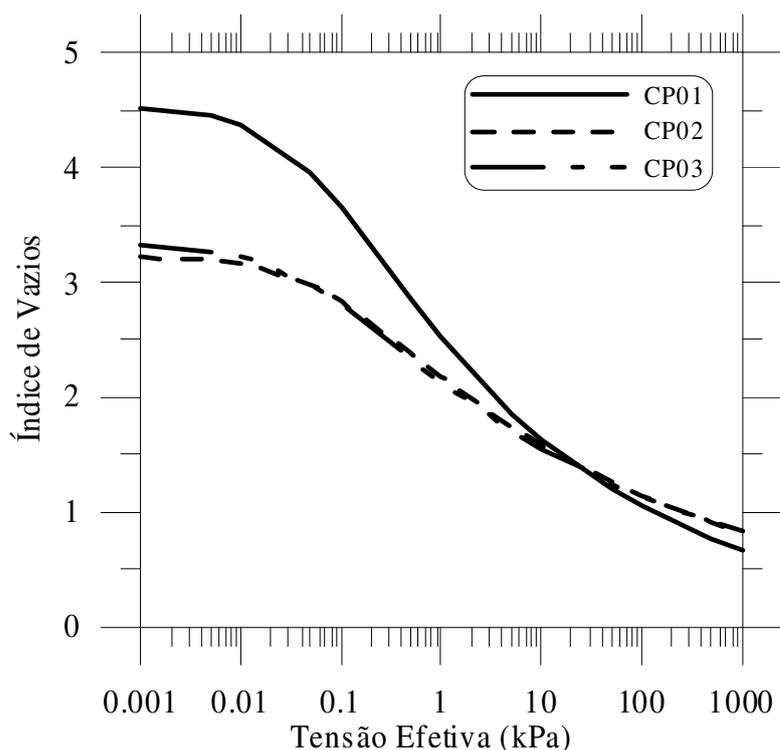


Figura 3.26 – Curvas de compressibilidade da lama.

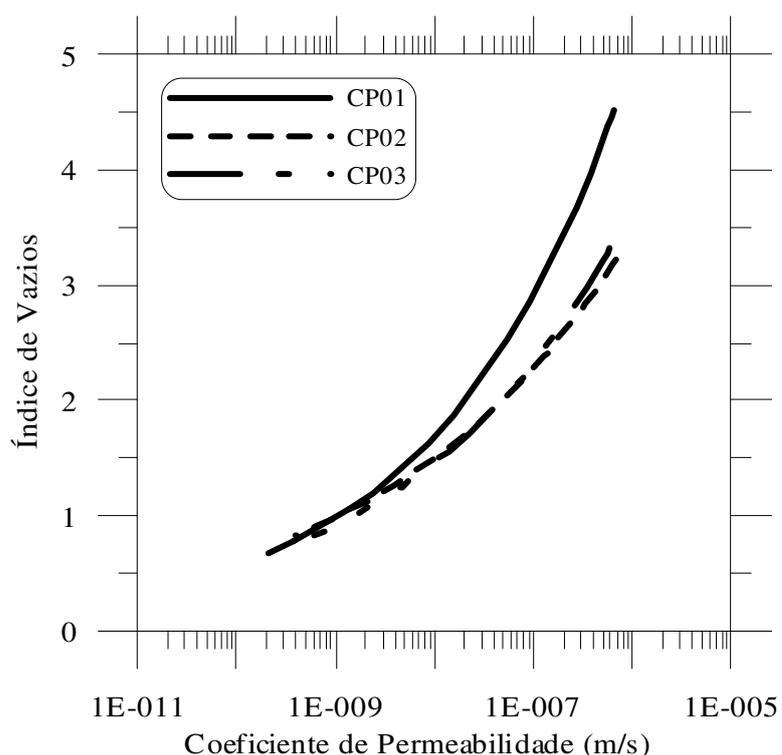


Figura 3.27 – Curvas de permeabilidade da lama.

Analisando-se as curvas de compressibilidade obtidas, notou-se a diminuição progressiva dos índices de vazios com o aumento das tensões efetivas. Este comportamento mostra a função do adensamento, que, ao expulsar a água dos vazios de um solo fino, possibilita um melhor contato entre as suas partículas sólidas, aumentando, portanto, as tensões efetivas por ele resistidas.

A partir das curvas de permeabilidade, pode-se concluir que a relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade é diretamente proporcional. A diminuição do índice de vazios aumenta a dificuldade da água em percolar através de uma camada de solo, o que implica na redução do seu coeficiente de permeabilidade. O CP 01 foi o mais permeável, dado ao seu maior valor de índice de vazios inicial.

### **CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE RESSECAMENTO**

Neste capítulo, apresentam-se os estudos realizados para a calibração do modelo numérico de ressecamento do solo fino mole (lama) proveniente do beneficiamento do minério de ferro, cuja solução é obtida com o emprego do software CONDES. Várias simulações numéricas foram realizadas, utilizando-se os dados obtidos por Silva (2003) em um estudo de campo e os demais parâmetros necessários às análises, como as funções características e propriedades da lama.

Ressalte-se que grande parte dos parâmetros necessários às análises foi determinada na parte experimental deste trabalho, como apresentado no Capítulo 3. Os dados referentes à carga de poropressão na base, evaporação na superfície e à “cracking function” obtidos por Silva (2003) foram utilizados como dados de entrada para a simulação via CONDES, enquanto os perfis de índices de vazios e trincas ao longo da profundidade da camada e a curva de recalque foram utilizados para a comparação entre os dados numéricos e os reais, ou seja, os obtidos no campo.

#### **4.1 – Considerações iniciais**

O fenômeno do adensamento precede o do ressecamento. Assim, para uma análise de ressecamento, os dados iniciais devem ser aqueles herdados da fase anterior. Na calibração do modelo, havia duas possibilidades para a definição desses valores. Uma opção seria utilizar os resultados de campo (Silva, 2003) dos perfis de distribuição de índice de vazios e altura final do depósito. Uma outra opção seria simular o adensamento e utilizar os resultados finais como ponto de partida para a simulação de ressecamento.

Como comentado no Capítulo 3, a qualidade das amostragens na fase do adensamento não foi boa. Assim, optou-se pela segunda alternativa para a definição das condições iniciais, cuidando-se de que o perfil escolhido para a simulação fosse o que mais se aproximasse das alturas do depósito medidas em campo, principalmente da correspondente à fase final do processo.

## **4.2 – Simulações numéricas da fase de adensamento**

As simulações numéricas de adensamento objetivaram fornecer condições iniciais mais realistas para o estudo de ressecamento, como discutido anteriormente. Nesse sentido, foram realizadas simulações para avaliar o impacto dos principais dados do problema, como as relações constitutivas da lama, condições de contorno que governaram o processo, principalmente a carga de poropressão na base da camada, e a altura inicial ( $H_0$ ) da camada, no processo de adensamento da lama. As simulações de adensamento SA1 e SA2 investigaram as relações constitutivas e seu impacto nas análises, enquanto as simulações SA3, SA4 e SA5 examinaram os fatores restantes, relacionados às condições de contorno e tipo de enchimento.

### **4.2.1 - Simulações SA1 e SA2**

Os dados de entrada para estas simulações se encontram apresentados na Tabela 4.1. Os comentários sobre a escolha dos valores nela apresentados são descritos a seguir.

Os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade empregados nas simulações SA1 e SA2 correspondem, respectivamente, aos valores obtidos a partir de ensaios HCT realizados nos corpos de prova de lama CP01 e CP02. Os parâmetros do CP03 não foram considerados em nenhuma análise por serem as suas funções de compressibilidade e permeabilidade idênticas às obtidas para o CP02.

A carga de poropressão na base da camada –  $h_p=0,340$  m, corresponde à média dos valores das leituras piezométricas registradas durante a fase de adensamento.

Tabela 4.1 – Dados de entrada para as simulações de adensamento SA1 e SA2.

Dados/Parâmetros		SA1	SA2
Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade	A (kPa <sup>-1</sup> )	2.5438	2.1943
	B	-0.1920	-0.1418
	C (m/dia)	9.45 x 10 <sup>-5</sup>	9.61 x 10 <sup>-5</sup>
	D	4.2370	5.4833
	Z (kPa)	0.0495	0.0655
Altura inicial da camada – H <sub>0</sub> (m)		2.05	1.57
Condições de contorno	Base	h <sub>p</sub> = 0.34 m	
	Topo	sobrecarga nula	
Peso específico da água - γ <sub>w</sub> (kN/m <sup>3</sup> )		9.81	
Densidade real dos grãos - G		3.89	
Índice de vazios mínimo - e <sub>mín</sub>		1.05	
Estágio enchimento		não considerado	
Tempo partida (dia)		0	
Intervalo tempo máximo (dia)		0.005	

Como perfil representativo da fase de adensamento, tomou-se o obtido no estágio inicial do processo de ressecamento – dia 142. Acredita-se que este perfil seja bem característico do final do adensamento, não só pelo fato dele corresponder a um instante de tempo bem posterior ao do final do enchimento, e, portanto, com o adensamento já completado, mas também porque a água mantida sobre o topo da camada de lama durante a fase de espera (dias 54 a 138) impediu o desenvolvimento do fenômeno do ressecamento, seja por evaporação superficial ou por ação capilar (drenagem pela base).

Por simplicidade, as simulações foram realizadas supondo enchimento instantâneo, utilizando a altura inicial da camada (H<sub>0</sub>) calculada pela Equação 3.2, em função do índice de vazios corresponde à tensão efetiva nula (e<sub>00</sub>) e da altura de sólidos (H<sub>s</sub>). Esta última grandeza foi calculada a partir dos valores dos índices de vazios dos perfis obtidos por Silva (2003) durante a fase do ressecamento em campo, empregando-se a seguinte relação:

$$H_s = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta H_i}{1 + e_i} \quad 4.1$$

em que n é o número de amostras extraídas ao longo da profundidade da camada de lama, em um mesmo ponto de amostragem,  $\Delta H$  é a altura da amostra de lama e e é índice de vazios correspondente ao intervalo  $\Delta H$ .

O valor de  $H_s$  adotado para o cálculo da altura inicial da camada de lama foi 0.371m, correspondente à média de todos os valores encontrados para esta grandeza em cada um dos diversos perfis de índices de vazios de campo.

Os demais dados apresentados na Tabela 4.1 foram também necessários para a realização das análises via CONDES, sendo mantidos constantes para ambas as simulações.

Os resultados obtidos para as simulações SA1 e SA2 se encontram apresentados na Tabela 4.2 e as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, as curvas de recalque e os perfis de índices de vazios finais da fase do adensamento destas simulações e os obtidos em campo.

Tabela 4.2 – Resultados das simulações SA1 e SA2.

