

## **Ensaio de Ressecamento em Laboratório e Alguns Aspectos Observados do Fissuramento dos Resíduos**

### **8.1**

#### **Introdução**

Neste capítulo, os procedimentos de ensaios realizados para acompanhamento do ressecamento dos resíduos são apresentados. Foram realizados ensaios de simulação de secagem em caixas de dimensões e formas variadas, sob condições controladas, com o objetivo de reunir subsídios para a previsão do comportamento deste material quando disposto para ressecamento solar, tais como taxas e quantidade de movimento de fluido pelo solo, evolução da sucção, deformação do solo e variações de temperatura da camada.

Foram utilizados dois tipos de lama de processamento de bauxita, a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada, da região de Ouro Preto, MG nos ensaios considerados principais, em caixas maiores. Estas caixas eram instrumentadas com tensiômetros e termopares e também se monitorava a perda de umidade com o tempo, por meio de balanças e coleta de amostras. Procurou-se, assim, verificar como estes resíduos se comportam na transição do estado de saturação para o não saturado, no esforço de prever e modelar a disposição por secagem e, além disto, quis saber quais parâmetros influenciariam nos padrões de trincamento deste solo. Se estes modos de fissuramento puderem ser controlados, há a possibilidade de serem incorporados aos projetos de drenagem, já que aumentariam a permeabilidade da camada. Também foram usadas caixas menores, de formas e volumes variados, para as quais só se monitorou a variação de umidade com o tempo, com os outros

materiais. Como o volume de informação coletado foi muito grande, nesta primeira análise só serão apresentados a descrição da metodologia utilizada e alguns dos aspectos observados.

## 8.2

### Metodologia de Execução dos Ensaios

Para fazer a observação sobre o modo de trincamento de solos moles, foram montadas diversas caixas de vidro, de dimensões variadas, isoladas lateralmente e na base por uma camada de 5 cm de isopor. Elas eram enchidas com solo na forma de lama, colocadas sobre balanças para acompanhamento da perda de umidade, e submetidas a ressecamento por meio de lâmpadas halógenas, conforme descrito em Swarbrick (1992) e Swarbrick (1994). Elas eram deixadas acesas por períodos de tempo variáveis, procurando-se com isso simular a variação de radiação que ocorre no campo. Este tipo de recipiente é chamado de lisímetro e já foi utilizado para a determinação de taxas de evaporação de solos sem vegetação (Boast & Robertson, 1982) e em resíduos (Swarbrick, 1992; Fahey & Fujiyasu, 1994), dentre outros.

Swarbrick (1992) apresenta um histórico da evolução destes ensaios e do uso de lisímetros para determinação de características de secagem. Dados adicionais sobre este tipo de equipamento e relatos de sua utilização em Geotecnia também podem ser obtidos em Linsley et al. (1978); Hillel (1983); Swarbrick (1994); Koupai et al. (1995); Yanful & Choo (1997); Todd et al. (2000), dentre outros. Villar et al. (1997) e Villar & De Campos (1999) apresentaram resultados parciais destes ensaios aqui descritos.

A maioria dos lisímetros usados em laboratório são cilindros de perspex, de 10 a 30cm de diâmetro (por ex., Mustafa et al., 1983). Trabalhos como os de Freebairn et al. (1987) vêm mostrando que lisímetros com área transversal mínima de 0,25cm<sup>2</sup> e profundidade mínima de 35 cm são efetivos para medição de evaporação de solos.

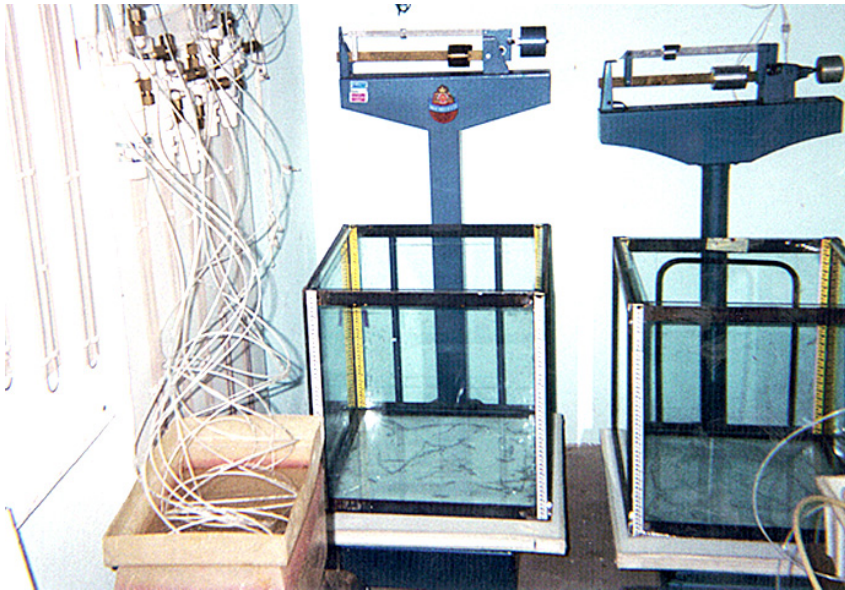
As dimensões dos recipientes nos ensaios aqui executados foram das mais variadas, procurando-se com isto investigar a influência da forma e volume no padrão de formação de fissuras. Outros fatores investigados foram o teor de sólidos inicial e o tipo de fluido presente nos poros. Maior atenção foi dada aos lisímetros com 50 x 50 x 50 cm. Foram construídos dois destes, um destinado à retirada de amostras periódicas por meio de um amostrador tipo pistão estacionário de pequeno diâmetro, e o outro para o acompanhamento sem amostragem, de modo não haver interferência na sua superfície ao longo do processo. As caixas foram instrumentadas com tensiômetros e termopares. Os tensiômetros foram confeccionados com tubos tipo “saran”, de aproximadamente 0.3cm de diâmetro e ponta porosa de alta entrada de ar com 0.5 cm de diâmetro, que eram conectados a tubos de acrílico que funcionavam como reservatório de água e dispunham de válvulas para a circulação de água para remoção de bolhas de ar e conexão a uma coluna de mercúrio. Os termopares tinham 0.5cm de diâmetro, encapsulados em aço inox, com faixa de leitura de 0 a 199°C, com precisão de 0.1°C.

As amostra utilizadas foram das lamas vermelhas neutralizadas e não da região de Ouro Preto, MG, por que se dispunha de maior volume destes resíduos para a execução dos ensaios. As lamas chegaram ao laboratório em tambores de 200 litros. Eram então removidas para um outro, onde eram misturadas com o auxílio de um mixador elétrico portátil e daí, lançados nas caixas dos testes, onde eram novamente homogeneizados após o lançamento de cada nova camada. Foram realizados dois ensaios simultâneos com a lama não neutralizada, uma caixa somente para medições de temperatura e sucção, e a outra, para retirada de amostras, conforme explicado acima. Em seguida, foram feitos dois outros ensaios, agora com a lama neutralizada.

No caso da lama vermelha OP não neutralizada, uma vez nas caixas e já homogeneizada, ela foi deixada adensar por peso próprio por um período de aproximadamente uma semana, para então se instalar os tensiômetros e termopares. Na caixa 01, onde não haveria amostragem, foram distribuídos 5 tensiômetros a 5cm de profundidade, 2 a 10cm, um a 15cm e outros dois a 20 cm. Os tensiômetros, finos e flexíveis, uma vez instalados, poderiam se movimentar junto com a lama. Os termopares foram instalados próximos a cada tensiômetro,

de modo que também pudessem acompanhar o recalque da lama. Na caixa 02, de amostragem, foram instalados 3 tensiômetros e 3 termopares, no centro da caixa, a 5cm, a 10 e a 20cm de profundidade. No ensaio com a lama vermelha OP neutralizada, os tensiômetros e termopares foram instalados imediatamente após o término da homogeneização. Assim, o processo de adensamento por peso próprio já foi acompanhado pela leitura dos tensiômetros, na verdade funcionando nesta primeira fase, como piezômetros. O ensaio de ressecamento só iniciou também por volta de uma semana depois da disposição, quando as leituras piezométricas já haviam estabilizado.

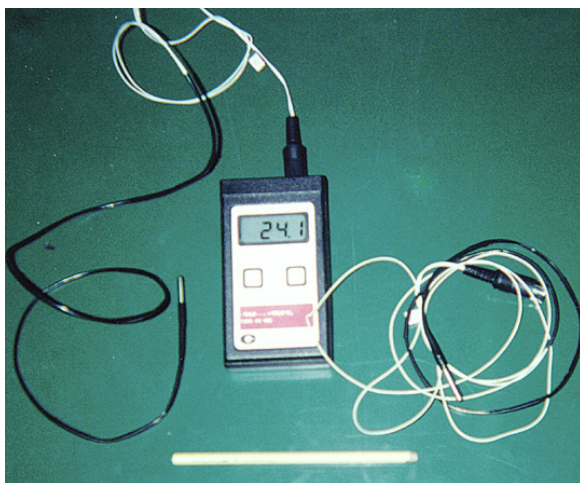
As balanças utilizadas foram mecânicas, com capacidade para 300 kg e precisão de 100g, o que permite medir variação de 1mm de altura de fluido das caixas. Para as caixas menores, foram utilizadas balanças com precisão de 0.1g e não foi instalado nestas nenhuma instrumentação, sendo somente feito o acompanhamento de perda de umidade. A Figura 8.1 dá uma idéia do sistema montado, podendo ser visto na parede, as colunas de mercúrio para leitura dos mini tensiômetros, como já havia sido destacado no Capítulo 05, na Figura 5.29. Na Figura 8.2, os dois lisímetros já estão cheio de lama, prontos para receber a instrumentação. O termopar utilizado está representado na Figura 8.3 e foi devidamente calibrado antes do uso. Na Figura 8.4(a), eles e os tensiômetros já estão instalados, o ensaio estando pronto para ser iniciado. A Figura 8.4(b) mostra um detalhe da superfície da lama após a colocação dos termopares (fios escuros) e os tensiômetros (fios claros). O amostrador utilizado está representado na Figura 8.5, onde também se vê as pontas porosas dos tensiômetros, de entrada de ar de 100 kPa. A Figura 8.6 o esquema usado para amostragem, com um sistema de apoio para que o amostrador fosse descido o mais gentilmente possível. Na Figura 8.7 pode ser visto o momento de expulsão da amostra, quando então ela era medida para obtenção do peso específico total, em procedimento semelhante ao do feito nos ensaios de campo.



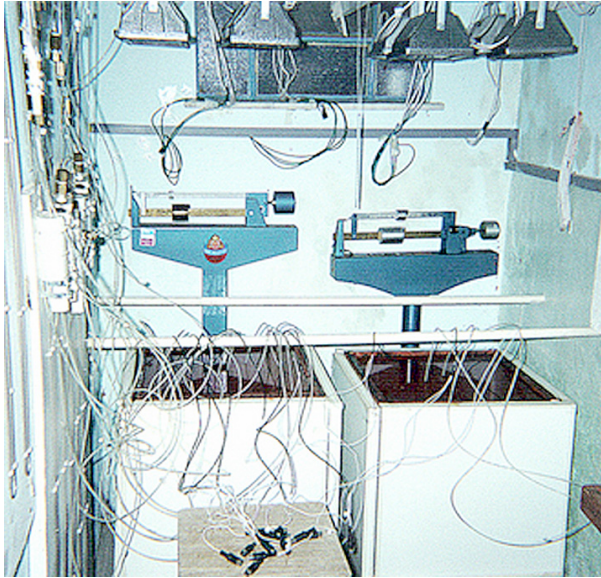
**FIGURA 8.1:** Vista dos Lisímetros Montados Para Secagem Controlada de Lama



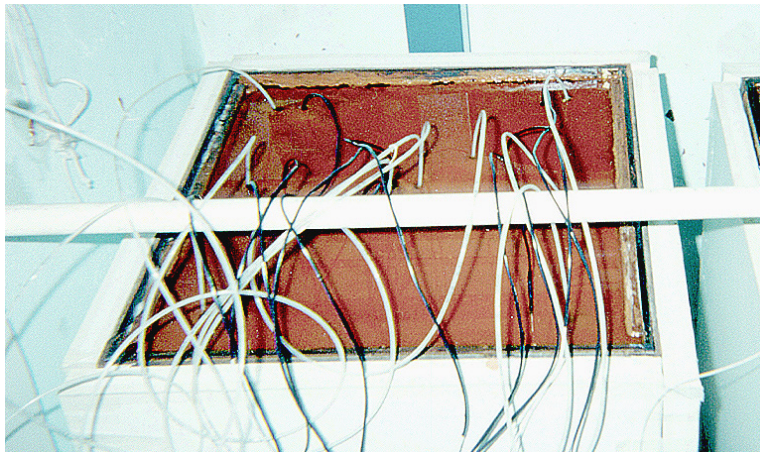
**FIGURA 8.2:** Lisímetros Com Lama Para Ensaio de Secagem Controlada.



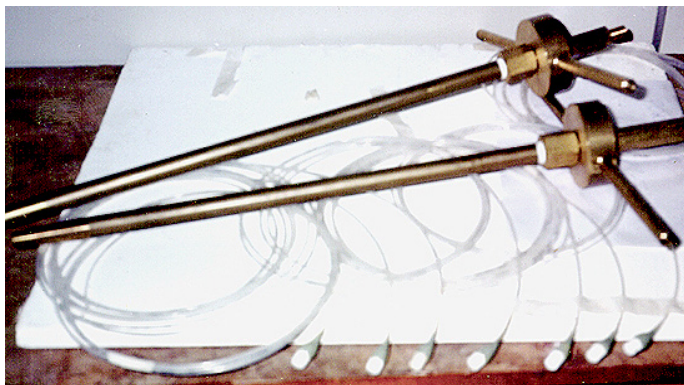
**FIGURA 8.3:** Termopares e Sistema de Leitura Usados no Ensaio de Secagem.



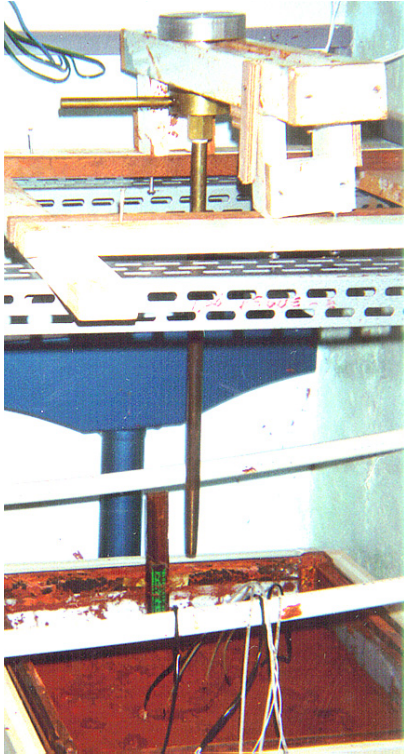
**FIGURA 8.4(a):** Lisímetros Instrumentados e Prontos Para Início de Ensaio.



**FIGURA 8.4(b):** Lisímetros Instrumentados e Prontos Para Início de Ensaio: Detalhe dos Tensiômetros e Termopares.



**FIGURA 8.5:** Amostradores e Tensiômetros Usados nos Ensaios de Secagem.



**FIGURA 8.6:** Sistema Apoio Para Auxílio na Amostragem



**FIGURA 8.7:** Amostra Sendo Extraída

### 8.3

#### Observações Gerais Sobre o Comportamento da Lama Vermelha OP Não Neutralizada nos Ensaioes Maiores

Os ensaios 01 e 02 na lama vermelha OP não neutralizada foram montados com teor de sólidos inicial de 46%. Foi encontrada certa dificuldade de homogeneização com este valor, e a lama não estava se distribuindo por igual pelas caixas, principalmente nos cantos. Deixou-se adensar por um período de duas semanas, para então se instalar a instrumentação. Feito isso, esperou-se ainda mais uma semana para que a lama envolvesse bem os tensiômetros e termopares e aí sim, iniciar a simulação de secagem. As lâmpadas eram deixadas acesas uma média de 8 horas por dia, desligando-se no período da noite.

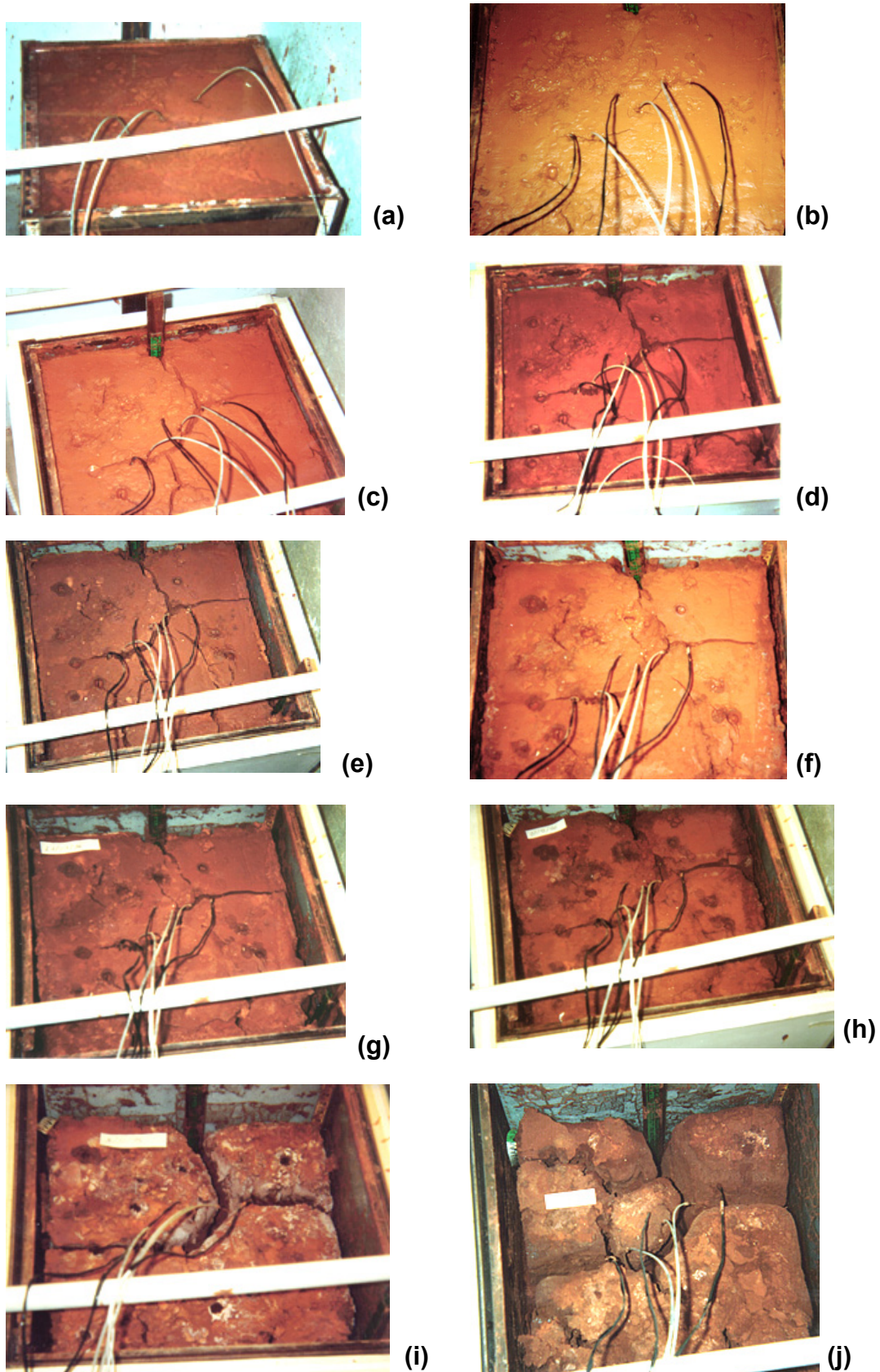
O teor de sólidos médio após o período de adensamento por peso próprio era de 50%, tendo sido formada uma lâmina de licor de aproximadamente 0.5 cm. Após cinco dias sob efeito das lâmpadas, essa lâmina de licor não mais existia,

havendo a formação aparente de uma fina crosta superficial, de coloração mais escura que a de lançamento. Havia, também, sinais de eclosão de bolhas de ar, que devem ter ficado aprisionadas no interior da camada durante a homogeneização. Esse aprisionamento de bolhas de ar já havia sido notado em ensaios de sedimentação e muitas das amostras coletadas com o amostrador tipo pistão estacionário vieram com vazios causados por elas. Uma trinca já começava a se formar, passando pelos locais de instalação da instrumentação, tanto na caixa 01 como na 02, a destinada à amostragem. Provavelmente os tensiômetros e termopares criaram um ponto de tensão local dentro da lama. Isto já havia sido relatado por Colombera (1983) em uma lama vermelha, cujo teor de sólidos inicial era de 43%.

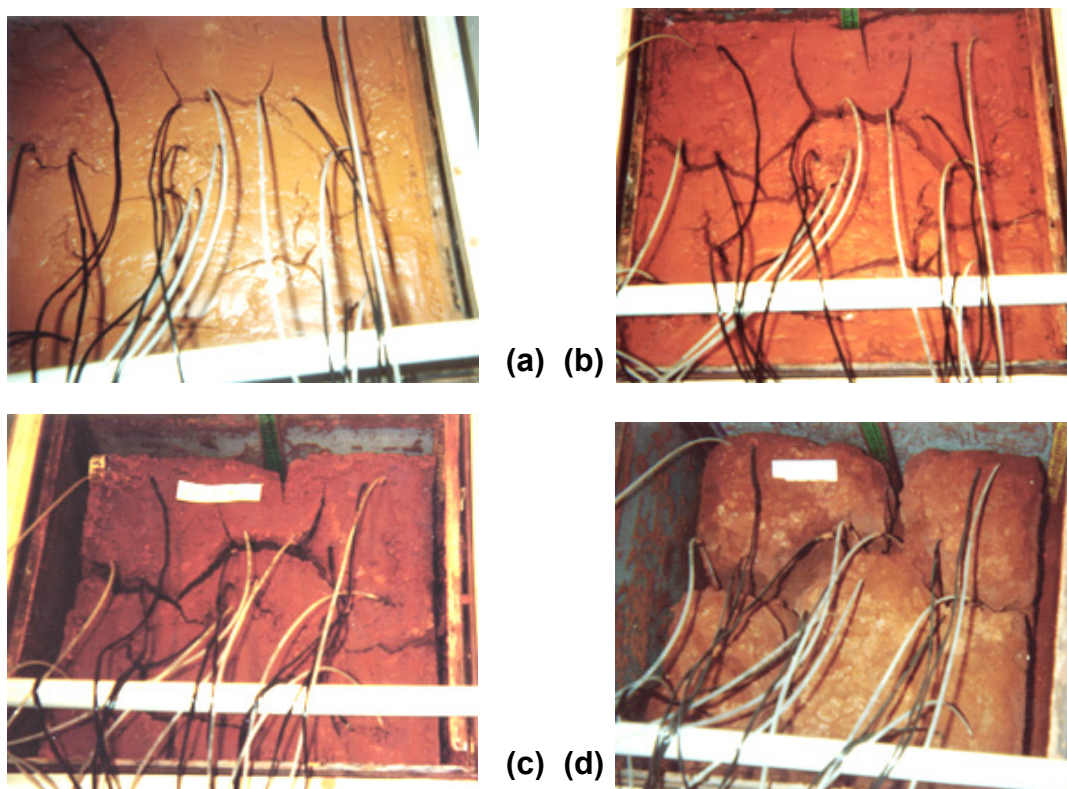
A Figura 8.8, de (a) a (j), mostra a seqüência de secagem da caixa 02, usada para amostragem. Na (a), pode ser vista a caixa logo após a instalação dos tensiômetros, ainda com uma lâmina de licor. Na (b), inicia-se a formação da primeira trinca, bem pelos cabos da instrumentação. Na seqüência, de (c) a (e), pode ser notada a evolução do ressecamento, com o aumento da abertura das trincas. A Figura 8.8 (f) representa um mês de ensaio. Os furos na superfície são devido à amostragem. Na (i), quase dois meses após ter sido começado o processo de ressecamento, nota-se a formação dos cristais na superfície da lama. A (j) mostra a aparência do resíduo aproximadamente 80 dias após contínua exposição à secagem.

Uma seqüência da caixa 01 pode ser vista na Figura 8.9, de (a) a (d). A primeira trinca a se formar é a curva, no centro da caixa, na figura (a), passando pela instrumentação. A Figura 8.9 (c) corresponde ao estado da lama dois meses após o início do processo. A (d), a três meses. Nesta caixa, não foi feita amostragem. Assim, não há trincas devido a fraturamento mecânico provocado pela inserção do amostrador. A Figura 8.10 dá um detalhe da fissura passando pelos tubos dos tensiômetros (mais claros) e dos termopares (mais escuros). Já foi comentado no Capítulo 05 que isto fez com que a face de alguns tensiômetros ficasse exposta à atmosfera. Não houve prejuízo para as leituras porque quando isso ocorreu, eles já tinham se dessaturado.

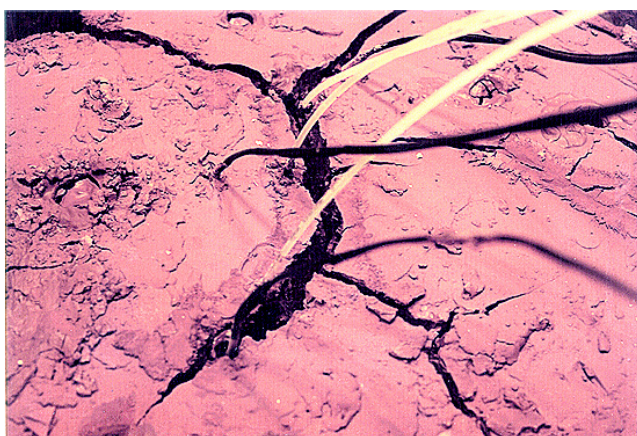




**FIGURA 8.8:** Ensaio de Secagem na Lama Vermelha OP Não Neutralizada (Caixa 02).



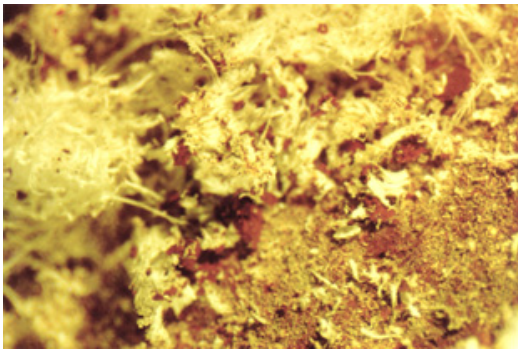
**FIGURA 8.9:** Estágios de Ressecamento da Lama vermelha OP Não Neutralizada (Caixa 01).



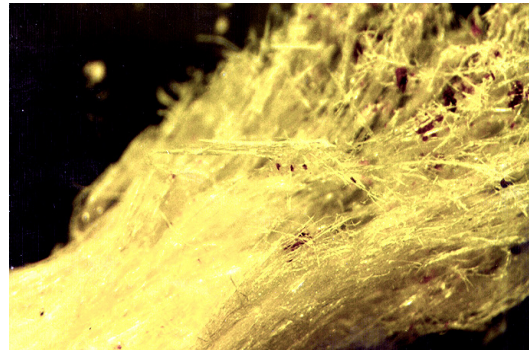
**FIGURA 8.10:** Detalhe da Fissura Passando Pela Instrumentação

Seis dias após iniciado o processo de ressecamento, as fissuras já tinham de 1 a 2cm de largura e 5cm de profundidade. No sétimo dia, elas já atingiam 10cm de profundidade e 3 a 4cm de largura. Quinze dias depois, a tonalidade nas bordas das trincas começou a mudar, se tornando mais escura. Começou, também formar cristalizações de soda cáustica, NaOH, que constitui a fase líquida do material.