Simulação	Altura final da camada (m)	Tempo parada simulação (dia)
SA1	1.05	62
SA2	1.02	25

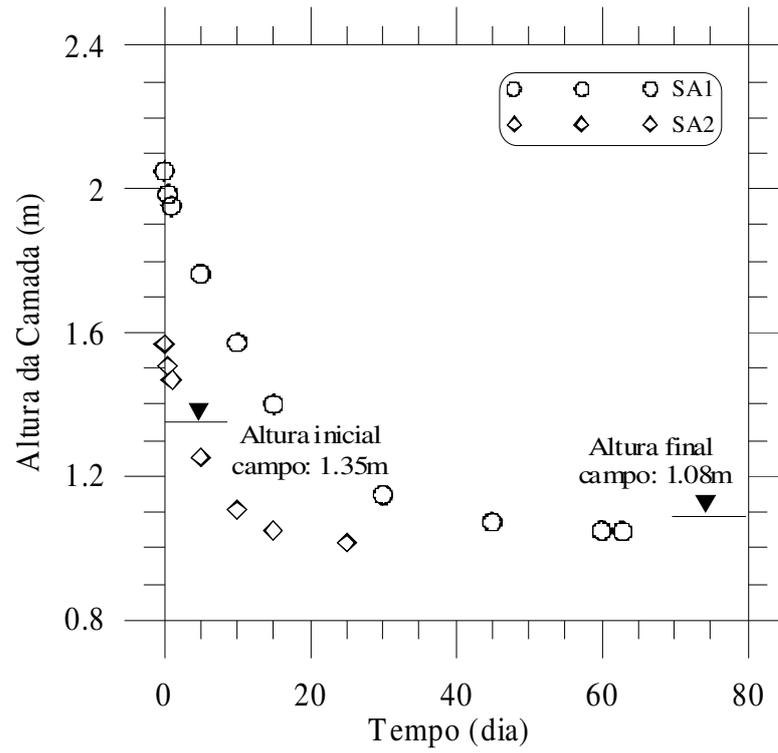


Figura 4.1 – Curvas de recalque de campo e das simulações SA1 e SA2.

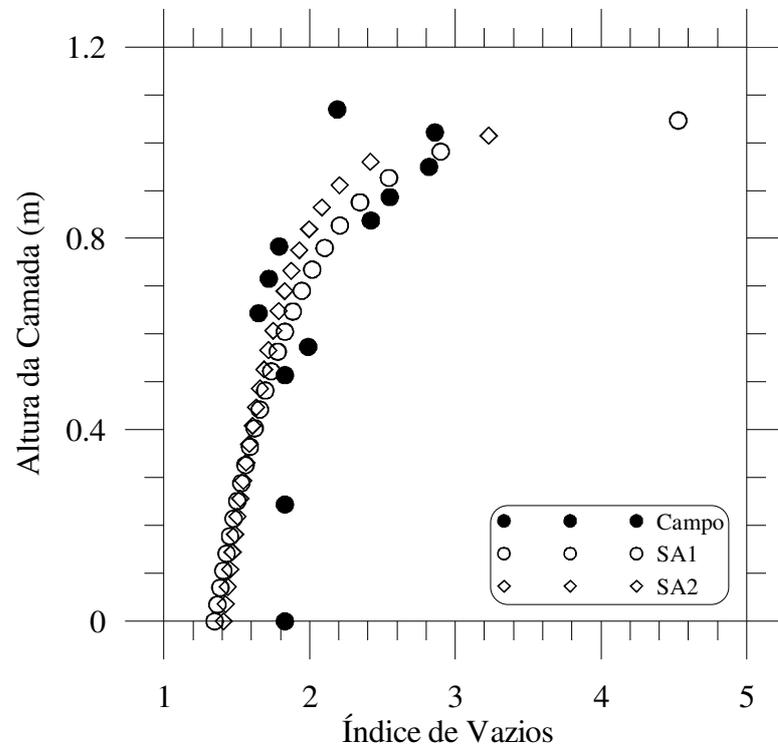


Figura 4.2 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SA1 e SA2.

Analisando-se a Tabela 4.2 e as Figuras 4.1 e 4.2, pode-se concluir que a simulação SA1 foi a mais representativa, pois apresentou altura final de camada e perfil de índices de vazios mais próximos da situação de campo. Esta verificação demonstrou serem os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade do CP01 os mais representativos para a simulação de adensamento da lama.

#### 4.2.2 - Simulações SA3, SA4, e SA5

Uma vez definido que as relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade do CP01 foram as que possibilitaram uma maior aproximação análise numérica/dados de campo, novas simulações foram realizadas, adotando-se estas relações e variando-se os valores de carga de poropressão na base da camada de lama e o processo de enchimento. Todas estas novas simulações de adensamento, classificadas como SA3, SA4 e SA5, foram realizadas em etapas, com diferentes condições de contorno de base para cada uma delas, como indica a Tabela 4.3. Além disso, a SA5 considerou o enchimento contínuo, cuja ocorrência se deu durante 34 dias, a uma taxa constante de disposição de lama de 0,0603 m/dia (Silva, 2003).

Tabela 4.3 – Condições de contorno para a base da camada/simulações SA3 a SA5.

Simulação	Etapas	Condição contorno base	Período de tempo (dia)
SA3	1	$h_p=1.35\text{m}$	0 a 10
	2	$h_p=0.70\text{m}$	10 a 40
	3	$h_p=0.34\text{m}$	40 a 140
SA4	1	impermeável	0 a 12
	2	$h_p=0.34\text{m}$	12 a 140
SA5	1	$h_p=0.0\text{m}$	0 a 10
	2	$h_p=0.17\text{m}$	10 a 20
	3	$h_p=0.34\text{m}$	20 a 34
	4	$h_p=0.34\text{m}$	34 a 174

Ressalte-se que os demais parâmetros e dados necessários à realização destas simulações foram os mesmos adotados para as anteriores, estando eles apresentados na Tabela 4.1.

As três simulações acima foram pensadas de forma a reproduzir, cada uma a seu modo, o mais próximo possível, as condições de campo. Na simulação de enchimento contínuo - SA5, foi suposto um aumento gradual na carga de pressão na base durante a fase de enchimento, cuja ocorrência se deu durante 34 dias. A diferença de carga hidráulica entre a superfície da lama e a base nunca excedeu a 1.35m – altura inicial da camada de lama em campo, após a interrupção do enchimento, e, provavelmente, como as análises e observação de campo indicaram, este valor esteve em torno de 70cm. Além disso, no processo de adensamento verificado no campo há duas parcelas atuantes: peso próprio, que independe das condições de contorno, e força de percolação, esta última afetada pela diferença de carga hidráulica entre o topo e a base. Essa diferença de carga hidráulica foi o que norteou a escolha das condições de contorno na base nas simulações onde se teve enchimento instantâneo - SA3 e SA4. Estas simulações são perfeitamente aceitáveis uma vez assegurada a mesma altura de sólidos ( $H_s$ ) e considerando que, na situação de regime permanente, a diferença máxima de carga hidráulica entre a superfície e a base era igual a 70cm. Nas duas simulações de enchimento instantâneo, é fácil se demonstrar que essas condições foram respeitadas. Destaca-se que, para a continuidade de cada uma das simulações acima apresentadas, a altura e o perfil de índices de vazios finais de uma etapa anterior eram transformados, respectivamente, em altura e perfil de índices de vazios iniciais da etapa seguinte. Este procedimento, ao possibilitar a divisão de cada uma das simulações em várias etapas, tornou as análises numéricas mais próximas da situação real, como discutido anteriormente.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados das simulações SA3 a SA5 no tocante as alturas finais em cada uma das etapas em que foram divididas as análises.

Os resultados da altura final do depósito são muito próximos entre si e do valor de campo (1.08 m), o que não é surpresa, tendo em vista que as condições de contorno eram como que equivalentes. Os tempos em que as simulações pararam indicam o final do adensamento em termos práticos, embora apenas o tempo da simulação de enchimento contínuo tenha realidade física. Este último tempo, dia 72, é bem anterior ao

início do ressecamento, dia 174, o que suporta a hipótese de usar qualquer perfil de campo entre este intervalo de tempo para a comparação das condições iniciais.

Tabela 4.4 – Resultados das simulações SA3 a SA5.

Simulação	Etapa	Altura final camada (m)	Tempo parada simulação (dia)
SA3	1	1.60	10
	2	1.12	40
	3	1.08	55
SA4	1	1.69	12
	2	1.06	68
SA5	1	0.41	10
	2	0.77	20
	3	1.27	34
	4	1.07	72

As Figuras 4.3 e 4.4 exibem, respectivamente, as curvas de recalque e os perfis de índices de vazios ao longo da profundidade da camada de lama para simulações SA3, SA4 e SA5 e para a condição de campo no final do processo de adensamento.

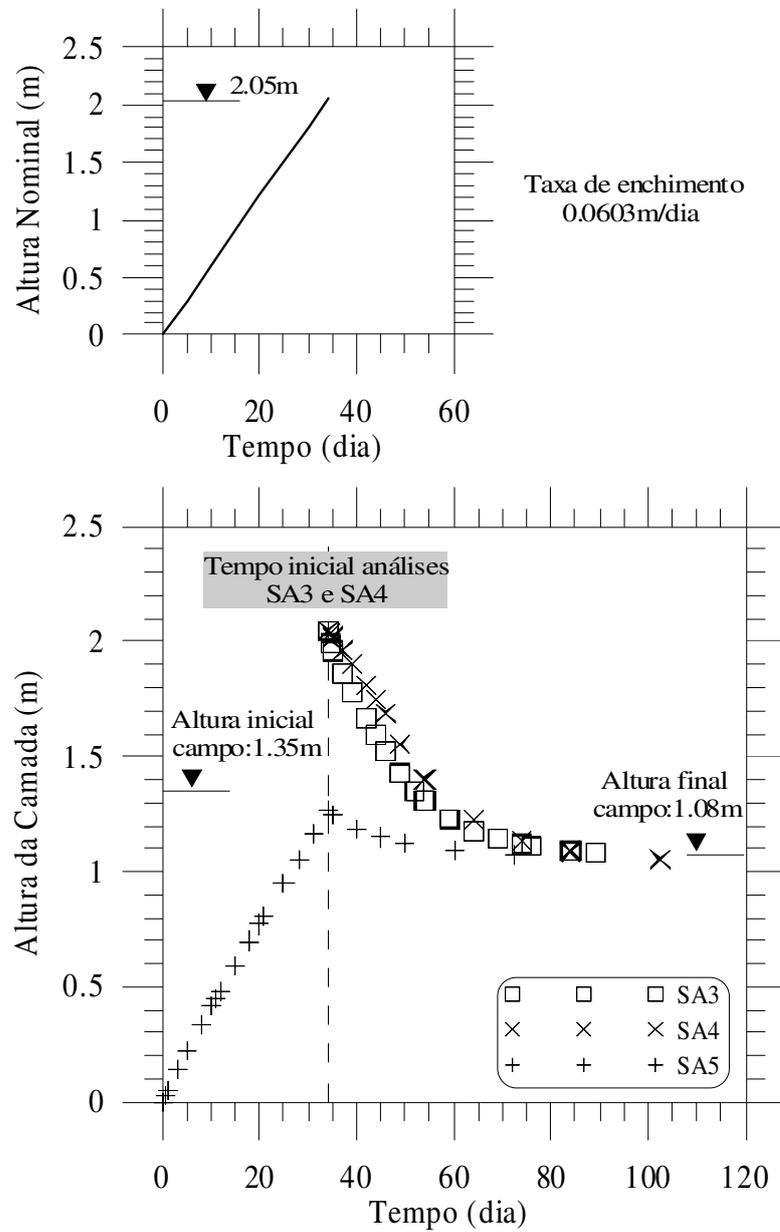


Figura 4.3 – Curvas de recalque de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.