Era como uma franja margeando as fissuras, com largura (da franja) de 1 cm e espessura de 0.5cm onde as trincas estavam mais abertas. Mais próximo às extremidades, essa franja ficava esbranquiçada e à medida que foi crescendo, ela ia caindo e preenchendo as fissuras. As Figuras 8.11 e 8.12 apresentam detalhes destas cristalizações, ampliadas 4 e 40 vezes, respectivamente. A poeira conseqüente da formação deste produto é um problema grave nos reservatórios ressecados e sem proteção. As Figuras 8.13 e 8.14 mostram a superfície de um lago desativado, com a formação das cristalizações, e a poeira levantada. Neste local, folhas de babaçu eram espalhadas sobre o lago, para amenizar o problema. De acordo com Fahey (2002), este pó seria resíduo de alumina formada durante o beneficiamento.



**FIGURA 8.11:** Detalhe dos Cristais Formados na Crosta Ressecada – Ampliado 4 vezes.



**FIGURA 8.12:** Detalhe dos Cristais Formados na Crosta Ressecada – Ampliado 40 vezes.



**FIGURA 8.13:** Cristais Formados na Crosta Ressecada de um Depósito Abandonado.



**FIGURA 8.14:** Poeira Provocada Pêlos Cristais Formados na Crosta Ressecada de Um Reservatório Abandonado.

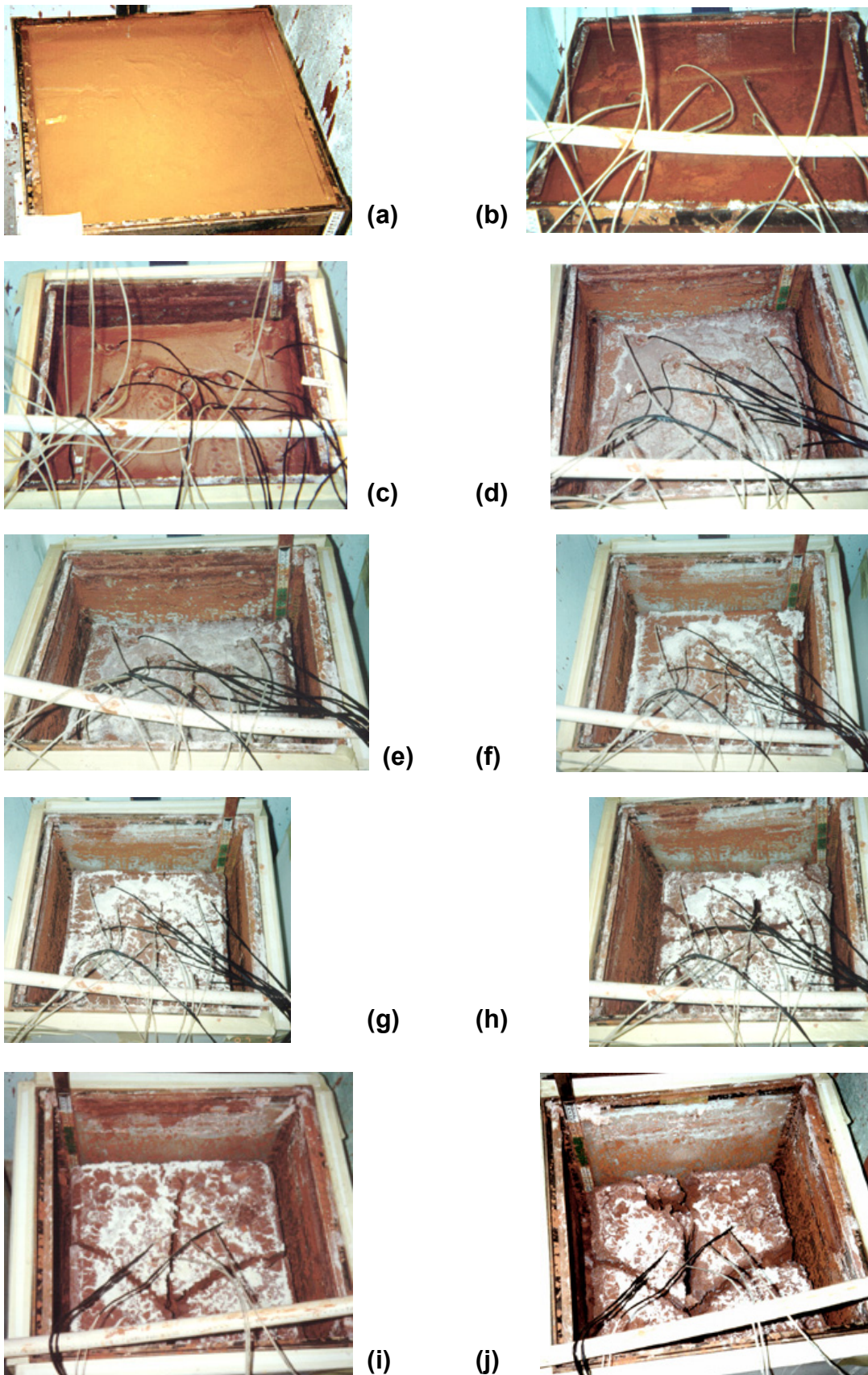
A crosta formada na superfície era finíssima e após três meses de ensaio, começou a se despregar, como uma esfoliação. Nesta crosta parecia haver microfissuras, que não se aprofundavam para a camada subjacente, dando um aspecto poligonal ao trincamento. Após quatro meses de ensaio, o solo apresentou uma contração vertical de 28% (13cm). A contração lateral da camada superior chegava a 4.5cm e a abertura das fissuras, 4 a 6cm, atingindo até o fundo do recipiente.

Sibley & Williams (1993) estudaram o comportamento de solos argilosos sob secagem, com restrições à contração. Segundo eles, a restrição à contração ocorreria na forma de tensões cisalhantes que se desenvolveriam quando a camada de argila secando se contrai em relação aos materiais em contato com ela, mesmo as camadas subjacentes. Eles observaram que a secagem de amostras com restrições à contração só envolveu contração vertical antes do desenvolvimento de fissuras. As amostras por eles utilizadas eram de pequeno volume. Porém, nas aqui analisadas, foi notado que a contração horizontal ocorreu antes da formação das trincas.

#### 8.4

##### **Observações Gerais Sobre o Comportamento da Lama Vermelha OP Neutralizada nos Ensaio Maiores**

O comportamento da lama vermelha OP neutralizada durante os ensaios de ressecamento nas caixa maior 02, está registrado na seqüência apresentada pela Figura 8.15. A figura (c) corresponde a 1 mês e meio de ensaio, a (d), dois meses. A (f), dois meses e meio, (h), três meses, e (j), três meses e meio. Deste período, quinze dias foi somente de secagem à sombra. Para estes ensaios, preferiu-se efetuar o lançamento nas caixas com um teor de sólidos menor, para facilitar a homogeneização. A lama foi despejada com um teor de sólidos de 34% e a instrumentação foi instalada logo em seguida, para acompanhar o adensamento por peso próprio do material. Este procedimento evitou a formação de trincas preferenciais, como havia ocorrido na lama vermelha OP não neutralizada.



**FIGURA 8.15:** Ensaio de Secagem na Lama Vermelha OP Neutralizada.

A lâmina de licor formada decorrente do processo de adensamento por peso próprio foi de 4.5cm, após uma semana, e três dias após o início do ensaio, ela já havia se evaporado. O fissuramento só ocorreu após 35% de contração vertical, sem passar pela instrumentação. Também foi observado o padrão de microfissuras na crosta superficial, sem aprofundamento para as camadas subjacentes, com esta crosta se despregando da superfície em pequenos pedaços, após três meses de ensaio. Aqui, também ocorreu a contração tridimensional antes que se desenvolvessem trincas.

Como o teor de sólidos de lançamento foi menor, a densidade de trincas também o foi. Por haver mais fluido, também foi maior a formação de cristais na superfície, como pode ser percebido pela figura. A contração total do resíduo também foi muito maior que a do caso anterior.

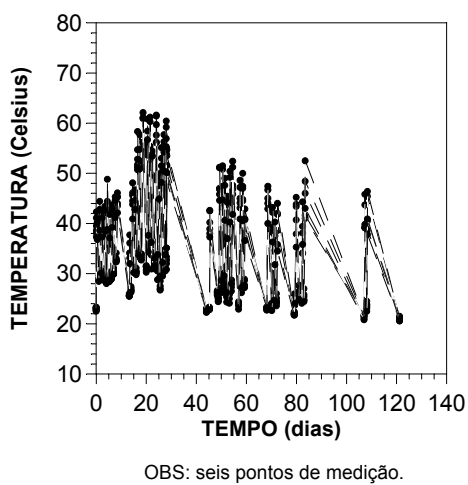
## 8.5

### **Resultados dos Ensaio Maiores na Lama Vermelha OP Neutralizada**

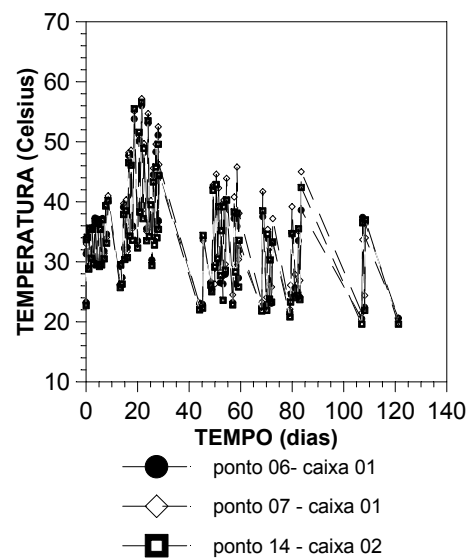
Durante os ensaios, foi feito um acompanhamento sistemático das condições do ambiente, ou seja, a temperatura em três locais distintos, o teor de umidade relativo do ambiente, além de mantê-lo totalmente isento de correntes de ar. Sempre eram executadas leituras de temperatura do solo e do ambiente e tensiometria ao início do ensaio, pela manhã, antes de ligar as lâmpadas. Ao longo do dia, algumas outras leituras eram executadas. Com relação aos gradientes térmicos, foi observado que antes de acender as lâmpadas, eram registradas temperaturas maiores nas camadas inferiores do solo, com gradientes em relação à superfície em torno de 1°C, mas chegando a marcar até 4.7°C. A temperatura média da sala sem as luzes variava de 20 a 30°C, passando para 45 a 55°C após oito horas de ensaio. Então, as temperaturas das camadas superficiais subiam muito, enquanto que as a 20cm de profundidade alteravam pouco, invertendo o sentido do fluxo de calor e impondo gradientes de até 15°C. Em termos de umidade relativa, essa variação de temperatura correspondia a uma mudança de

65% a 70% para 28 a 30%, o que levava a uma grande variação na taxa de evaporação.

Os dados com relação à variação de temperatura podem ser comprovados pelo exame das Figuras 8.16 a 8.19, que mostram as leituras dos termopares instalados na lama vermelha OP neutralizada. Aí, fica clara a variação térmica experimentada pelo solo, devido à alternância de exposição às lâmpadas halógenas.

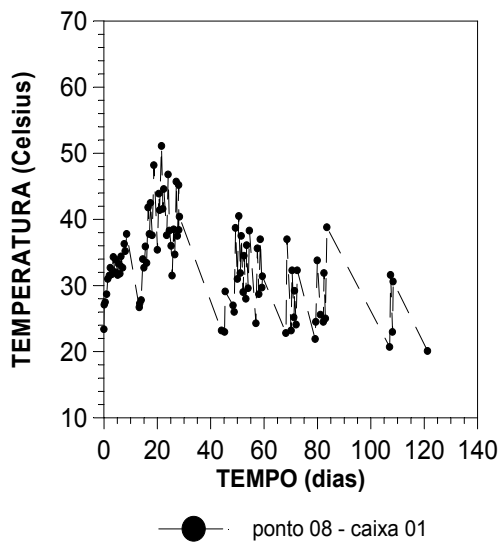


**FIGURA 8.16:** Temperatura da Camada Superficial da Lama Vermelha OP Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.

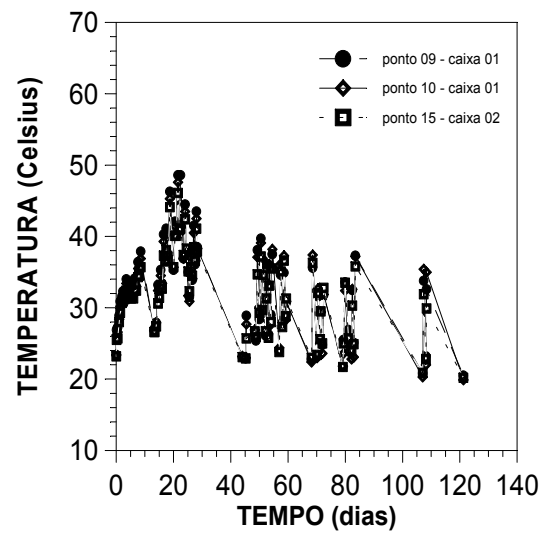


**FIGURA 8.17:** Temperatura a 10cm de Profundidade da Lama Vermelha OP Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.