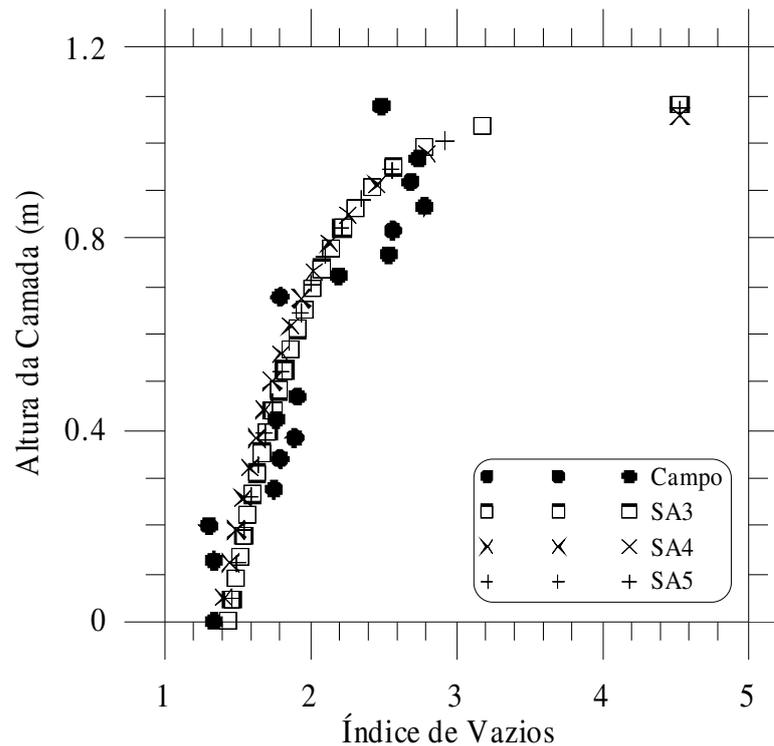


Figura 4.4 – Perfis de índice de vazios de campo e das simulações SA3, SA4 e SA5.

A análise da Figura 4.3 confirma, graficamente, a boa correspondência entre os valores previstos pelas simulações SA3, SA4 e SA5 e os valores de campo. A SA3 foi a mais próxima da situação real. Ao se analisar os resultados da SA5, constatou-se, também, que a altura da camada de lama obtida no final do enchimento (1.27m) não apresentou grande dispersão quando comparada à encontrada em campo, cujo valor foi de 1.35m. Além disso, os recalques experimentados pela camada na simulação e na condição de campo após a interrupção do enchimento também foram próximos - 27cm observados *versus* 20cm previstos pela análise. Notou-se, também, o significativo recalque devido ao adensamento mesmo durante o período de enchimento quando se comparou as curvas da altura nominal do depósito (altura nominal *versus* tempo) e a de recalque da análise (altura da camada *versus* tempo).

Assim, concluiu-se que os resultados obtidos nas simulações, especialmente nas SA3 e SA5, representavam bem a condição de campo, sendo os mesmos utilizados como dados de entrada para as simulações das fases do ressecamento, cujas descrições se encontram apresentadas no item a seguir.

### 4.3 – Simulações numéricas da fase de ressecamento

Definidos os perfis de índices de vazios e os valores de altura da camada de lama que dariam partida às simulações de ressecamento, as mesmas foram iniciadas, com as demais condições de contorno necessárias às análises apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Condições de contorno das simulações de ressecamento.

Dados/Parâmetros		Valores adotados
Parâmetros da contração tridimensional	A2	2.5438
	B2	-0.1920
Parâmetros da “cracking function”	a	0.3859
	b	0.0508
	c	1.3665
	d	$0.626 \times 10^{18}$
Condições de contorno	Base	$h_p = -0.55$ m
	Topo	evaporação: $2 \times 10^{-3}$ m/dia
Índice de vazios da formação de crosta - $e_{cv}$		1.05

Os valores dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade, da densidade real dos grãos da lama, do peso específico da água, do índice de vazios mínimo e do intervalo de tempo máximo, também necessários às análises de ressecamento, foram os mesmos utilizados nas simulações de adensamento SA3 e SA5.

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 4.5, observa-se que os valores dos parâmetros A2 e B2 da contração tridimensional são idênticos aos dos parâmetros A e B da compressão unidimensional. A justificativa para esta adoção foi anteriormente exposta no item 2.7.5. Os parâmetros da “cracking function” foram os definidos por Silva (2003) a partir do ajuste dos dados índice de vazios x tensão vertical total na abertura das trincas – Figura 3.9, e, para o índice de vazios de formação da crosta, foi adotado o mesmo valor do índice de vazios mínimo. Como condições de contorno para a base e para o topo da camada de lama foram adotados, respectivamente, os valores

médios das cargas de poropressão de sucção e das taxas de evaporação registradas durante a fase de ressecamento em campo. Devido ao fato das simulações de ressecamento que incluem a fase tridimensional de abertura de trincas não poderem ser realizadas em etapas, concluiu-se que, empregar valores médios para as condições de contorno do topo e da base em análises únicas seria uma opção.

Um outro dado importante para a simulação de ressecamento via CONDES é o valor do parâmetro  $\eta$ . Devido ao fato deste valor não ser conhecido para o local onde se deu a ocorrência do fenômeno e nem por existir disponível, até o presente momento, ensaios para a sua determinação, as simulações da fase de ressecamento foram realizadas para diferentes valores de  $\eta$ , mantendo-se fixos os demais dados e parâmetros. Assim, foram realizadas simulações para o ressecamento (SR) a partir dos perfis de índices de vazios/ alturas de camada finais das simulações de adensamento SA3 e SA5 e dos dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.5, com valores de  $\eta$  variando de 1.5 a 3.0, como apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classificação das simulações de ressecamento.

Simulação	Perfil de índices de vazios/ altura inicial camada	$\eta$
SR1.1	resultados finais simulação adensamento SA3	1.5
SR1.2		2.0
SR1.3		2.5
SR1.4		3.0
SR2.1	resultados finais simulação adensamento SA5	1.5
SR2.2		2.0
SR2.3		2.5
SR2.4		3.0

Destaca-se que os valores adotados para  $\eta$  foram definidos em função de análises de diversos estudos de ressecamento encontrados na literatura. Além disso, todas as simulações de ressecamento se iniciaram com a mesma distribuição de índices de vazios

inicial, como pode ser visto na Figura 4.4, sendo adotados, como tempos inicial e final para elas, os dias 140 e 210, respectivamente. Apesar da simulação SA5 ter iniciado 34 dias antes da SA3 (período de enchimento), esta diferença de tempo não foi considerada nas análises de ressecamento, pois, muito antes do dia 140, a camada de lama já tinha atingido as condições finais de adensamento que se constituíram pontos de partida para a avaliação de sua secagem. O tempo final para as simulações numéricas de ressecamento via CONDES foi definido em função da data correspondente aos últimos dados de recalque e de perfis de índices de vazios obtidos em campo.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados das simulações de ressecamento.

Tabela 4.7 – Resultados das simulações do ressecamento.

Simulação	Altura final camada (m)	Tempo parada simulação (dia)
SR1.1	0.929	210
SR1.2	0.921	210
SR1.3	0.912	210
SR1.4	0.913	203
SR2.1	0.926	210
SR2.2	0.917	210
SR2.3	0.910	209
SR2.4	0.918	202

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 4.7, vê-se que as análises SR1.4, SR2.3 e SR2.4 foram interrompidas antes das datas finais impostas às simulações. Este fato foi devido às análises terem alcançado o valor do índice de vazios mínimo -  $e_{\min}$ , o que constitui um critério de parada automática do CONDES.

Além disso, pode-se verificar também que, no final do processo de ressecamento, cuja ocorrência se deu dentro de um prazo de 70 dias, todas as simulações de ressecamento apresentaram, praticamente, os mesmos valores de alturas de camada, mostrando que, muito mais que os intervalos de tempo impostos para o início e fim das análises, foram as condições de contorno estabelecidas, como perfis de índices de vazios

iniciais, taxa de evaporação e carga de poropressão na base, que, de fato, governaram as simulações.

As Figuras 4.5 a 4.14 apresentam as curvas de recalque e os perfis de trincas e de índices de vazios ao longo da profundidade da camada característicos da fase de ressecamento, obtidos através das simulações numéricas e do monitoramento em campo.

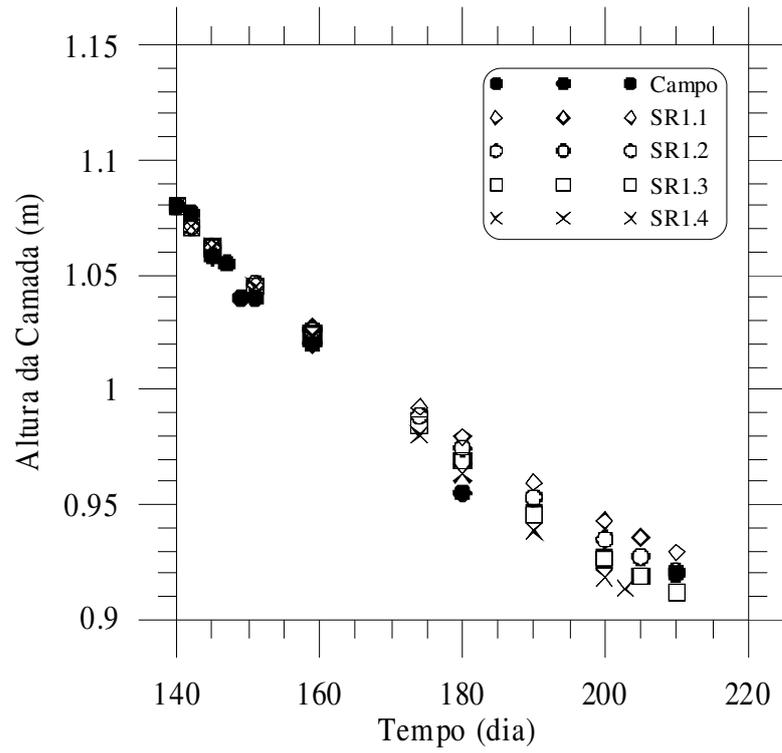


Figura 4.5 – Curvas de recalque de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4.

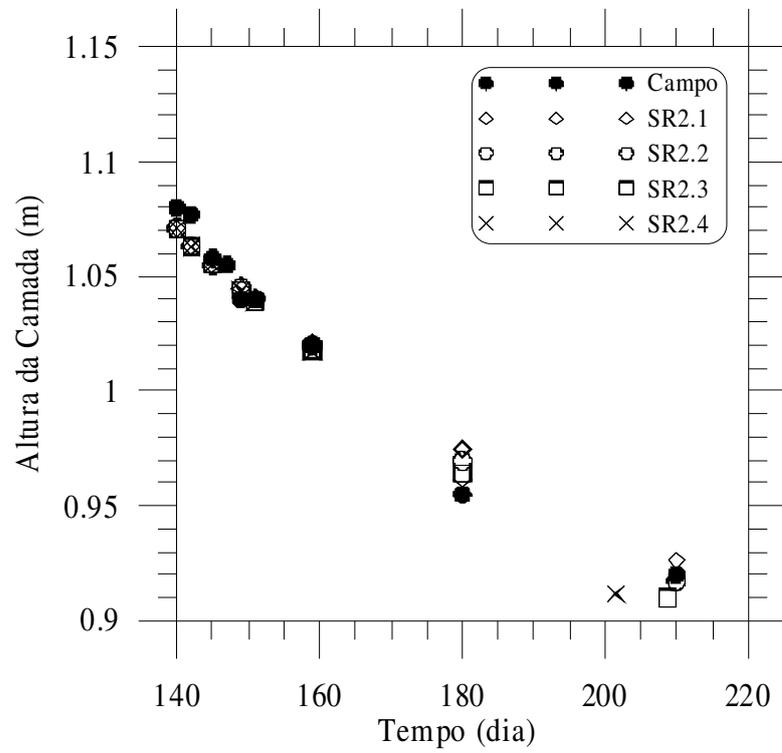


Figura 4.6 – Curvas de recalque de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4.