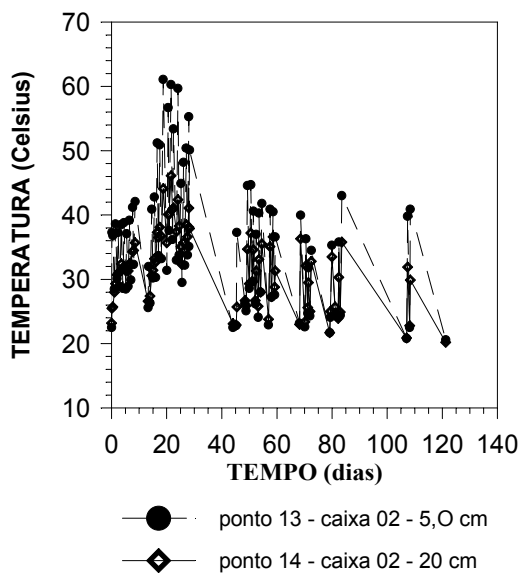
Uma comparação direta entre as leituras realizadas à 5 cm e 20 cm dentro da lama pode ser vista na Figura 8.20. Através dela, pode ser notado o gradiente térmico existente. Uma comparação entre a temperatura ambiente e do solo está nas Figuras 8.21 e 8.22. A primeira compara as leituras realizadas na camada mais superficial e a segunda, na mais profunda, à 20 cm de profundidade. Estão relacionados todas as leituras realizadas, nas diferentes caixas e pontos de medição. A Figura 8.23 mostra a variação típica de umidade relativa do ambiente onde foram executados os ensaios, com as lâmpadas ligadas e sem.



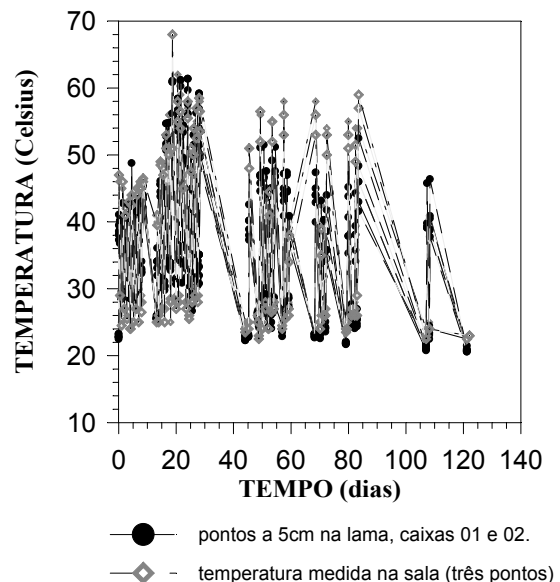
**FIGURA 8.18:** Temperatura da Camada à 15 cm de Profundidade da Lama Vermelha OP Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.



**FIGURA 8.19:** Temperatura a 20 cm de Profundidade da Lama Vermelha OP Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.

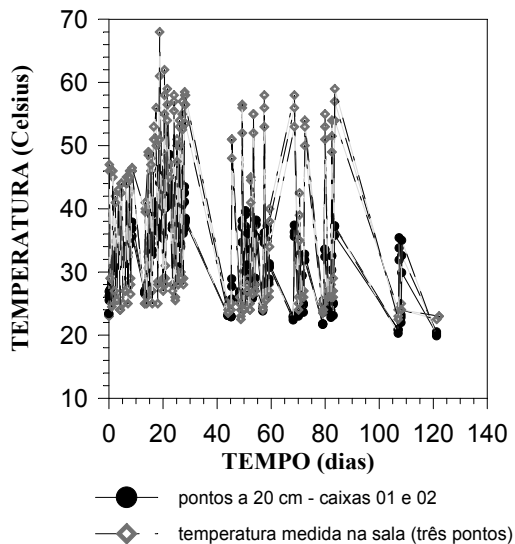


**FIGURA 8.20:** Comparação Entre As Temperaturas da Camada Superficial e a 20 cm de Profundidade da Lama Vermelha OP Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.

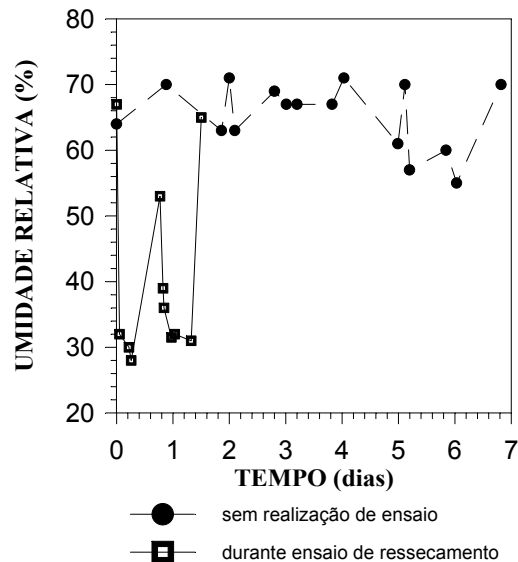


**FIGURA 8.21:** Comparação Entre Temperaturas Medidas A 5,0cm Dentro Da Lama Neutralizada Durante Ensaio De Ressecamento E Temperatura Medida Na Sala





**FIGURA 8.22:** Comparação Entre Temperaturas A 20,0cm Dentro Da Lama OP Neutralizada E Temperatura Na Sala Durante Ensaio De Ressecamento.

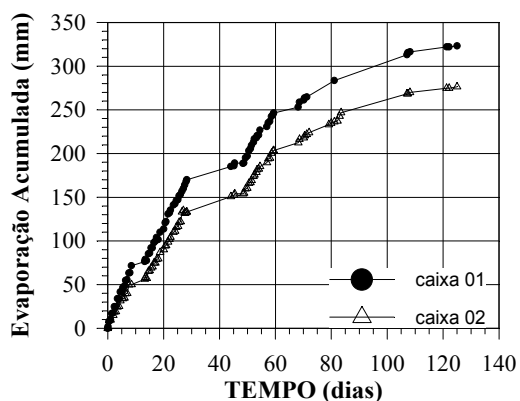


**FIGURA 8.23:** Variação do Teor de Umidade Relativa do Ar da Sala de Ensaio de Ressecamento: Influência das Lâmpadas na Temperatura do Ambiente.

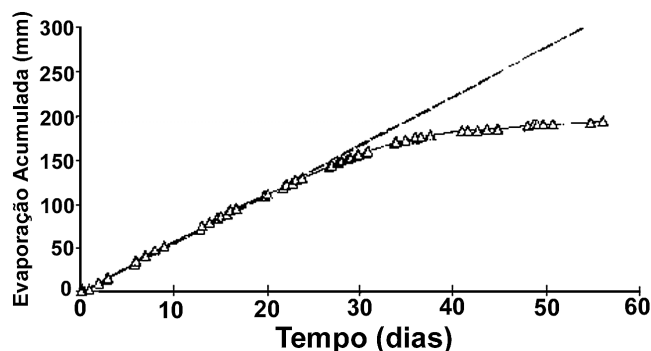
Durante todo o ensaio, foram realizadas medições de perda de líquido por evaporação, para o cálculo da taxa em que ela ocorria. A taxa de evaporação é um dos parâmetros importantes para uso dos modelos matemáticos. A curva obtida está representada na Figura 8.24. Na Figura 8.25, para se fazer uma comparação, está representado um resultado obtido na Austrália, em lama de lavagem de bauxita (Swarbrick, 1992), por meio de ensaios semelhantes aos realizados aqui. A diferença entre estes testes e os realizados no laboratório da PUC-Rio, está na precisão da medição da variação da massa total do lisímetro. No equipamento brasileiro, as caixas eram apoiadas diretamente em balanças com precisão de 100g, enquanto que no australiano, ele foi montado sobre células de carga. A taxa de evaporação calculada para o ensaio realizado na PUC-Rio, foi de aproximadamente 8,25mm/dia na sua fase inicial, caindo depois de quinze dias, para uma média de 5mm/dia até por volta de dois meses, caindo ainda mais a partir daí. A taxa potencial do ensaio australiano foi de 5,6mm/dia (Swarbrick & Fell, 1992).

Pode ser observado na Figura 8.25 que inicialmente a secagem se dá em uma taxa constante, que é a chamada taxa de evaporação potencial. Após algum

período de tempo, esta taxa diminui. Este é o comportamento idealizado de meios porosos isotrópicos sob evaporação. O ponto onde ocorre a mudança de taxa é um dado importante para alguns modelos, que tomam como base este padrão de comportamento do material ao longo do processo de secagem (Swarbrick e Fell, 1992). Ele é nítido na curva da Figura 8.25, e está começando a se estabelecer na Figura 8.24. Pela análise da Figura 8.26, que mostra a variação de peso diária das caixas, pode se chegar à conclusão que o ensaio realmente está tendendo para sua estabilização, pelo fato da variação de peso estar diminuindo. Porém o ensaio foi interrompido logo em seguida, sem que isto fosse claramente confirmado.



**FIGURA 8.24:** Evaporação Acumulada Medida no Ensaio com a Lama Vermelha OP Neutralizada.

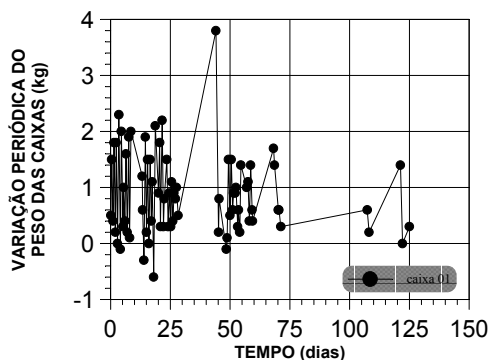


**FIGURA 8.25:** Evaporação Acumulada contra o Tempo de Lama de Lavagem de Bauxita (*adaptado de Swarbrick e Fell, 1992*)

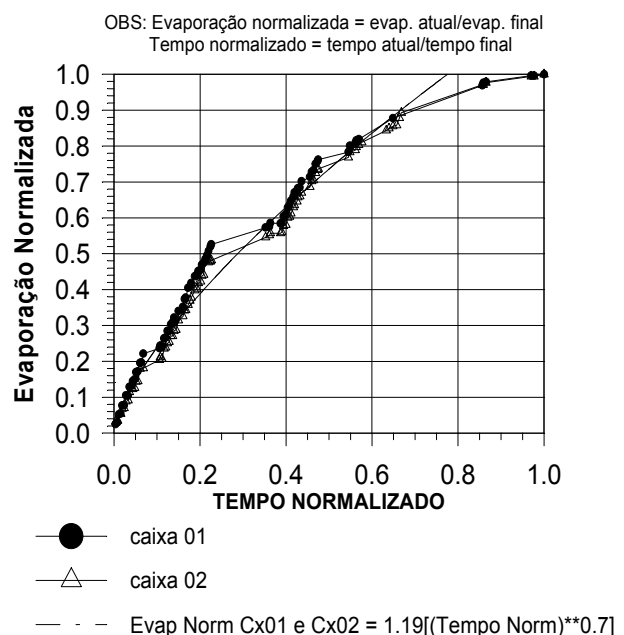
Apesar das duas curvas de evaporação estarem ligeiramente separadas entre si, a taxa de variação entre elas foi a mesma. A Figura 8.27 mostra a mesma relação entre evaporação e tempo, agora normalizada com relação aos valores finais das duas grandezas. Uma função potencial foi ajustada entre os valores, com coeficiente de determinação de 0,98.

A variação do topo da camada de lama está na Figura 8.28. Ela ocorreu em uma taxa de 9,8 mm/dia no primeiro mês, o que representaria aproximadamente 1% em relação à altura total da camada analisada, reduzindo em seguida para aproximadamente 0,4%, ou seja, 2mm/dia. Já a variação do teor de umidade gravimétrico do topo da camada da lama com o tempo está na Figura 8.29. Por este gráfico, pode ser verificado que foram necessários mais de cinquenta dias de

ensaio até que este topo dessaturasse, lembrando ser 68% o valor de entrada de ar deste resíduo. O limite de plasticidade só foi atingido cem dias depois do início, e o de contração, só quase ao fim do experimento. Mesmo assim, antes de atingir o teor de umidade equivalente ao limite de plasticidade, o solo já estava fissurado. Um ajuste logarítmico pelos pontos medidos forneceu uma equação com coeficiente de determinação de 0,98, que pode ser usada para uma estimativa inicial em um anteprojeto. A mesma análise para a variação do índice de vazios com o tempo está na Figura 8.30 e a apresentada ao longo de toda a camada durante o ensaio, na Figura 8.31.



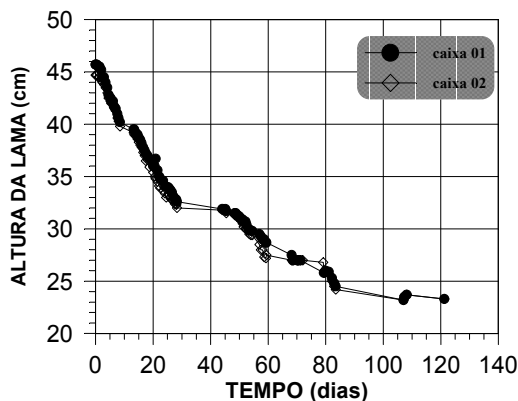
**FIGURA 8.26:** Variação Diária do Peso das Caixas de Secagem.



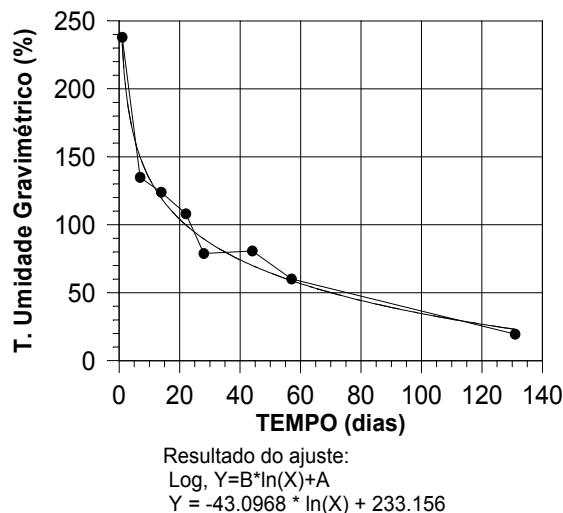
**FIGURA 8.27:** Evaporação Acumulada Normalizada contra Tempo Normalizado da Lama Vermelha OP Neutralizada.