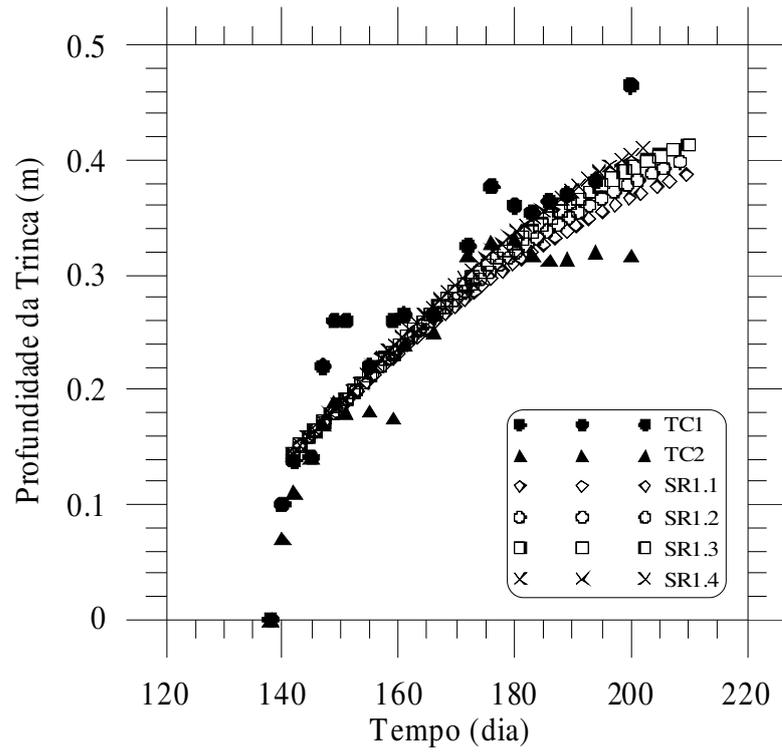


Figura 4.7 – Perfis de trincas de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4.

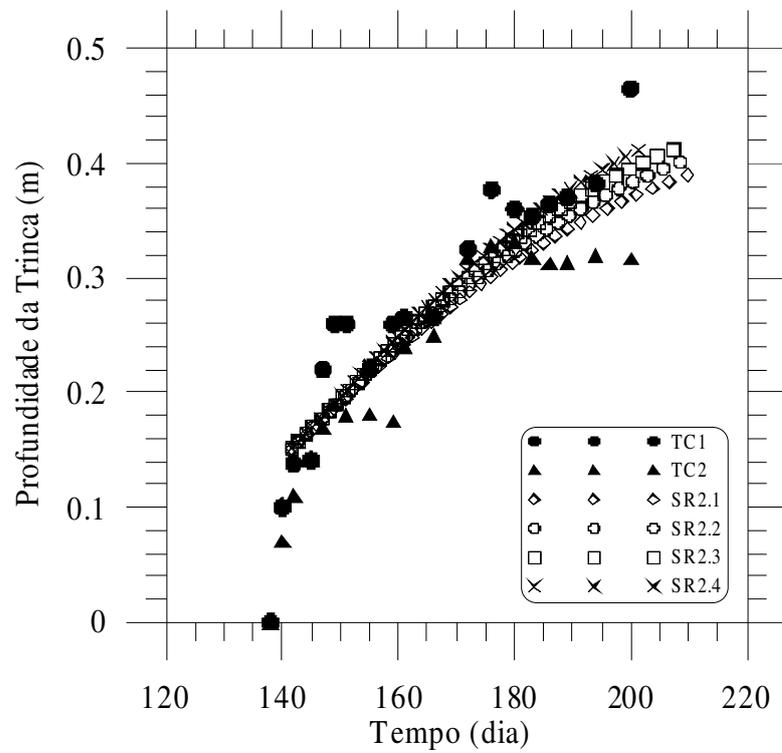


Figura 4.8 – Perfis de trincas de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4.

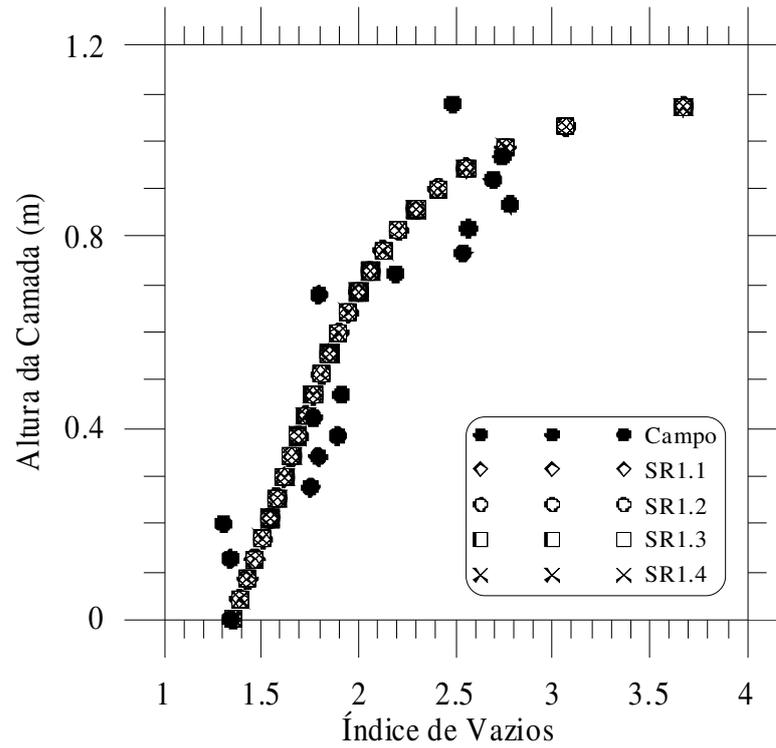


Figura 4.9 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 - fase inicial (dia 142).

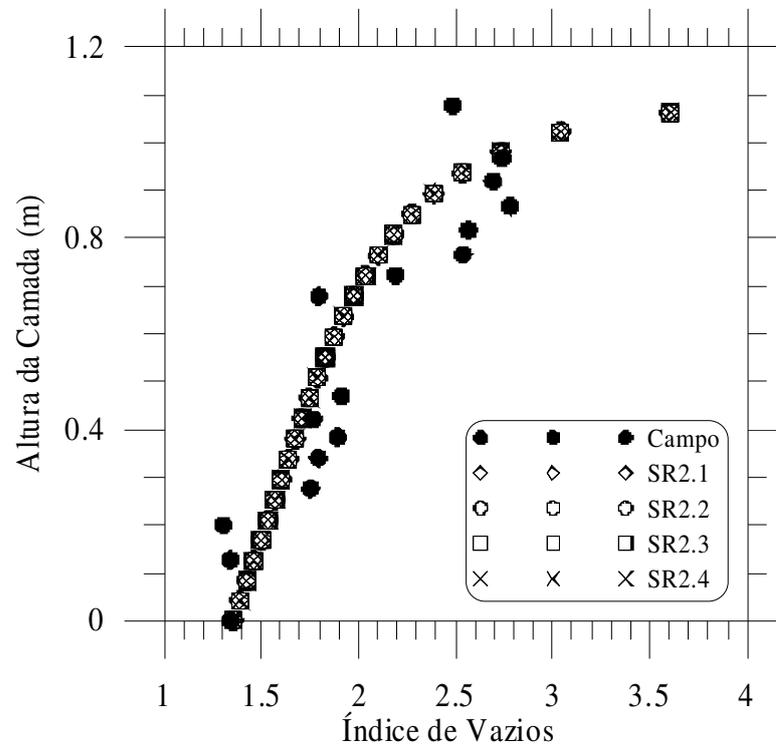


Figura 4.10 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 - fase inicial (dia 142).

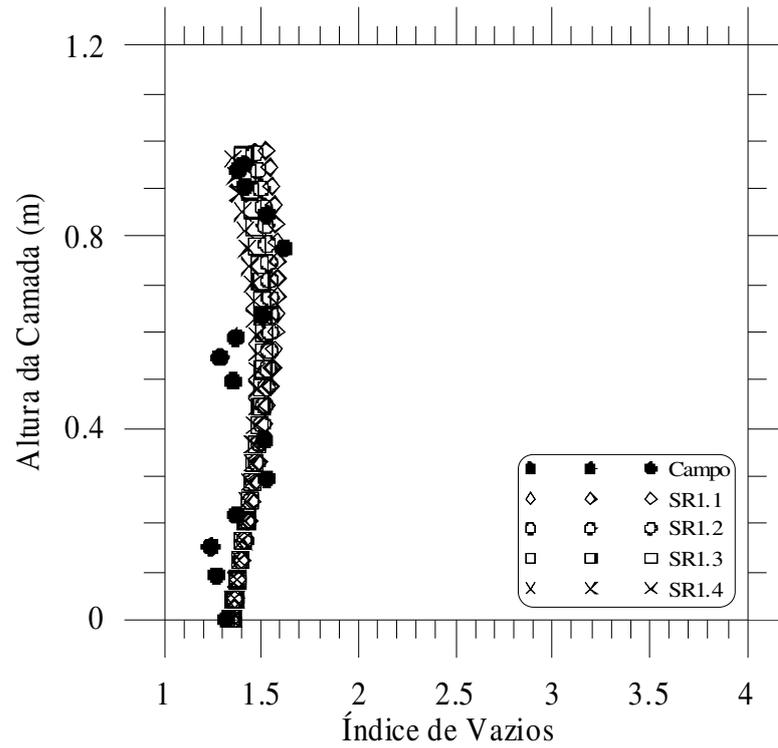


Figura 4.11 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 – fase intermediária (dia 180).

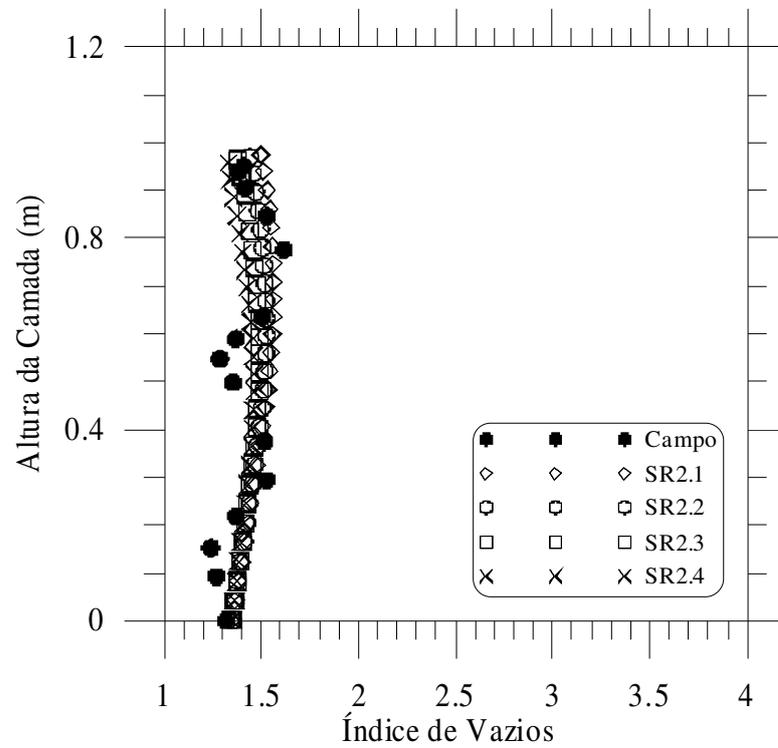


Figura 4.12 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 – fase intermediária (dia 180).