A Figura 8.32 mostra como foi a variação da massa específica total ao longo de ensaio. Os parâmetros obtidos estão sendo utilizados como dados de entrada no modelo proposto por Richards (1992). Como ainda não foi calculada a condutividade hidráulica não saturada dos resíduos, esta análise preliminar ainda está sendo feita à partir de estimativas deste parâmetro. Os resultados conseguidos até agora estão sendo considerados similares aos medidos e um bom início para atingir um melhor ajuste no futuro, quando todas as propriedades do resíduo já

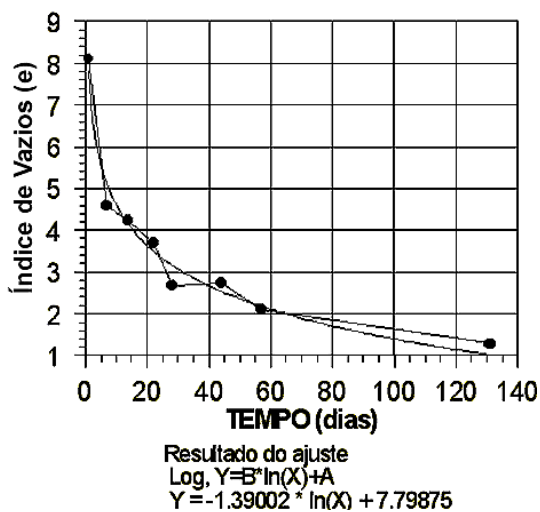
estarão determinadas. O modelo tem previsto o recalque da lama com um erro de aproximadamente 16% (Richards, 1998).



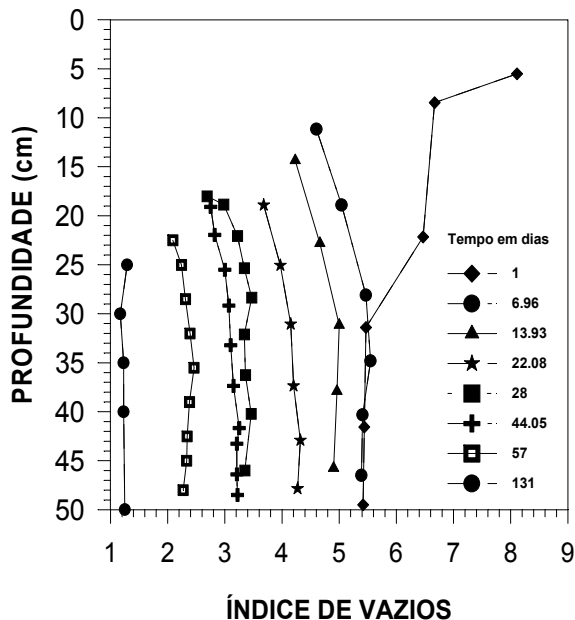
**FIGURA 8.28:** Variação do Topo da Camada da Lama Vermelha OP Neutralizada.



**FIGURA 8.29:** Variação do Teor de Umidade Gravimétrico da Lama Vermelha OP Neutralizada

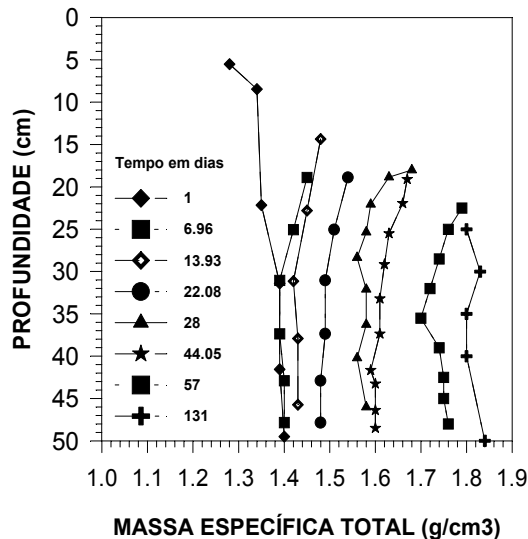


**FIGURA 8.30:** Variação do Índice de Vazios do Topo da Camada da Lama Vermelha OP Neutralizada.

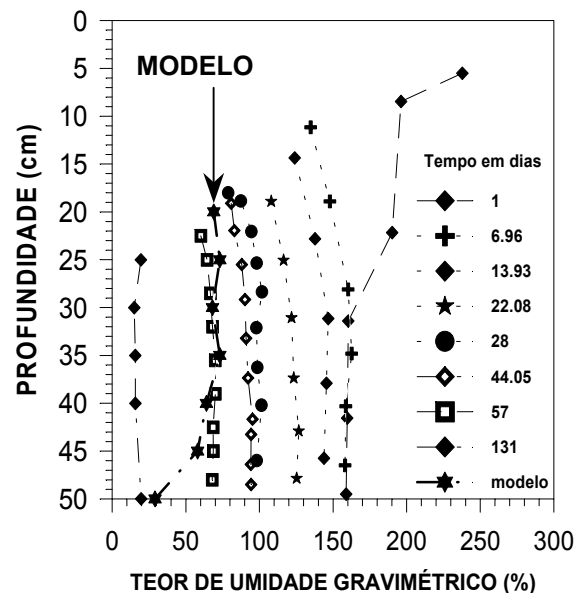


**FIGURA 8.31:** Variação do Índice de Vazios da Camada da Lama Vermelha OP Neutralizada.

A Figura 8.33 mostra a variação do teor de umidade da camada ao longo do ensaio. Também está plotado na figura, os resultados preliminares do modelo, para um período de simulação equivalente a 60 dias. Pode ser percebido que o ajuste é muito bom, o que é uma indicação de que a metodologia de ensaios usada é adequada e promissora.

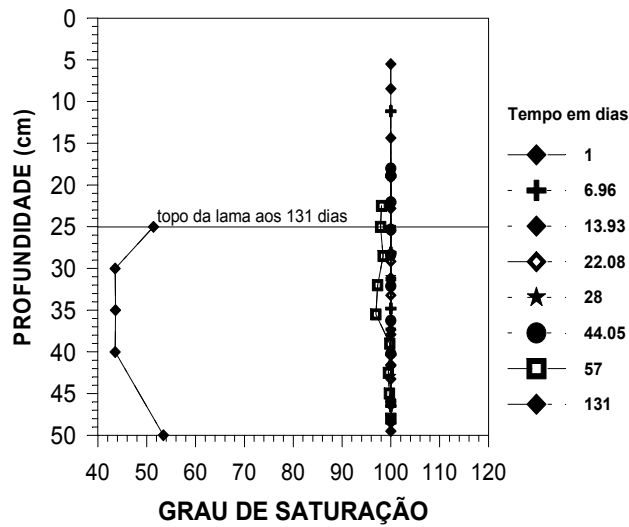


**FIGURA 8.32:** Variação da Massa Específica Total da Lama Vermelha OP Neutralizada.

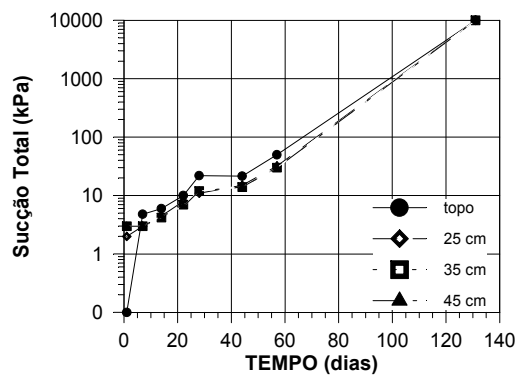


**FIGURA 8.33:** Comparação Entre Resultados de Modelo Numérico e Medidas de Variação do Teor de Umidade Gravimétrico da Lama Vermelha OP Neutralizada.

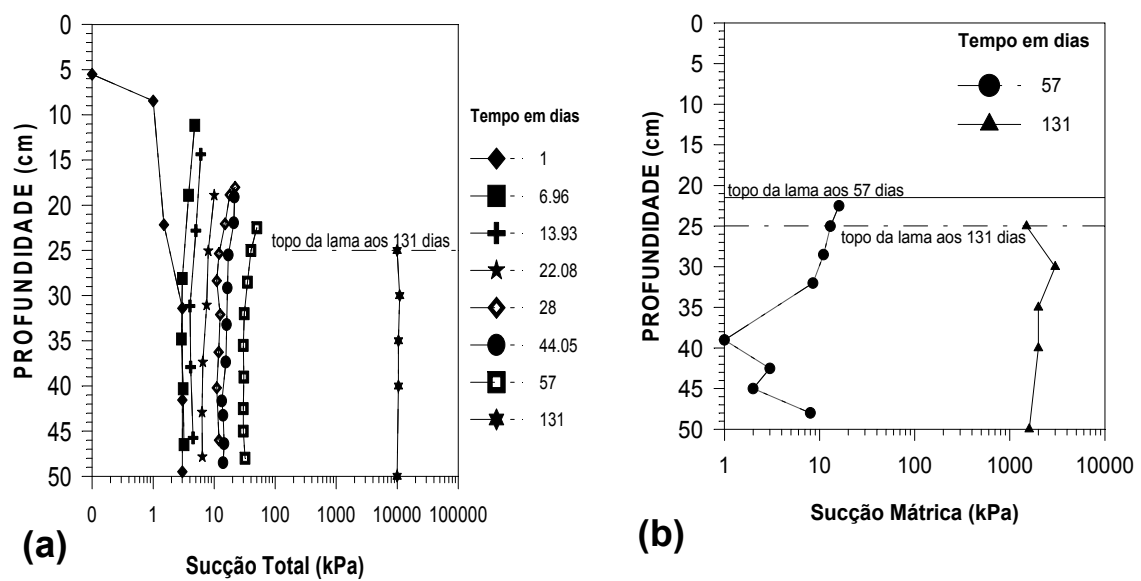
O desempenho dos tensiômetros já foi comentado no Capítulo 05, onde foi mostrado sua resposta típica e valores registrados. Como o resíduo permaneceu saturado quase que todo o ensaio, foram baixos os níveis de sucção matricial registrados, uma vez que os dados vindos deste instrumento foram considerados de tensão total. O ganho de sucção mátrica após determinado teor de umidade passa a ser, porém, muito rápido. A Figuras 8.34 mostra como foi variação do grau de saturação ao longo do ensaio. A Figura 8.35 mostra como a sucção evolui com o tempo nas camadas a 5, 10, 15 e 20 cm de profundidade, lembrando que deve se ter em mente as considerações feitas no Capítulo 05 sobre admitir as leituras dos instrumentos como de sucção total. A Figura 8.36 mostra a distribuição da sucção no resíduo.



**FIGURA 8.34:** Variação do Grau de Saturação da Camada de Lama Vermelha OP Neutralizada Ao Longo dos Ensaios de Ressecamento.



**FIGURA 8.35:** Variação da Sucção da Lama Vermelha OP Neutralizada Ao Longo dos Ensaios de Ressecamento.



**FIGURA 8.36:** Variação da Sucção da Camada de Lama Vermelha OP Neutralizada Ao Longo dos Ensaios de Ressecamento.

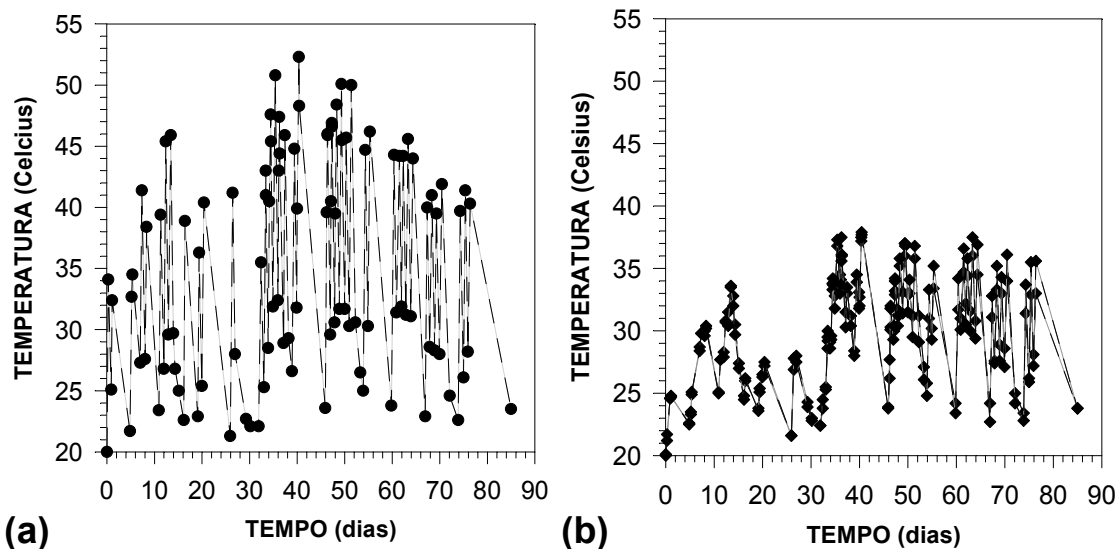
## 8.6

### Resultados dos Ensaios Maiores na Lama Vermelha OP Não Neutralizada

O ensaio com a lama não neutralizada teve como grande diferença em relação à neutralizada, o teor de sólidos inicial. Aqui, foi usado um valor de aproximadamente 50%, contra 34% no outro ensaio. Em termos de teor de umidade gravimétrico, isto corresponderia a 100% e a 240% respectivamente. Com isso, todas as características de compressibilidade ficaram bastante diferenciada uma da outra, bem como o comportamento em relação ao ressecamento.

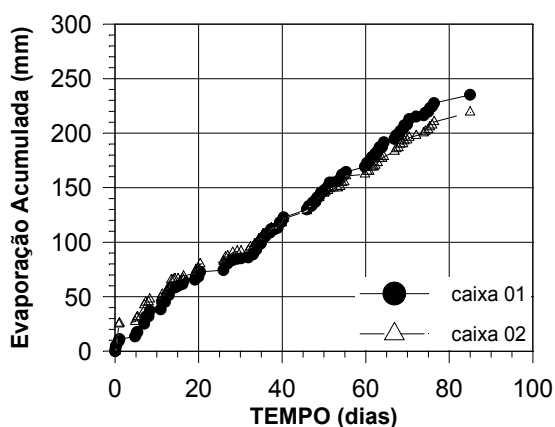
A temperatura média da sala sem que as luzes especiais estivessem acessas, também variou de 20 a 30°C neste período, com umidades relativas do ar entre 65 a 70%. Nestas condições, foi observado com relação aos gradientes térmicos, que registrava-se temperaturas maiores nas camadas internas do solo. Os gradientes em relação à superfície ficavam, em média, em torno de 1°C, mas chegavam até 4.7°C. Após oito horas de ensaio contínuo, a temperatura ambiente variava de 45 a 55°C, chegando a 62°C em uma ocasião, o que equivale de 28 a 30% de umidade relativa, em média. Então, era percebido uma inversão no sentido do fluxo de calor, havendo uma elevação acentuada da temperatura das camadas superficiais, enquanto as temperaturas no interior da lama quase não mudavam. A diferença nos valores registrados na superfície e interior do resíduo também chegava até a 15°C. Os registros de temperatura feito por dois termopares instalados no centro de um dos lisímetros (caixa 01) estão representados na Figura 8.37. Na parte (a), estão os dados referentes ao termopar instalado a 5cm de profundidade e, na (b), os de um instalado a 20cm no interior da lama.

A curva de evaporação obtida está mostrada na Figura 8.38, tendo apresentado taxa média de 3,0mm/dia, inferior ao da lama neutralizada. Por ela, pode se ver que não ficou definido o ponto de mudança de taxa de evaporação potencial para o segundo estágio de evaporação. Ou seja, o ideal é que o ensaio tivesse se prolongado mais um período para que este ponto fosse detectado. Pode ser notado que isto está começando a ocorrer.

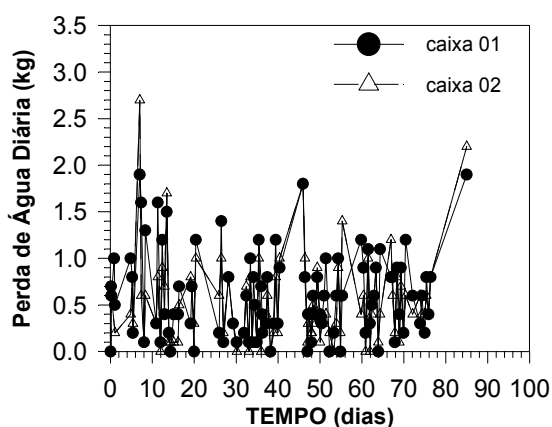


**FIGURA 8.37:** Variação da Temperatura da Camada de Lama Vermelha OP Não Neutralizada Ao Longo dos Ensaio de Ressecamento: (a) 05cm de Profundidade e (b) 20cm de Profundidade.

Pela análise da Figura 8.39, que mostra a perda diária de líquido, chegou-se a conclusão que o ensaio executado ocorreu quase que totalmente na sua taxa potencial de evaporação, pelo fato de que a perda diária de água ser quase que constante ao longo de quase todo o período de acompanhamento. Só no final é que ela começou a diminuir, o que confirma a indicação de que se entraria entrando no segundo estágio de evaporação. Porém o ensaio foi interrompido logo em seguida, sem que isto fosse confirmado.



**FIGURA 8.38:** Evaporação Acumulada Medida Durante Ensaio com a Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



**FIGURA 8.39:** Perda de Água Diária Registrada ao Longo do Ensaio da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



A Figura 8.40 mostra a variação do topo da camada da lama com o tempo. Ela ocorreu em uma taxa quase que constante durante o período de acompanhamento, só reduzindo no final. Este fato também pode ser uma comprovação de que as condições de secagem ao longo do ensaio, foram em taxa de evaporação potencial. Uma função linear se ajustou a estes dados com um coeficiente de determinação de 0,98, indicando que neste trecho de evaporação potencial, uma primeira aproximação do cálculo dos recalques pode ser feita por ela. A equação registrada foi:

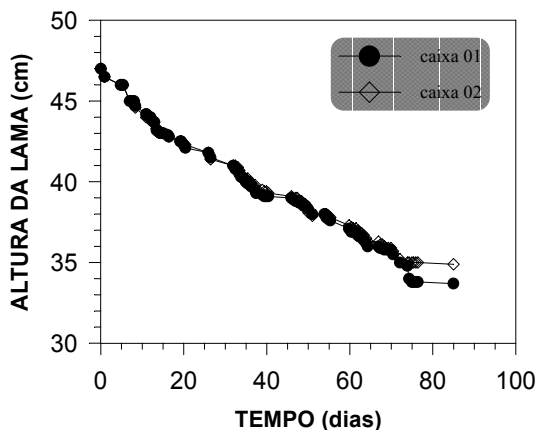
$$\text{Altura da camada (cm)} = -0,145(\text{tempo} - \text{dias}) + 45,5 \quad (8.1)$$

A Figura 8.41 mostra a variação do teor de umidade gravimétrico da superfície da lama (em média, 5,0cm de profundidade). No final do período analisado, o teor de umidade registrado estava em torno de 29% (teor de sólidos próximo de 80%), que é próximo ao limite de plasticidade do material, confirmando a tendência à diminuição dos recalques. A superfície da lama (5 cm superficiais) levou 21 dias para atingir o teor de umidade equivalente ao limite de liquidez determinado pelo aparelho de Casagrande (63%), 42 dias para dessaturar (54%, ponto de entrada de ar) e mais de 80 dias para chegar ao limite de plasticidade (29%). Porém, já se apresentava fissurada naquele que seria sua faixa plástica. Um ajuste logarítmico foi feito pelos valores de teor de umidade com o tempo desta camada superficial, com uma equação com coeficiente de determinação de 0,98, que pode permitir uma primeira estimativa de valores em termos de anteprojeto. A equação encontrada foi:

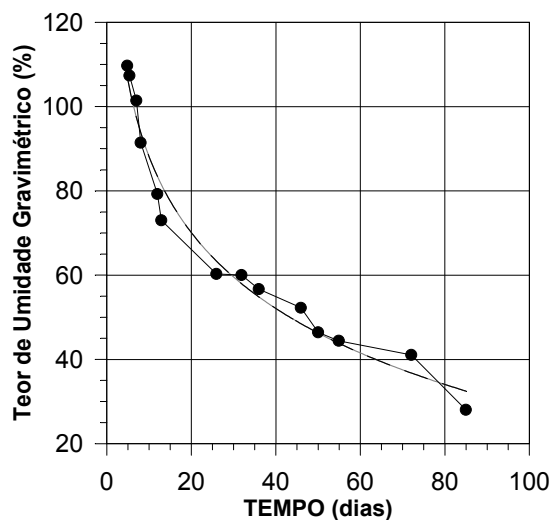
$$\text{Teor de Umidade Gravimétrico (\%)} = \{-26[\ln(\text{tempo} - \text{dias})]\} + 148 \quad (8.2)$$

A Figura 8.42 mostra a variação dos perfis de umidade obtidos por amostragem. Aí, fica bem claro o avanço da frente de ressecamento. Nota-se que, mesmo depois de 2 meses de secagem, abaixo de 25cm de profundidade, os teores de umidade ainda eram elevados (em média, 60%, teor de sólidos também em torno de 60%), correspondendo a um nível de sucção matricial inferior a 5kPa. Percebe-se, também, que apenas aproximadamente 20 dias foram necessários para que a camada passasse de um teor de umidade médio de 75% para

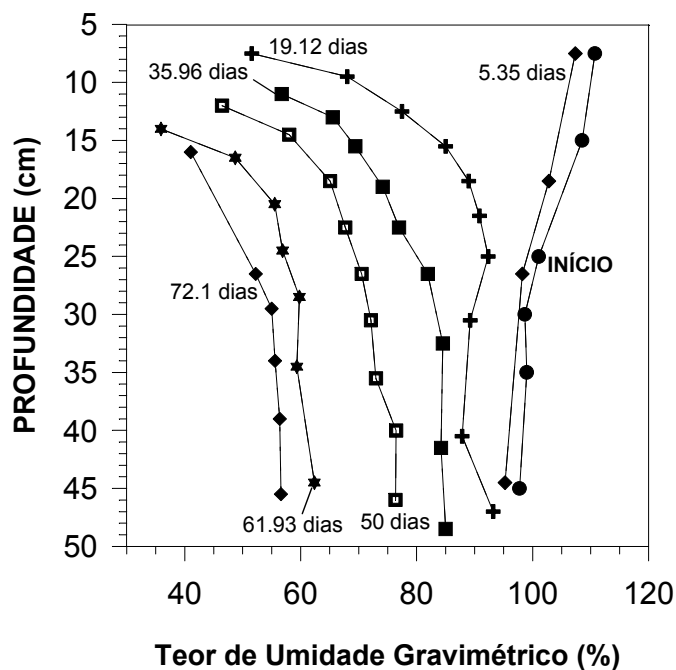
aproximadamente 55% (teor de sólidos de aproximadamente 57% para em torno de 65%), para uma mesma taxa de evaporação. Isto é uma indicação da necessidade do pré espessamento do resíduo antes da disposição para que se agilize o processo.



**FIGURA 8.40:** Variação do Topo da Camada de Lama Vermelha OP Não Neutralizada. Medida Durante Ensaio



**FIGURA 8.41:** Variação do Teor de Umidade Gravimétrica do Topo da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

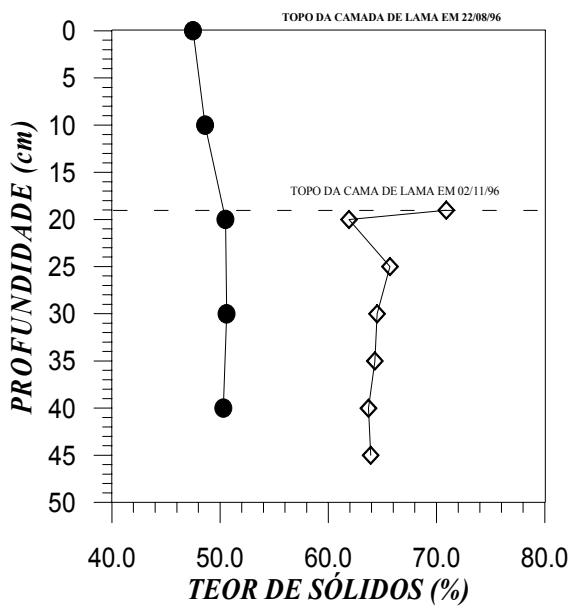


**FIGURA 8.42:** Variação do Teor de Umidade Gravimétrica da Camada de Lama Vermelha OP Não Neutralizada Durante Ensaio de Ressecamento.

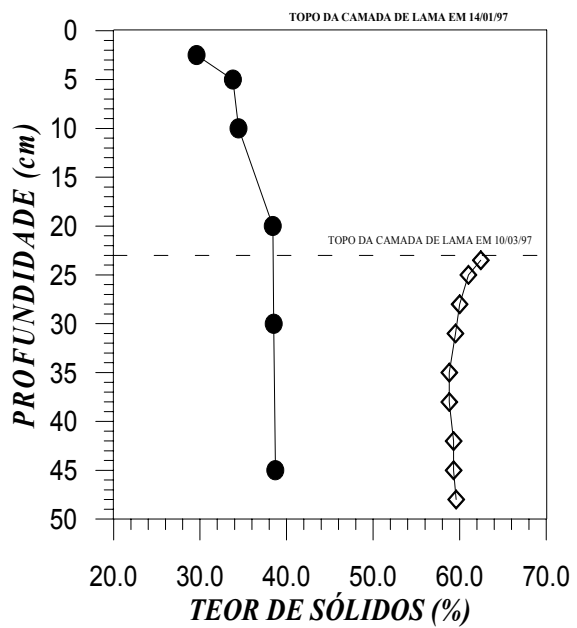
O desempenho dos tensiômetros ao longo deste ensaio já foi comentado no Capítulo 05. Os valores de sucção medidos pelos tensiômetros na camada superficial uma semana após o início do ensaio, era de apenas 0.7kPa, aproximadamente. Cerca de um mês após iniciado o processo de ressecamento, os valores de sucção registrados na superfície era de 22kPa e a 20cm de profundidade, tinha-se 17kPa. Ao final do ensaio, o trecho de 5 a 10cm de profundidade apresentava sucção mátrica em torno de 300kPA.

As Figuras 8.43 e 8.44 mostram o perfil de concentração de sólidos para a lama vermelha OP não neutralizada e a neutralizada, no início do ensaio e após um ressecamento de aproximadamente 3 meses. Nota-se que a lama não neutralizada atingiu um grau de ressecamento um pouco maior neste período, bem como também apresentou um recalque ligeiramente superior ao da neutralizada. A diferença, contudo, é muito pequena, se for levado em consideração que o resíduo cáustico foi depositado em um teor de sólidos quase que 50% acima daquele da lama neutralizada. Foi verificado que o licor neutralizado apresentou para as condições de ensaio utilizadas, uma taxa de evaporação ligeiramente superior que o licor não neutralizado. Este último foi verificado de evaporar em uma taxa máxima de 1,1mm/hora, enquanto que o neutralizado chegou a 1,4mm/hora. A título de comparação, a água comum apresentou taxa de evaporação máxima de 0,8mm/hora, enquanto que a água destilada chegou a 1mm/hora.