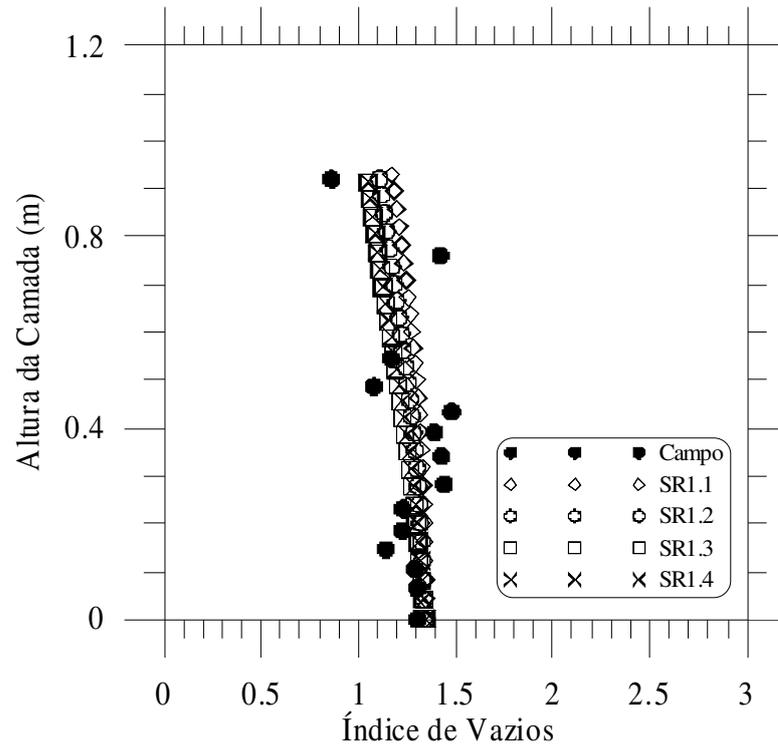


Figura 4.13 – Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR1.1 a SR1.4 – fase final (dia 210).

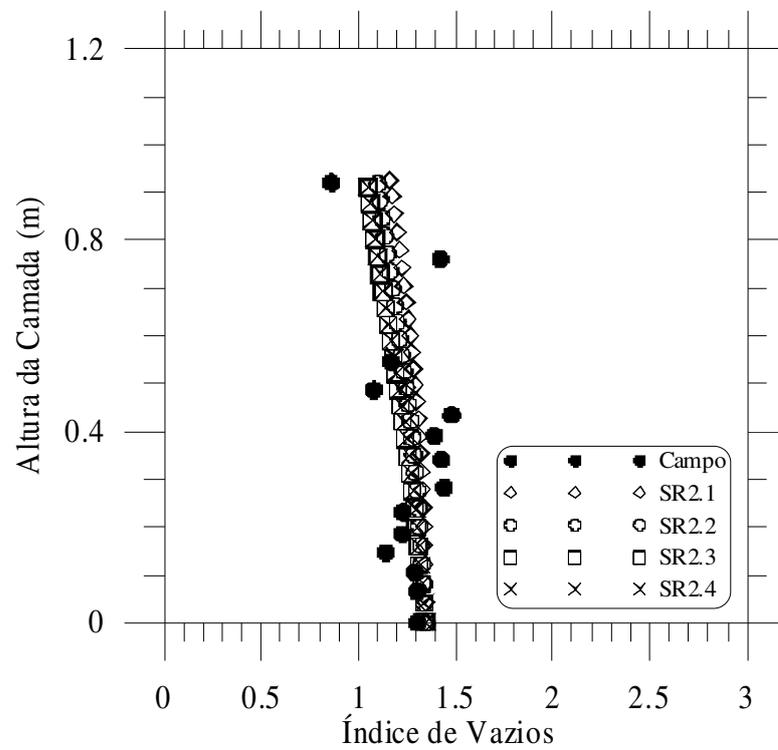


Figura 4.14 - Perfis de índices de vazios de campo e das simulações SR2.1 a SR2.4 – fase final (dia 210).

Analisando-se as Figuras 4.5 e 4.6, pode-se observar uma excelente correspondência entre as alturas de camada obtidas nas simulações numéricas e as verificadas em campo durante o processo de ressecamento. A diferença máxima entre estes valores não ultrapassou a 3%, estando dentro de uma margem de erro satisfatória. As simulações com  $\eta$  igual a 2,0 - SR1.2 e SR2.2, nos trechos correspondentes ao final do ressecamento, foram as que mais se aproximaram da condição de campo.

Quanto ao comportamento das trincas, pode-se observar, através das Figuras 4.7 e 4.8, um bom ajuste entre os dados do início e propagação obtidos em campo e nas simulações. Os valores obtidos nas simulações se aproximaram mais dos observados para a TC01, que apresentou comportamento de uma trinca primária. A trinca TC02, aparentemente, cessou de progredir a partir de certa profundidade, indicando se tratar de uma trinca secundária, cujo desenvolvimento é retardado ou interrompido pela proximidade de uma trinca primária. O CONDES não consegue modelar os dois tipos de trinca separadamente (Oliveira Filho, 1998). Das simulações realizadas, aquelas com maiores valores de  $\eta$  resultaram num melhor ajuste, especialmente no que diz respeito à trinca TC01.

Os perfis de índices de vazios correspondentes à fase inicial de ressecamento são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10. Os valores de campo e os previstos nas simulações se ajustaram bem ao longo do perfil como um todo. A aparente discrepância próxima à superfície pode ser explicada por limitações da amostragem. Segundo Silva (2003), os resultados das amostragens representam o valor médio das propriedades da camada interceptada pelo amostrador. Esta média, no entanto, está longe de poder caracterizar os valores mais superficiais da camada adensada, onde a variação de índice de vazios é muito grande. A comparação dos perfis intermediários, Figuras 4.11 e 4.12, permitiu perceber a influência do parâmetro  $\eta$  nas análises de ressecamento. As simulações com  $\eta$  iguais a 2.0 e 2.5 foram as que mais se ajustaram aos dados de campo. Isto foi mais evidenciado no terço superior do perfil. Houve uma certa discrepância entre os valores previstos pela análise numérica e a situação de campo no terço inferior, exceto na base, onde a comparação também foi satisfatória. Esta discrepância pode ser devida, entre tantos outros fatores, ao processo de disposição da lama, que origina camadas não lineares, com diferentes propriedades físicas. Os perfis de índice de vazios no final do

ressecamento são comparados nas Figuras 4.13 e 4.14. Em geral, as simulações conseguiram reproduzir, razoavelmente, os valores de campo, que apresentam uma tendência de uniformidade no índice de vazios, com valores menores no topo da camada, e quase nenhuma variação nos valores da base na comparação com perfis intermediários. Esta distribuição é típica de um processo de ressecamento com dois mecanismos de compressão, um devido à evaporação superficial, que controla a parte superior do depósito, e o outro devido à ação capilar na base (Oliveira Filho, 1998).

#### **4.4 - Considerações finais**

As simulações de adensamento e ressecamento apresentadas nos itens 4.2 e 4.3 possibilitaram a calibração do modelo numérico de ressecamento implementado no programa CONDES, mostrando a sua eficiência nas análises numéricas dos processos de adensamento e ressecamento a que foi submetida a camada de lama disposta na área teste (Silva, 2003). A comparação entre as curvas de recalque e os perfis de índices de vazios e de trincas obtidos no monitoramento de campo e nas simulações mostrou a boa concordância entre os dados reais e numéricos encontrados. Além disso, pela calibração, foi possível avaliar melhor várias condições de contorno que influenciaram os processos de adensamento e ressecamento e descobrir uma faixa de valores representativa para o parâmetro  $\eta$ . De acordo com as simulações realizadas, valores de  $\eta$  variando entre 2,0 e 2,5 reproduziram bem as condições verificadas em campo.

A pequena discrepância encontrada entre os perfis de índices de vazios de campo e os obtidos a partir das análises numéricas pode ser explicada pelas distintas condições de contorno sob as quais o monitoramento de campo e as simulações numéricas se desenvolveram. Sabe-se que um monitoramento de campo, por melhor que seja executado, não pode ser considerado tão preciso, dado aos inúmeros fatores que influenciam as propriedades de um solo, principalmente as condições de contorno, dos quais nem sempre se pode ter um conhecimento total. Já sob uma simulação numérica, um maior controle pode ser imposto, dado ao conhecimento/definição de todos os fatores que governam a análise. Além disso, o próprio modelo utilizado em uma simulação numérica tem suas limitações, que não podem ser desprezadas. Mesmo

assim, as discrepâncias encontradas em nada afetaram a confiabilidade das simulações que calibraram o modelo numérico de ressecamento usando o programa CONDES.

Assim, pode-se concluir que o modelo numérico de ressecamento da lama foi calibrado e que o programa CONDES e os demais parâmetros e funções do material podem ser empregados na definição de novos esquemas de disposição que conduzam a processos de ressecamento mais eficazes.

### **ANÁLISES NUMÉRICAS DO PROCESSO DE RESSECAMENTO DO REJEITO FINO DA MINERAÇÃO**

Este capítulo apresenta algumas análises numéricas via CONDES do processo de ressecamento do rejeito fino (lama) proveniente do beneficiamento do minério de ferro na Unidade de Germano da Samarco Mineração S.A. Destaca-se que, no desenvolvimento destas análises, foram utilizados os parâmetros obtidos da calibração do modelo de ressecamento apresentado no capítulo anterior.

Todas as análises aqui apresentadas foram definidas a partir das informações do projeto e da operação do sistema de secagem de lamas, cujo desenvolvimento tem se dado desde agosto de 2003. Assim, elas tiveram por objetivo avaliar os benefícios do processo de secagem, principalmente no tocante à diminuição do índice de vazios da lama, o que confere a um reservatório de disposição maior capacidade de armazenamento e um fator de segurança mais elevado. Além disso, estas análises indicaram a necessidade de revisão de alguns conceitos do projeto/tópicos da operação, a fim de que seja conferida uma maior eficiência ao processo de secagem.

#### **5.1 – Características gerais do projeto e operação do sistema de ressecamento de lama**

As principais características do sistema de ressecamento de lama são descritas a seguir, destacando-se o objetivo deste projeto e algumas informações obtidas ao longo de sua operação.

O projeto de ressecamento de lama (Pimenta de Ávila Consultoria, 2001) tem por objetivo a redução do índice de vazios e, portanto, o aumento do teor de sólidos, deste

solo fino mole de alta compressibilidade. De acordo com a sua definição, a lama que, inicialmente, chega ao reservatório da Barragem do Germano com um teor de sólidos em torno de 20%, deve passar por uma bacia de sedimentação e adensamento por peso próprio para, posteriormente, ser disposta em estruturas menores, denominadas baias de ressecamento, com um teor de sólidos não inferior a 40%. Nestas estruturas, a camada de lama deve ficar exposta à evaporação superficial até atingir, nas regiões próximas ao seu topo, teor de sólidos final em torno de 80%.

A Figura 5.1 apresenta a configuração das baias de ressecamento.



Figura 5.1 – Baias de ressecamento de lama/Samarco Mineração S.A.

Destaca-se que as baias exibidas na Figura 5.1 têm seus diques constituídos pelo outro rejeito originado no processo de beneficiamento – rejeito arenoso, sendo alteadas pelo método de montante. Além disso, apresentam áreas variando de 250000m<sup>2</sup> a 350000m<sup>2</sup> e um vertedouro para a drenagem de toda a água sobrenadante à camada, seja ela proveniente dos processos de sedimentação e adensamento ou de precipitações pluviométricas.