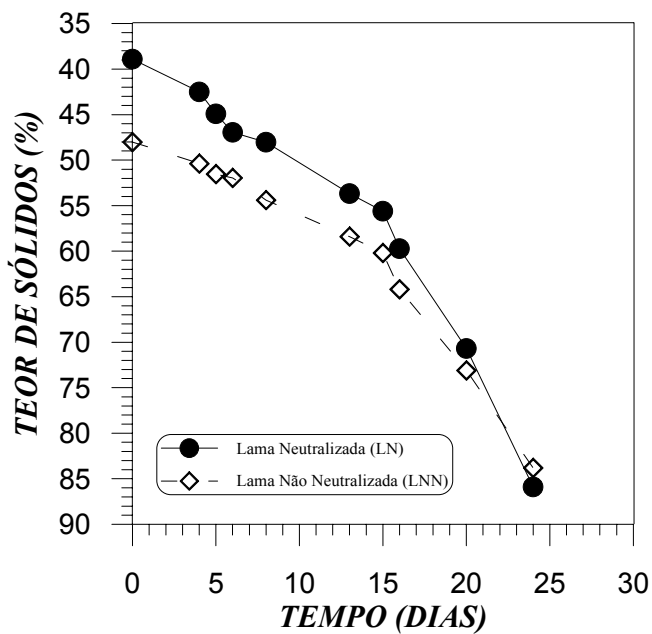
Este melhor desempenho da lama neutralizada foi verificado de acontecer em outros ensaios, como pode ser checado pela Figura 8.45, que compara diretamente a variação de teor de sólidos com o tempo dos dois materiais. A figura mostra que o resíduo neutralizado, mesmo tendo sido disposto com um teor de sólidos menor que o cáustico, acabou apresentando taxa de perda de umidade ligeiramente maior. Na lama vermelha OP não neutralizada, a formação da cristalização de sais na superfície ocorre primeiro que na neutralizada e isso deve alterar as taxas de evaporação ao longo do processo.



**FIGURA 8.43:** Teor de Sólidos Inicial e Após Três Meses de Ressecamento da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



**FIGURA 8.44:** Teor de Sólidos Inicial e Após Três Meses de Ressecamento da Lama Vermelha OP Neutralizada.



**FIGURA 8.45:** Comparação da Variação do Teor de Sólidos com o Tempo das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Cáustica.

## 8.7

### Ensaio em Lisímetros Menores

Foram executados ensaios em caixas de dimensões e volumes variados com o intuito principal de verificar qual a dimensão mínima seria necessária para a determinação dos parâmetros considerados relevantes no estudo do ressecamento, especialmente a permeabilidade não saturada, de acordo com o método proposto por Swarbrick (1994) e Kayyal et al. (1995). Eles têm sido considerados adequados para a estimativa dos efeitos antecipados da secagem, desde que alguns procedimentos sejam seguidos quando se extrapola estes dados para a escala de campo (Swarbrick, 1994). Além disso, aproveitou-se para coletar novos dados e observações sobre o modo de trincamento de solos moles, de modo a fornecer novos subsídios para a incorporação do padrão de fissuramento aos modelos de previsão de comportamento de depósitos de solos submetidos a variação de volume devido ao ressecamento.

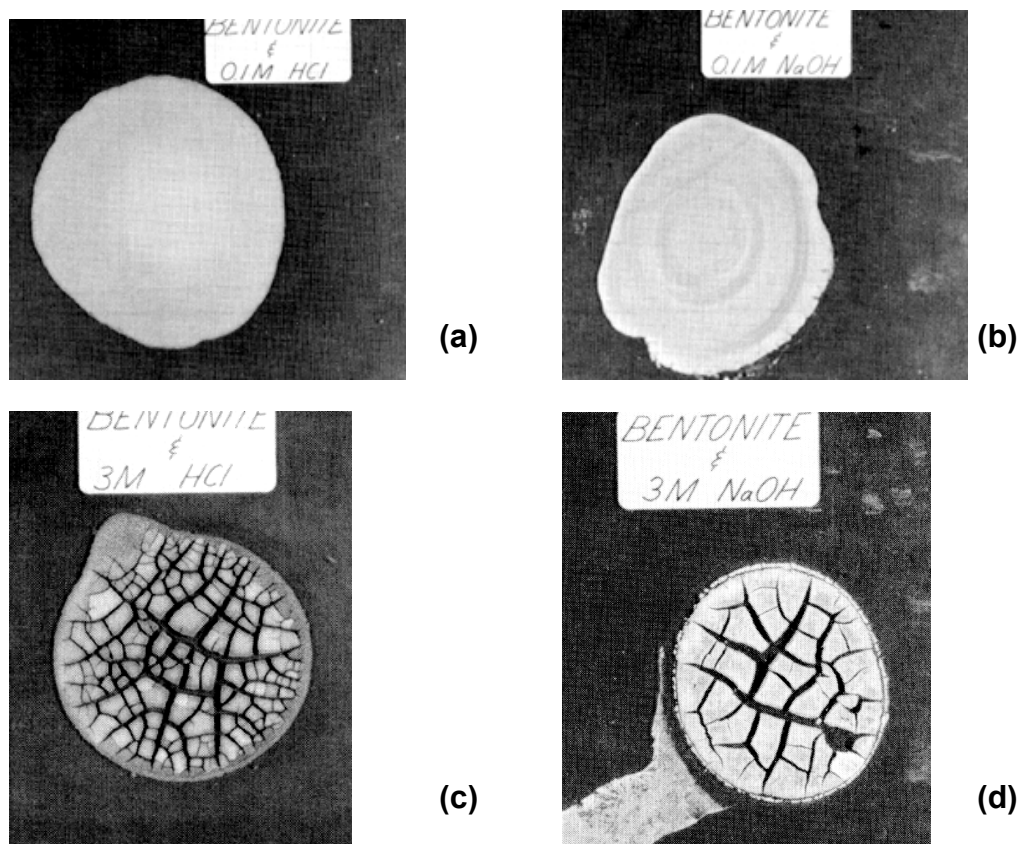
Neste primeiro momento, porém, só serão apresentadas aqui algumas observações de caráter superficial sobre os modos de trincamento observados no decorrer destes ensaios. Portanto, é o objetivo desta seção sintetizar estas anotações, procurando identificar os fatores que interferem no mecanismo de fissuramento da camada.

#### 8.7.1

### Comentários Gerais Sobre Fissuramento de Solos

São muitas as observações feitas com relação ao trincamento das camadas de solo e os fatores que as influenciam, sendo que uma revisão sobre o tema pode ser encontrada em Oliveira Filho (1998), por exemplo. De uma maneira geral, têm sido relato dos solos conterem uma malha de fissuras indo da largura de um fio de cabelo a 2 a 3cm de largura (Bowles, 1994). Fang (1986) fez alguns registros da influência do tipo e concentração de fluido no padrão de fissuramento, verificando a ligação destes fatores com a densidade de ocorrência das trincas. A Figura 8.46 reproduz alguns de seus resultados, inclusive com o uso de soda cáustica, um dos fluidos aqui analisados. McNeilan & Skaggs (1988) reportaram observações sobre

uma superfície seca de um aterro hidráulico, tendo sido notado o modelo de fissuras de ressecamento ortogonal, com 30 cm de largura e 150 a 210 cm de profundidade. Kayyal (1995) fez um relato sobre os efeitos dos estágios de evaporação no desenvolvimento de trincas de contração em solos, à partir de ensaios de laboratório. Seu objetivo era chegar à descrever os meios pelos quais o desenvolvimento de fissuras poderia ser controlado em solos submetidos a secagem.



**FIGURA 8.46:** Padrões de Trincamento Observados em Resposta à Várias Condições de Fluido dos Poros (Fang, 1986).

Os pesquisadores que fizeram observações de campo para a descrição do ressecamento de resíduos de mineração ou processamento industrial, pouco ou nada mencionam a respeito dos modos de trincamento, como o caso de Abu-Hejlen & Znidarcic (1995) e Swarbrick & Fell (1992). No Brasil, Botelho & Gaioto (1994) observaram o comportamento de amostras de rejeitos de mineração submetidas a secagem ao ar, mas nada mencionam sobre fissuras. Ávila et al.

(1995) também nada registraram sobre os modos de trincamento dos testes de campo em lama de lavagem de bauxita por eles realizados.

Para que o processo de evaporação seja contínuo das superfícies de solos sem cobertura, em geral três condições teriam de ser satisfeitas (*Linsley et al., 1978*). Uma, de que houvesse um fornecimento contínuo de calor para a superfície do solo. Também teria que ter a pressão de vapor na atmosfera sobre o solo menor que aquela ocorrendo na sua superfície. E ainda, seria necessário haver um fornecimento contínuo de fluido do interior do solo para a frente de evaporação. Estes fatores seriam necessários para iniciar a evaporação, mas a sua taxa e duração poderiam variar de acordo com vários outros, tipo temperatura, velocidade de vento, etc. (*Kayyal, 1995*). Em geral, tem sido verificado que solos apresentam curvas de taxa de secagem com características comuns, podendo ser divididas em duas zonas, uma horizontal, representando a zona de taxa constante de evaporação e outra decrescente, representando a zona de taxa decrescente de evaporação (*Linsley et al., 1978*). Esse comportamento também foi notado no caso de resíduos de mineração (*Swarbrick, 1992*).

À medida que ocorre a evaporação, se forma um menisco entre a coluna do fluido que preenche os vazios do solo e suas partículas, desenvolvendo-se tensões de tração. Estas tensões levariam o fluido para fora dos meniscos, reduzindo seu tamanho, e mais evaporação ocorre. O limite acontece quando se atinge o limite de contração do solo, sendo que à partir deste ponto, o fluido evapora sem que ocorra variação de volume da estrutura (*Bowles, 1984*). Ao se atingir o limite de contração, os meniscos de fluido nos vazios se retraem para o interior da amostra, provocando uma troca de cor da mesma, de um tom mais escuro para um mais claro. Pode-se, assim, originar pressões muito elevadas, principalmente em solos finos, que excedem a resistência à tração do material, iniciando o trincamento do solo (*Tschebotarioff, 1958*).

Para Abu-Hejlen & Znidarcic (1995), teoricamente as fissuras deveriam se desenvolver na superfície e se prolongar para baixo simultaneamente e uniformemente em uma camada de solo homogêneo. No campo, porém, seu espaçamento e padrão seriam influenciados por pequenas variações laterais nas características do material. No início da abertura da trinca, se desenvolveria uma

zona de fratura de pequena espessura nos pontos de maior fraqueza da camada. Aí, mais tarde, as fissuras se desenvolveriam e o solo fora da zona fraturada seria descarregado elasticamente das tensões de tração totais laterais. Na zona de fratura, a tensão de tração lateral total começaria a diminuir e, uma vez que ela chegasse a zero, as trincas se desenvolveriam completamente ou se abririam e as colunas de solo fissurado separariam-se completamente. As tensões de tração laterais totais em toda camada cairiam uniformemente, de modo que não haveria tensões de cisalhamento nem verticais e nem horizontais durante e depois do desenvolvimento das fissuras.

Para Fang (1994), em um dado material, as características de trincamento e fratura pertenceriam a um único sistema. Fissuramento representaria o fenômeno de pré fratura do material e a fratura, sua resposta na condição de ruptura. Nos estágios iniciais de uma curva de tensão x deformação, como o ensaio de compressão diametral do Capítulo 04, as fissuras se desenvolveriam devido à causas variadas, sendo o comportamento do solo controlado por energias, tais como a térmica, a elétrica e a magnética. Mas na ruptura, ele seria controlado só pela energia mecânica, que originaria o fraturamento. Fang (1991) também afirmava que o desenvolvimento de fissuras dependeria das condições do meio, ação da tensão capilar, térmica ou migração elétrica ou efeitos visco elétricos ou magnético elétrico térmicos.

Fang (1994) propôs uma divisão dos tipos de fissuramento que frequentemente existiriam em uma massa de solo. De acordo com ele, estes seriam:

1. Fissuramento devido à contração: seria o mais comum, ocorrendo devido às forças de tração. Devido à perda de água, o solo perderia sua habilidade de compensar estas forças de tração por fluxo plástico, o que levaria à quebra de superfície em pedaços de geometria e formas mais ou menos distintas, que por sua vez, dependeriam de uma série de fatores, como a composição mineralógica do solo, o processo de aquecimento e dos fluidos dos poros.



2. Fissuramento térmico: provocados por variação de temperatura. Tensões térmicas se desenvolveriam quando um material é aquecido e rapidamente esfriado. Os solos, porém, teriam seu estado de tensão influenciado simultaneamente por variações de temperatura e umidade.
3. Fissuras de tração: seriam provocadas principalmente por sobrecargas, incluindo carregamento estrutural, chuva, árvores, vegetação, cargas de rastejo superficial devido à variações sazonais. Às vezes, elas também são associadas com variações na umidade e tensões térmicas.
4. Fissuramento de fraturamento: carga de fratura no solo seria uma do tipo cíclica, provocada pela combinação de tensões térmicas e de contração e a flutuação da poropressão entre as partículas do solo, causando o que seria o fissuramento de fraturamento.

Como pode ser notado, são numerosos os fatores afetando as fissuras e como elas interagem com a condição de ruptura. Em geral, todas as fissuras seriam relacionadas ao teor de umidade no solo e ao meio ambiente local. Fang (1994) continua afirmando que as condições de equilíbrio do solo seriam diferentes quando em contato com água líquida e um vapor. Mesmo em igual teor de umidade, a estrutura e propriedades físico-químicas de um sistema solo-água poderiam diferir muito, dependendo da trajetória de fluxo pelo qual este teor de umidade tenha sido atingido.