Para a disposição da lama nas baias, tem sido empregada uma draga elétrica. Este equipamento direciona a lama para as baias de ressecamento através de uma tubulação

de 14”, sendo o lançamento realizado em ponto único, em uma única estrutura num mesmo intervalo de tempo.

O lançamento de lama em uma baía prossegue até a obtenção de uma camada de espessura em torno de 1m, medida após a drenagem de toda a água sobrenadante. Atingida esta espessura de camada, a lama é conduzida a uma outra baía de ressecamento, ficando a anterior submetida ao processo de secagem até o enchimento das outras estruturas.

De acordo com as informações registradas em diversos relatórios sobre a operação do sistema de ressecamento de lama (Departamento de Geotecnia/Samarco Mineração S.A, 2003 e 2004), a draga apresenta uma capacidade média diária de disposição de lama em torno de 16.000TMS. Supondo-se que a lama apresente peso específico de  $18\text{kN/m}^3$ , correspondente a um teor de sólidos em torno de 45%, com o qual é bombeada, tem-se um volume médio de material disposto em uma baía de ressecamento igual a  $19750\text{m}^3/\text{dia}$ . Quanto ao período de lançamento, pode-se verificar que a lama é disposta nas baias num intervalo de tempo variando de 20 a 30 dias, com poucas interrupções.

## **5.2 – Análises numéricas do processo de ressecamento de lama**

### **5.2.1 – Considerações iniciais**

As análises numéricas do processo de ressecamento de lama foram divididas em duas etapas. A primeira etapa, definida como ciclo 1, avaliou o comportamento da primeira camada de lama depositada em uma baía, enquanto a segunda – ciclo 2, analisou o comportamento de uma camada sobreposta a ela. No ciclo 2, procurou-se avaliar também a influência do peso próprio da camada superior no comportamento da camada inicial. Entretanto, por motivos expostos à frente, esta análise não foi possível. Além disso, deve-se destacar que, devido ao fato do CONDES só analisar o processo de ressecamento de uma camada de solo fino mole única, estes dois ciclos foram avaliados de modo isolado.

Em cada ciclo, foram analisadas as fases de enchimento e de espera. A fase de enchimento foi definida como o período de tempo em que houve disposição de lama, a

uma razão/taxa constante, em uma baía de ressecamento, enquanto a de espera foi caracterizada como o período em que não houve lançamento (enchimento nulo), onde a camada de lama foi submetida aos processos de adensamento e ressecamento. Ressalte-se, no entanto, que uma parcela do adensamento, principalmente a devida ao peso próprio, ocorre mesmo durante a fase de enchimento.

Em função do tempo de enchimento e da fase de espera de uma baía, as análises numéricas para o processo de ressecamento (AR) foram classificadas como AR1 e AR2. A análise AR1 considerou o enchimento durante um período de 20 dias, e, devido ao fato de serem utilizadas quatro baias para a disposição da lama, uma fase de espera de 60 dias. Já a análise AR2 considerou um tempo de enchimento e uma fase de espera de, respectivamente, 30 e 90 dias.

A Tabela 5.1 apresenta os intervalos de tempo definidos para cada uma das fases dos ciclos 1 e 2 - análises AR1 e AR2.

Tabela 5.1 – Intervalos de tempo dos ciclos 1 e 2/ análises AR1 e AR2.

Tempo	AR1		AR2	
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 1	Ciclo 2
Início do enchimento (dia)	0	80	0	120
Final enchimento/início fase de espera (dia)	20	100	30	150
Final fase de espera (dia)	80	160	120	240

Como taxa de enchimento para ambas análises, foi adotado o valor de 6cm/dia. Deve-se destacar que esta taxa foi obtida a partir da razão entre o volume de lama depositado diariamente pela draga em uma baía de ressecamento ( $19750\text{m}^3$ ) e a área média das quatro estruturas utilizadas para a secagem de lama ( $300000\text{m}^2$ ).

### 5.2.2 – Condições de contorno das análises AR1 e AR2

As análises numéricas AR1 e AR2 foram realizadas em duas etapas. A primeira etapa refere-se à fase de enchimento, onde o adensamento foi simulado considerando os tempos inicial e final da análise coincidentes com o início e a interrupção do lançamento

de lama. A segunda etapa refere-se à fase de espera onde o ressecamento é analisado considerando o tempo e o perfil de índice de vazios iniciais correspondentes aos da conclusão da análise de adensamento da fase de enchimento. O tempo final para a análise de ressecamento de cada ciclo, entretanto, foi adotado como um valor maior que o correspondente ao final da fase de espera, a fim de que o instante de tempo em que o índice de vazios da camada atingisse o valor limite ( $e_{\text{mín}}$ ) também fosse determinado. A imposição de ressecamento em um instante em que o adensamento ainda estava ocorrendo (início da fase de espera), não afetou nenhuma das análises realizadas, pois, como visto no item 2.9.3, o CONDES só simula este processo a partir do instante em que o fluxo de água em direção ao topo da camada se iguala à taxa de evaporação.

As condições de contorno para as fases de enchimento e de espera dos ciclos 1 e 2 se encontram apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Condições de contorno das fases de enchimento e de espera/ciclos 1 e 2.

Condições de Contorno	Adensamento		Ressecamento	
	Base	Topo	Base	Topo
Ciclo 1	Poropressão nula	Sobrecarga nula	Poropressão nula	Evaporação 0,002m/dia
Ciclo 2	Impermeável	Sobrecarga nula	Impermeável	Evaporação 0,002m/dia

Os parâmetros de compressibilidade e de permeabilidade adotados para as análises AR1 e AR2 foram os obtidos para o CP01. Estes valores, juntamente com os demais dados necessários à realização de uma análise via CONDES - índice de vazios mínimo ( $e_{\text{mín}}$ ), parâmetros da “cracking function”, densidade real dos grãos da lama, peso específico da água e intervalo de tempo máximo para as análises, se encontram apresentados na Tabela 4.1. Para  $\eta$ , foi adotado um valor igual a 2.

### 5.2.3 – Resultados das análises

Os resultados das análises AR1 e AR2 se encontram representados, graficamente, nas Figuras 5.2 a 5.5.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam, respectivamente, as curvas de enchimento e de recalque da camada de lama para os ciclos 1 e 2 das duas análises. Ressalte-se que os trechos das curvas representados por linha contínua correspondem aos recalques experimentados pela camada de lama durante as fases de enchimento e de espera, enquanto os trechos representados por linha tracejada correspondem aos recalques que seriam observados caso fosse permitido à camada de lama atingir o índice de vazios correspondente ao limite da contração –  $e_{\text{mín}}$ .

Os perfis de índice de vazios finais das fases de enchimento e de espera para os dois ciclos das análises se encontram apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5. A fim de se obter uma avaliação geral do índice de vazios ao longo da profundidade da primeira e da segunda camada de lama, os dados foram plotados em uma única curva, embora as análises tenham sido realizadas isoladamente, por motivos explicados anteriormente.

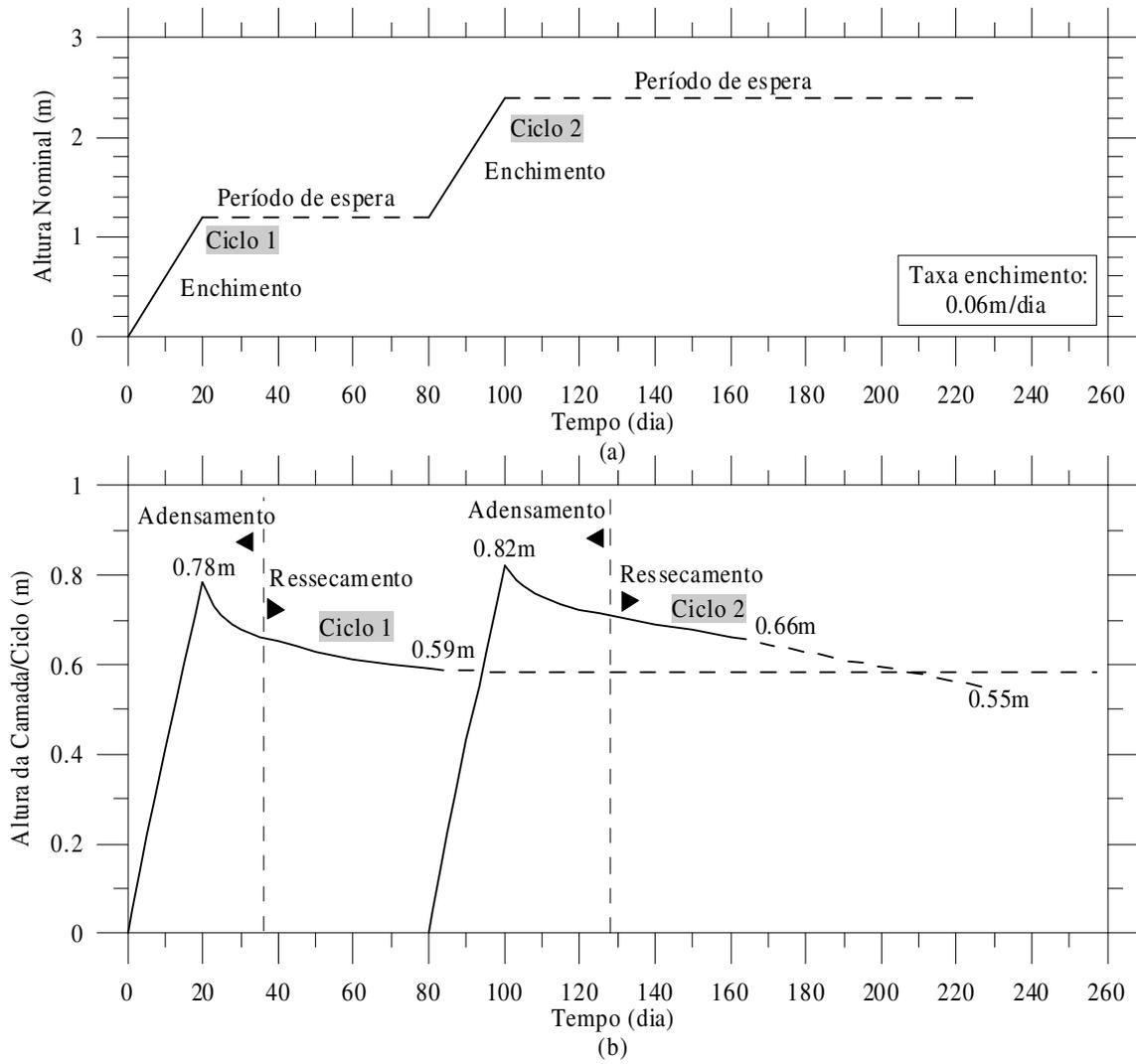


Figura 5.2 – Curvas de enchimento (a) e de recalque (b) da análise AR1.

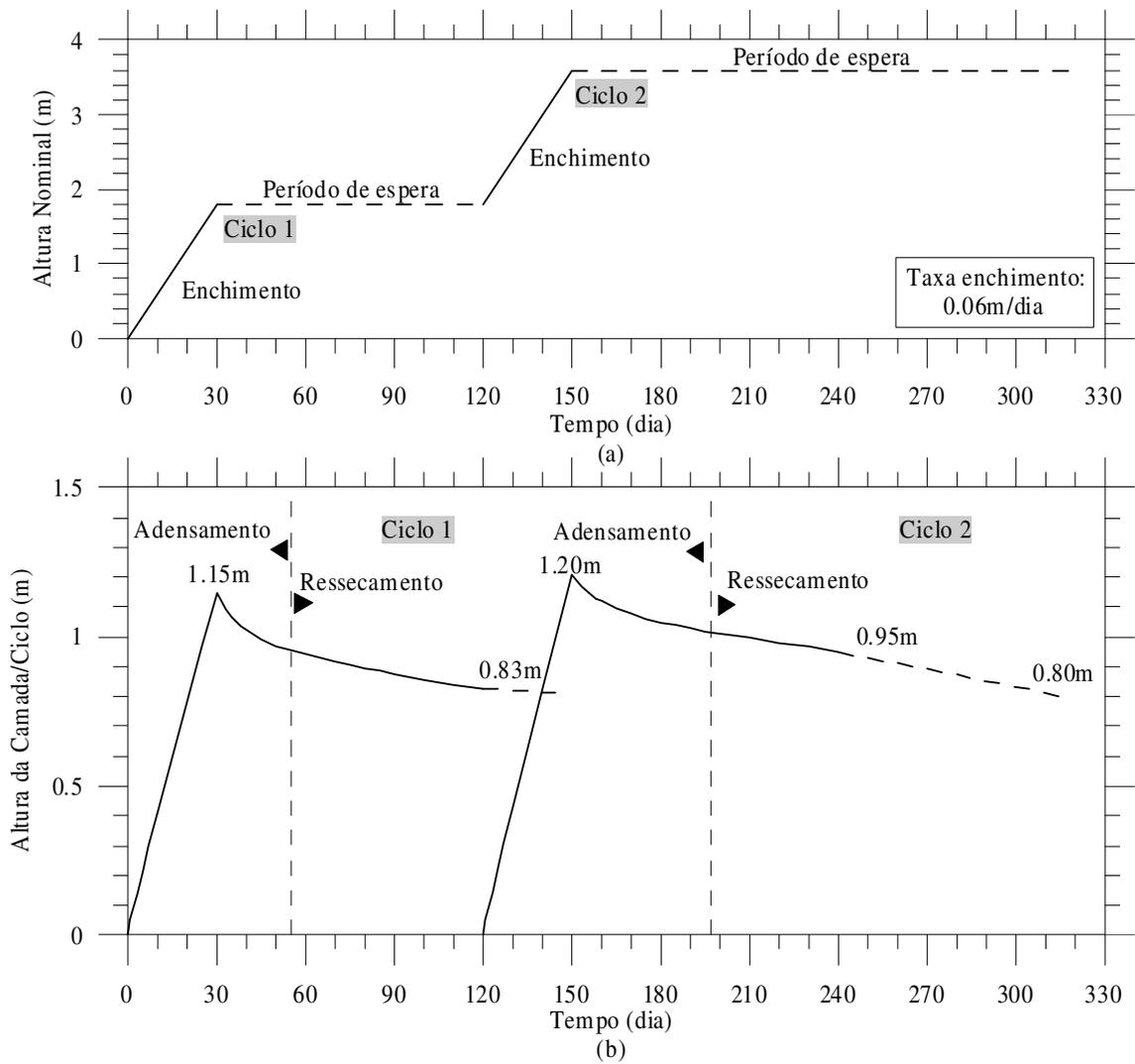


Figura 5.3 – Curvas de enchimento (a) e de recalque (b) da análise AR2.

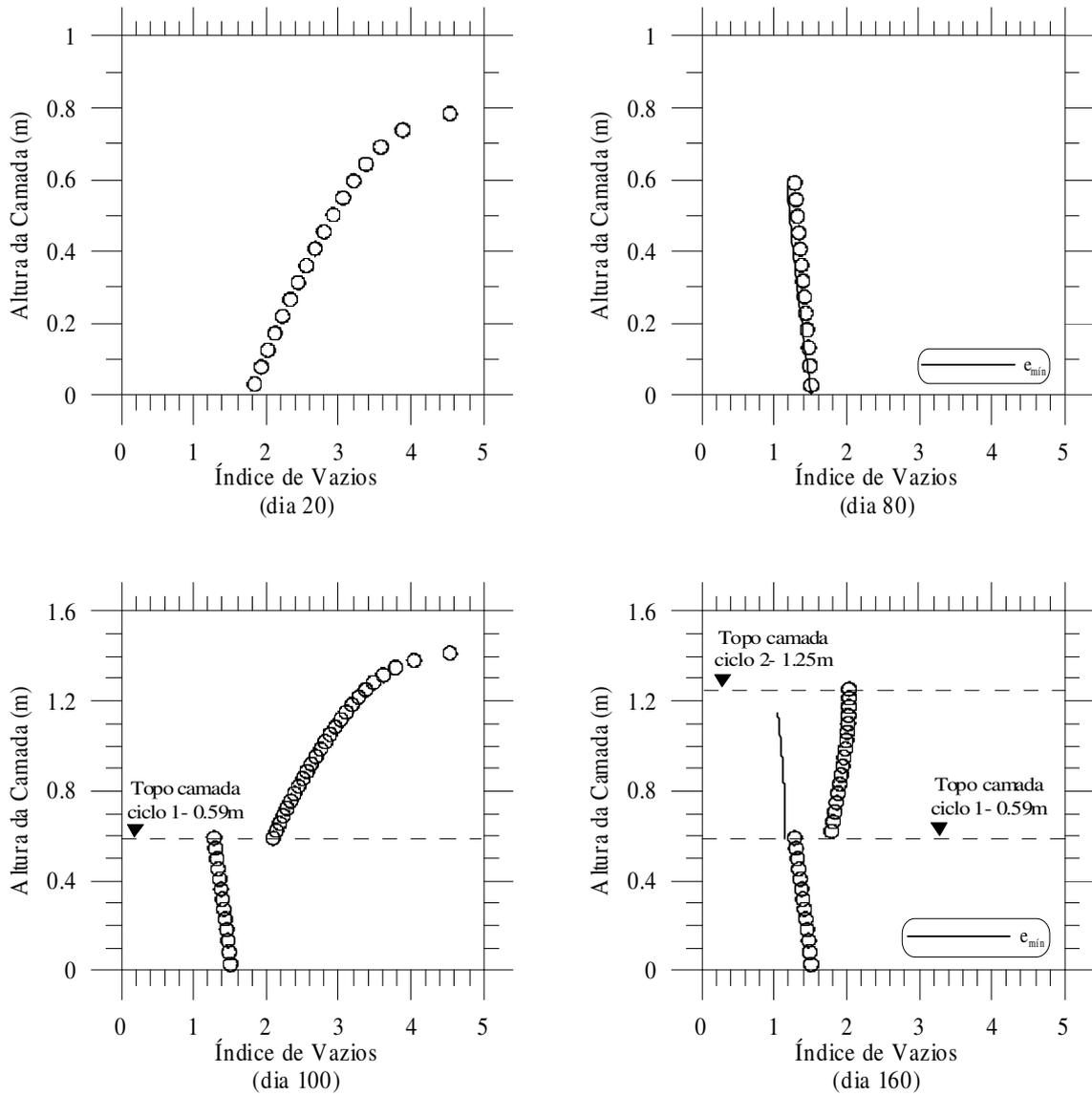


Figura 5.4 – Perfil de índice de vazios da análise AR1.

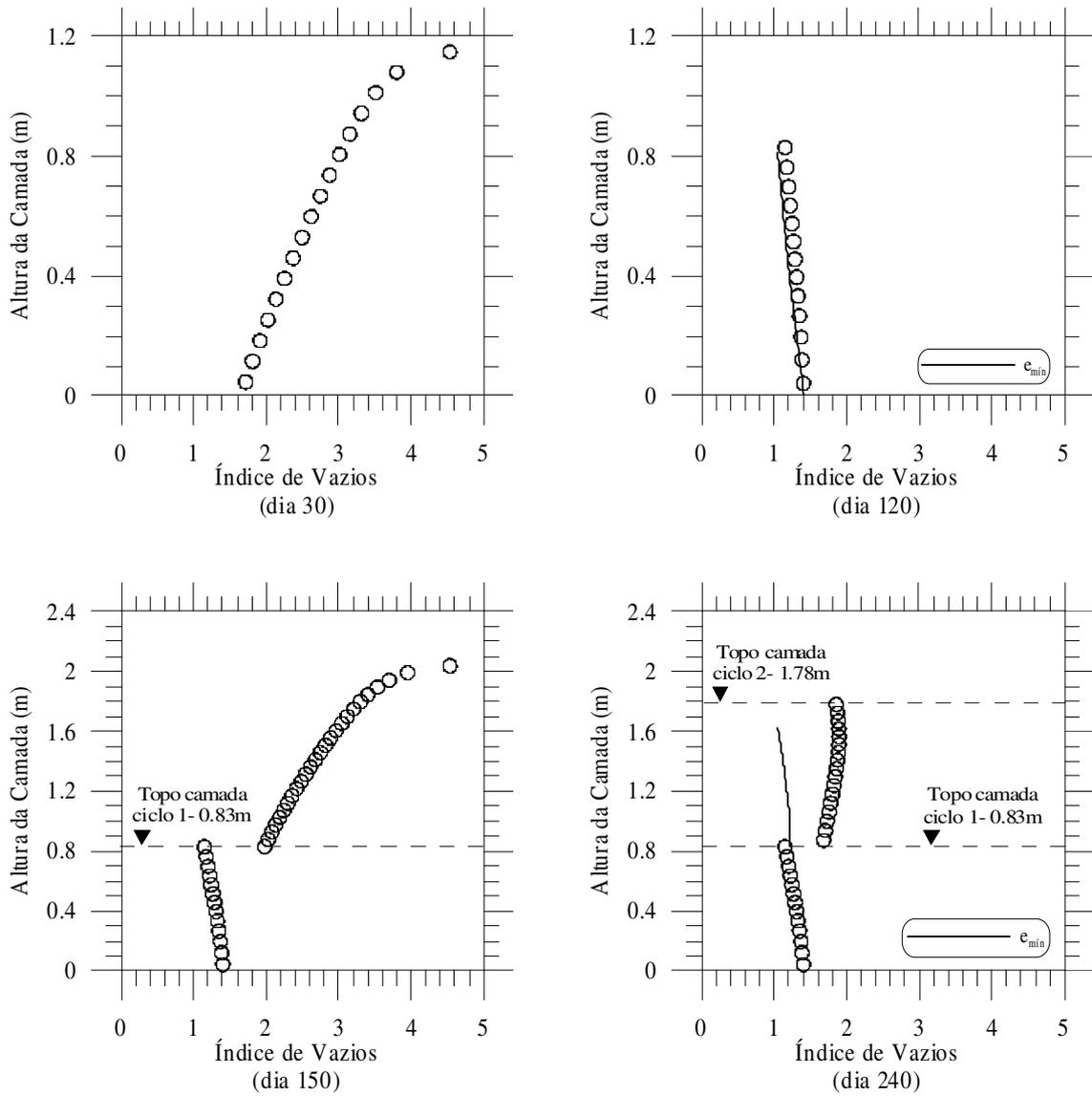


Figura 5.5 - Perfil de índice de vazios da análise AR2.

### 5.3 – Conclusões das análises numéricas do ressecamento de lama

Analisando-se as curvas de enchimento e de recalque (Figuras 5.2 e 5.3), pode-se observar o significativo adensamento que ocorreu mesmo durante a fase de disposição da lama. O recalque total correspondente ao final da fase de espera do ciclo 1 - dia 80 para a análise AR1 e dia 120 para a AR2, não variou em relação ao obtido para a condição limite ( $e=e_{\min}$ ). Entretanto, esta condição não foi verificada para o ciclo 2. Assim, pode-se constatar a importância da dupla drenagem no processo de ressecamento da lama.

Analisando-se os dados de índices de vazios (Figuras 5.4 e 5.5), constatou-se que, para o ciclo 1, os perfis correspondentes ao final da fase de espera e da condição limite foram praticamente coincidentes. Esta verificação confirmou que impor para o ciclo 2 a condição de contorno base impermeável foi justificável, pois a primeira camada depositada na baía de ressecamento, ao atingir o índice de vazios mínimo na região próxima ao topo, tornou-se praticamente não drenante. Já os perfis de índices de vazios do ciclo 2 apresentaram grande dispersão quando comparados com os da condição limite. Como foi na condição limite que teores de sólidos da ordem de 78% foram encontrados, pode-se concluir que, para o ressecamento de lama atender às condições de projeto – teores de sólidos superiores a 80%, o período de espera atual a partir da segunda camada deverá ser aumentado de, no mínimo, 75 dias.

Ressalte-se que, embora tenha se pensado em avaliar o recalque sofrido pela primeira camada devido ao peso da segunda a ela sobreposta, o fato da distribuição de índice de vazios na primeira camada no final do primeiro ciclo se aproximar bastante do índice de vazios mínimo impediu o avanço da análise via CONDES, uma vez que este programa se baseia na hipótese de solo saturado, sendo limitado, portanto, ao índice de vazios mínimo.

De um modo geral, pode-se concluir que, em função do tempo de espera para secagem e dos limites da própria operação, ou seja, baias de ressecamento disponíveis, a condição avaliada na AR1 parece ser a mais atrativa para o ressecamento da lama.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 – Considerações finais

O processo de ressecamento de um solo fino mole é muito complexo, devido às inúmeras condições de contorno que influenciam a sua ocorrência. Deve-se destacar que muitas delas ainda são desconhecidas ou até mesmo desconsideradas nas análises de ressecamento, como, por exemplo, a drenagem através das paredes laterais de um reservatório/barragem de rejeito. Entretanto, as condições de contorno para o topo e para a base de uma camada de solo fino mole submetida ao ressecamento são as que mais influenciam na magnitude deste processo.

Soluções analíticas para o fenômeno de ressecamento são de difícil solução, o que torna mais vantajoso o emprego de modelos numéricos para as análises do mesmo. A teoria desenvolvida por Abu-Hejleh (1993) tem fundamentos bastante sólidos e ganhou respeito no meio geotécnico, motivando o seu uso nessa pesquisa para o desenvolvimento do modelo numérico do processo de ressecamento do rejeito fino de minério de ferro.

### 6.2 – Conclusões

Apresentam-se, a seguir, as conclusões obtidas neste trabalho sobre o modelo numérico de ressecamento do rejeito fino proveniente do beneficiamento de minério de ferro realizado na Unidade de Germano/Samarco Mineração S.A:

- A calibração do modelo numérico de ressecamento foi realizada utilizando-se o programa CONDES e os dados obtidos a partir de um estudo de ressecamento em

campo, desenvolvido em uma pesquisa anterior, e de ensaios de laboratório, realizados neste trabalho.

- O programa CONDES mostrou-se uma ferramenta adequada para o estudo, tendo sido respeitadas suas hipóteses e levado em conta suas limitações na modelagem do fenômeno do ressecamento.

- Os dados de campo utilizados na calibração do modelo de ressecamento foram: a altura de sólidos obtida a partir das amostragens realizadas na área teste, a altura final após o adensamento do rejeito na área teste, o perfil de índice de vazios no final do adensamento e a função do material denominada neste trabalho de “cracking function”, obtida por Silva (2003) a partir da observação do início e propagação das trincas de ressecamento.

- Para a calibração deste modelo, dois relevantes ensaios de laboratório foram realizados – adensamento induzido por percolação (HCT) e contração livre. Eles foram essenciais para a definição dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade e do índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) da lama.

- O ensaio HCT foi realizado em três corpos de prova de uma amostra de lama, com diferentes teores de sólidos iniciais, sendo definido, nas análises da fase de calibração, que os parâmetros de compressibilidade e permeabilidade do corpo de prova CP01 eram os mais representativos do rejeito fino.

- O ensaio de contração livre foi realizado com a mesma amostra do ensaio HCT. Os resultados do ensaio indicaram que o rejeito fino permaneceu saturado até um teor de umidade de 27%, correspondente ao limite de contração. Como na situação real (campo) não foram verificados teores de umidade inferiores a 27%, com exceção da região do topo da camada de lama em contato com a atmosfera, já nos últimos dias do monitoramento do processo de ressecamento, pode-se dizer que o uso do programa CONDES – que tem como hipótese a saturação – foi adequado e nenhuma de suas hipóteses foi violada nas análises.

- Durante a fase da calibração do modelo, foi também observado que valores de  $\eta$  variando entre 2.0 e 2.5 possibilitaram uma boa aproximação entre os dados de campo e os obtidos via simulação. Assim, pode-se concluir que valores de  $\eta$  variando

nesta faixa de valores são bem representativos para as análises de ressecamento da lama na fase tridimensional de abertura de trincas.

- O modelo numérico para o processo de ressecamento do rejeito fino/lama obtido na fase de calibração foi validado, com precisão satisfatória, quando os resultados por ele obtidos foram comparados com os dados de recalque e perfis de índice de vazios/propagação das trincas verificados na área teste monitorada por Silva (2003).

- O modelo numérico obtido para o rejeito fino, depois de calibrado e validado, foi aplicado em algumas análises de ressecamento de esquemas de disposição que estão sendo utilizados pela mineradora. Estas análises demonstraram, principalmente, a influência da condição de dupla drenagem na eficiência do processo de ressecamento. Para a primeira camada de lama depositada em uma baía, a imposição da condição de drenagem pela base e pelo topo, produziu um maior recalque, tendo-se atingido um perfil de índice de vazios praticamente idêntico ao encontrado para a condição limite ( $e=e_{\text{mín}}$ ).

### **6.3 – Sugestões para trabalhos futuros**

Recomenda-se como trabalhos futuros:

- Utilizar o modelo de ressecamento calibrado neste trabalho na definição/avaliação de métodos de disposição de lama que conduzam a processos de ressecamento mais eficientes.

- Realizar análises de ressecamento na fase de desaturação da lama, empregando-se programas que permitam o estudo de fluxo não saturado, utilizando-se dados da curva característica desse material.

- Repetir o estudo de ressecamento da lama utilizando outras teorias, principalmente aquelas que usam a mecânica das fraturas e comparar os resultados com o obtido neste trabalho.

- Procurar aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho a outros tipos de rejeito, de modo a se criar conhecimento sobre o comportamento destes materiais durante o ressecamento.

- Fazer estudo do balanço de massas e de água durante o processo de ressecamento de modo a conhecer de que modo se dá a remoção da água intersticial em magnitude e tempo utilizando o programa CONDES.
- Novas implementações ao programa CONDES, de modo a facilitar o seu uso no estudo de múltiplas camadas submetidas aos processos de adensamento e ressecamento.
- A extensão do programa CONDES para análise do ressecamento da lama na condição não saturada.
- Avaliar a influência do ressecamento na capacidade de suporte do rejeito fino.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

ABNT (1984) Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. NBR 6509, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 8 p., São Paulo – SP.

ABNT (1984) Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 13 p., São Paulo – SP.

ABNT (1984) Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 6 p., São Paulo – SP.

ABNT (1984) Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 3 p., São Paulo – SP.

ABNT (1995) Solos e Rochas – Terminologia. NBR 6502, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 5 p., São Paulo – SP.

Abu-Hejleh, A. N. (1993). Desiccation theory for soft soils. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 206 p., Boulder, Colorado.

Abu-Hejleh, A. N. e Znidarcic, D. (1992). User manual for program SICTA. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 101 p., Boulder, Colorado.

Abu-Hejleh, A. N. e Znidarcic, D. (1995). Desiccation theory for soft cohesive soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.121, nº 6, p. 493-502.

Botelho, A. P. D. (2001). Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a

utilização da bomba de fluxo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 242 p., Ouro Preto.

Carrier III, W. D., Bromwell, L. G. e Somogyi, F. (1983). Design capacity of slurried mineral waste pounds. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 109, nº 5, p. 699-716.

Corte, A. e Higashi, A. (1964). Experimental research on desiccation cracks in soil. Research Report nº 66, U. S. Army Material Command, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

Costa, L. H. D., Ávila, J. P. e Soares, R. (1999). Deposição de rejeitos finos pelo método de secagem. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos – SP, p. 181-186.

Departamento de Geotecnia/Samarco Mineração S.A. (2003). Controle mensal da operação da draga – sistema de ressecamento de lama.

Departamento de Geotecnia/Samarco Mineração S.A. (2004). Controle mensal da operação da draga – sistema de ressecamento de lama.

Fox, W. E. (1964). A study of bulk density and water in a Swelling Soil. *Soil Science*, 98, p. 307-316.

Gibson, R. E., England, G. L. e Hussey, M. J. L. (1967). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers. *Géotechnique*, v. 17, nº 3, p. 261-273.

Gibson, R. E., Schiffman, R. L. e Cargill, K. W. (1981). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 18, p. 280-293.

Konrad, J.M. e Ayad, R. (1997a). An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 34, p. 477-488.

Konrad, J.M. e Ayad, R. (1997b). Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 34, p. 929-942.

Lau, J. T. K. (1987). Desiccation cracking of soils. M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canadá.

Linsley, R. K., Kohler, M. A. e Paulhus, J. L.H. (1978). *Hidrology for engineers*, second edition, McGraw Hill, New York.

Liu, J. C. (1990). Determination of soft soils characteristics. Ph D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Liu, J. C. e Znidarcic, D. (1991). Modelling one dimensional compression characteristics of soils. *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 117, p. 162-169.

Mc Roberts, E. C. e Nixon, J. F. (1976). A theory of sedimentation. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 13, p. 294-310.

Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons Inc., New York.

Oliveira Filho, W. L. (1998). Verification of desiccation theory for soft soils. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 230 p., Boulder, Colorado.

Pane, V. (1985). Sedimentation and consolidation clays. PhD. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 302 p., Boulder, Colorado.

Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. (2001). Relatório da revisão do plano diretor de disposição de rejeitos do Germano. Relatório técnico, 10 p.

Silva, D. R. (2003). Estudos do processo de ressecamento de um rejeito fino de minério de ferro em uma área teste. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 141 p., Ouro Preto.

Somogyi, F. (1979). Analysis and prediction of phosphatic and consolidation: implementation package. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project, Technical Report.

Villar, L. F. S. (2002). Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 511 p., Rio de Janeiro.

Wilson, G. W. (1993). Modelling of soil evaporation from waste disposal site. In joint CSCE – ASCE National Conference on Environmental Engineering, Montreal, Can., p. 281-288.

Yao, T. C. e Znidarcic, D. (1997). User's manual for computer program CONDES0. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 98 p., Boulder, Colorado.

Yao, T. C., Oliveira Filho, W. L., Cai, X. C. e Znidarcic, D. (2002). Numerical solution for consolidation and desiccation of soft soils. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 26, p. 139-161.

Znidarcic, D., Gjerapic, G, Carrier, D. e Zhang, P. (2000). Crusting of phosphatic ponds due to dessication laboratory and fiel study - Report on task 17: Laboratory and centrifuge tests on phosphatic clay samples. University of Colorado, 63p., Boulder, Colorado.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)