Quando o solo está secando, o ressecamento prossegue da superfície para baixo, a superfície se contraindo enquanto a resistência da água entre as camadas superior e inferior e nelas próprias impedem o ajuste de volume, causando o surgimento de tensões de tração. Desta forma, o fissuramento por ressecamento seria controlado por energia térmica.

Um outro fator que influenciaria no padrão de fissuramento dos solos seria a sua estrutura, se floculada ou dispersa. Evans (1991) afirma que estruturas floculadas produziriam áreas mais largas de fissuramento que as dispersas, devido ao tipo de ligação entre as partículas.

Enquanto que o ressecamento sem restrições pode ser atingido em amostras relativamente pequenas em laboratório, depósitos de solos coesivos “in situ”

submetidos a evaporação experimentam um processo de ressecamento constrangido devido a uma condição de deformação lateral “efetiva” nula ser mantida até que uma fissura se inicia na superfície do solo. A concentração de tensão na vizinhança da frente de avanço da trinca para o interior da camada resultaria em uma propagação controlada tanto pelo campo de tensão como pelas propriedades intrínsecas do solo (Konrad & Ayad, 1997).

Irwin (1958) mostrou que a propagação de fissuras estaria associada com este campo de tensão da vizinhança da extremidade dela, à medida que se aprofunda. Para uma trinca de tração longa em um meio idealmente elástico e condições de deformação plana, o fator de intensidade da ponta inferior da fissura (onde há a concentração de tensões que a levaria a se aprofundar) para um modo de abertura (modo I) seria dado por:

$$K_1 = \left( \frac{EG}{1-\nu^2} \right)^{0.5} \quad (8.3)$$

onde E é o módulo de Young, G é a taxa de alívio de energia de deformação com a extensão da fissura e  $\nu$ , o coeficiente de Poisson. À medida que  $K_1$  aumentasse até a um certo valor crítico, característica do material, a fissura seria propagada sem aumento da tensão aplicada. Para estimar a profundidade da propagação da trinca no momento de seu início, seria necessário calcular o fator de intensidade de tensão  $K_1$  como uma função de diferentes comprimentos de fissuras para os quais, o  $K_1$  seria igual ao crítico, correspondente à resistência do solo à fratura.

Lachenbruch (1962) afirmou que, para o caso de um sólido semi infinito, onde a tensão de tração estivesse uniformemente distribuída sobre um comprimento “b” e submetido a uma compressão gravitacional, a profundidade na qual a trinca para, denominada “a” seria dada implicitamente por:

$$K_{IU}(a) + K_{IG}(a) = K_{Ic} \quad (8.4)$$

onde o  $K_{IU}(a)$  representaria a contribuição da tração uniforme ao fator de intensidade da trinca em abertura;  $K_{IG}(a)$  seria a contribuição do peso da coluna

de altura “a”, e  $K_{Ic}$  seria o fator de intensidade crítico, correspondente à resistência ao fraturamento.

Penev & Kawamura (1993) descreveram um método simplificado para estimar o espaçamento de a extensão de trincas provocadas por contração restringida na camada de um pavimento feito com mateiras trados com cimento. As condições de restrição foram induzidas pelo atrito na sub-base. A solução se aplica a uma dada espessura de material submetida à contração uniforme e não é aplicável ao caso de solos onde a contração ocorre sobre uma espessura variável e não uniforme. No trabalho já citado de Lachenbruch (1962), ele propõe considerar que o espaçamento entre as fissuras possa ser estimado à partir do alívio de tensão teórico, pela hipótese de que uma outra trinca possa existir em pontos de aproximadamente 5 a 10% de alívio de tensão.

Konrad & Ayad (1977) propuseram um modelo para a previsão do espaçamento entre trincas de contração em solos coesivos submetidos a ressecamento, baseado na teoria de mecânica da fratura linear elástica. O princípio das tensões efetivas é utilizado para descrever a repartição de tensões no solo e outros conceitos de superposição de tensão, usado para prever o espaçamento entre elas. A propagação das trincas é analisada como uma distribuição trapezoidal da tensão de tração horizontal total, obtida à partir das relações constitutivas do material. O modelo poderia ser aplicado à lamas, solos naturais adensados e argilas compactadas. Segundo eles, um exemplo de uma lama submetida a uma taxa de evaporação de 0.02 cm/h resultou em uma previsão de espaçamento médio entre fissuras de 1.2 metros, aproximadamente, o que foi confirmado por observações de campo.

Kayyal (1995) secou amostras de solo argiloso, cilíndricas, compactadas, a diferentes umidades relativas, 3, 30 e 43%, e a uma temperatura fixa de 60°C. Notou que, quanto mais baixa era a umidade relativa, maior a taxa de evaporação constante e também, mais curta a sua duração. Também foi menor a umidade final da amostra ao final do ensaio para menor umidade relativa. Com relação ao fissuramento, o da amostra seca em umidade relativa de 3% foi extensivo, enquanto nenhuma trinca apareceu na seca a 43% e umas duas apareceram na seca a 30% de umidade relativa do ar. Nenhuma fissura apareceu ou foi notada

durante o período de taxa constante de evaporação. Porém, no início do período de taxa decrescente, uma frente de secagem formou-se progressivamente à partir da superfície em direção ao interior da amostra, com a formação de micro fissuras que se propagaram radialmente. O autor propôs, então, relacionar dois tipos de fissuras aos estágios evaporativos: aquele que resultaria da contração do solo durante o período de taxa constante e as micro fissuras que surgiriam durante o período de taxa decrescente do fluxo evaporativo. Nos ensaios aqui realizados, o que foi observado, porém, é que a densidade de trincas ficou muito mais condicionada à espessura inicial da amostra, já que mesmo em uma umidade relativa acima de 60%, as amostras com camadas finas apresentaram um extenso fraturamento, contra poucas trincas para as espessas.

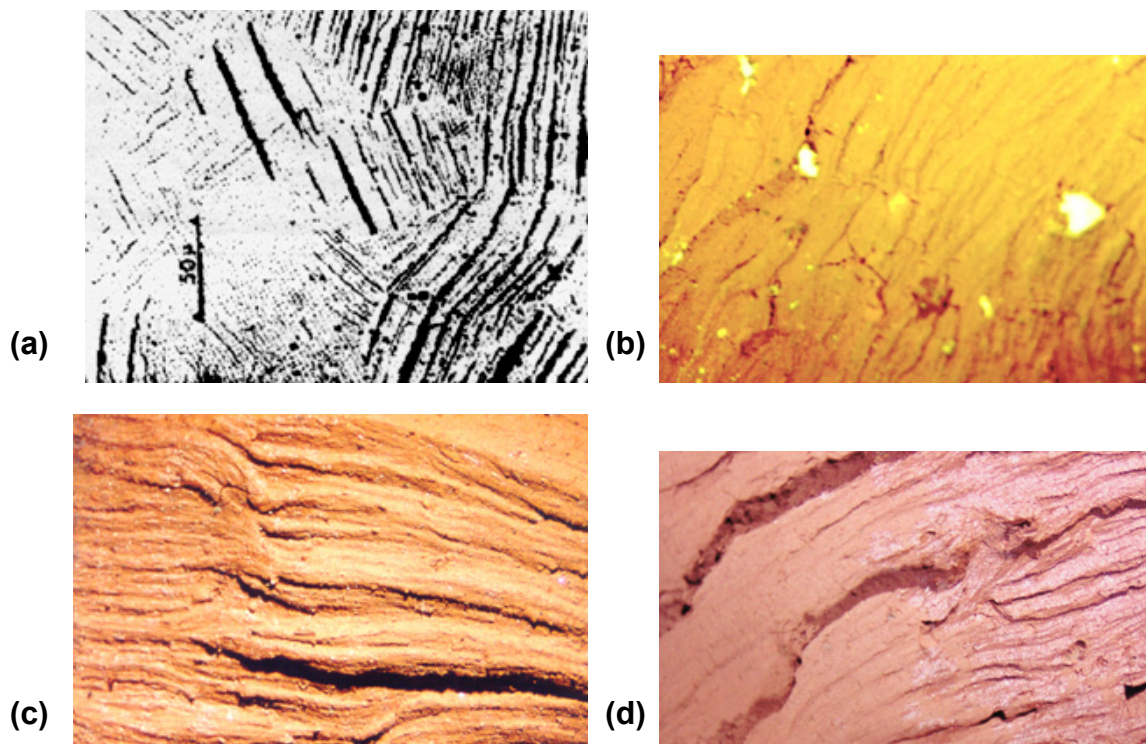
Para Sibley & Williams (1993), taxas de secagem muito elevadas levariam a maiores gradientes de teor de umidade e também nas sucções e resistência à tração. Tais gradientes permitiriam que tensões de contração do solo excedessem localmente a resistência à tração, resultando em fissuramento prematuro em teores de umidade relativamente altos. Isto também aconteceu nos ensaios realizados, o fissuramento ocorrendo quando a mostra ainda apresentava elevados teores de umidade, em torno de 90% no caso dos ensaios 01 e 02 na lama vermelha OP não neutralizada. Mas, como as taxas de secagem não eram tão elevadas, essas fissuras também podem ser atribuídas a uma concentração de tensão localizada, provocada pela presença da instrumentação. Tanto que, no caso dos ensaios 03 e 04 na lama vermelha OP neutralizada, iniciado com um menor teor de sólidos e instalação mais cuidadosa dos instrumentos, as fissuras só ocorreram muito mais tarde.

Chandler (1988), observando camadas finas de lama vermelha secando ao sol, verificou a ocorrência desse fissuramento em alto teores de umidade. Primeiro, as camadas se contraíam verticalmente, mas por volta de um teor de sólidos de 35% (teor de umidade por volta de 200%), a contração horizontal provocava o desenvolvimento de um padrão de fissuras na camada. À medida que a secagem prosseguia, essas fissuras se alargavam e se tornavam mais numerosas. Quando o teor de umidade caía para em torno de 30 a 25% (teor de sólidos entre 75 a 80%), a lama não mais se contraía.

Cooling (1985), analisando um mesmo tipo de lama, obteve resultados que mostraram que a taxa de evaporação do solo e de seu licor livre foram idênticos ao longo do período de 30 dias de seus testes (não relatou sob quais condições ambientais). Desta forma, nem a área reduzida disponível e nem a acumulação dos sais na superfície da lama alteraram as taxas de evaporação, quando comparadas a uma superfície de licor livre, sob as condições do ensaio. Também verificou que variações no teor de umidade inicial não parecia afetar o comportamento de secagem. A saturação da amostra não seria perdida até que ela atingisse o limite de contração, que seria correspondente a um índice de vazios de um (teor de sólidos em peso de 75%).

De acordo com Abu-Hejlen & Znidarcic (1996), qualquer variação na taxa de evaporação resultaria numa redistribuição do perfil de sucção dentro da camada ressecando, com um descarregamento inevitável de pelo menos uma parte da camada. Durante o descarregamento, o volume aumentaria, controlado pelo comportamento do solo ao longo da linha de descarregamento - recarregamento no diagrama edométrico, sendo mínimo para a maioria dos solos. Isso submetteria o material a uma espécie de carregamento cíclico. Sob a ação de cargas cíclicas, fissuras poderiam ser iniciadas como o resultado de deformação plástica cíclica. Mesmo se as tensões nominais fossem bem abaixo do limite elástico, localmente as tensões poderiam ser acima, devido às concentrações de tensão e às deformações plásticas que ocorreriam localmente (*Broek, 1986*).

A Figura 8.47(a) mostra a parede de uma fissura por fadiga, causadas por carregamento cíclico e caracterizada pela formação de estrias, de uma liga de alumínio. Nas Figuras 8.47(b), (c) e (d) estão a parede de uma fissura na lama não neutralizada aqui analisada, ampliada quarenta vezes. Pode ser notada a semelhança entre as estrias da face, sugerindo que a formação da trinca no resíduo ocorreu por fadiga. De acordo com Morris et al. (1992), o fissuramento de solos sob efeito de ressecamento é controlado pela sucção desenvolvida e suas propriedades como módulo de compressão, coeficiente de Poisson, resistência ao cisalhamento e à tração, e energia superficial específica.

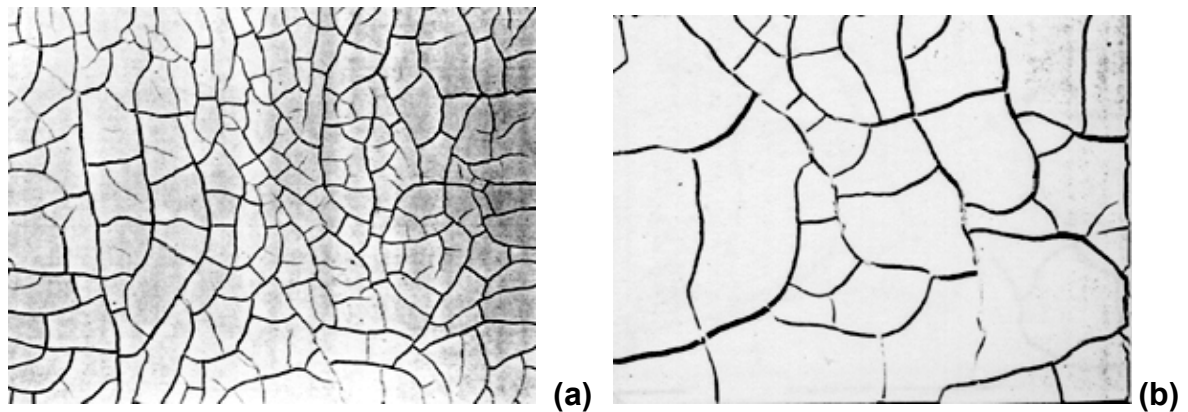


**FIGURA 8.47:** Comparação entre Paredes de Fissuras de uma Barra de Alumínio Rompida por Fadiga (*Broek, 1986*) e As da Lama Vermelha (ampliadas 40 vezes).

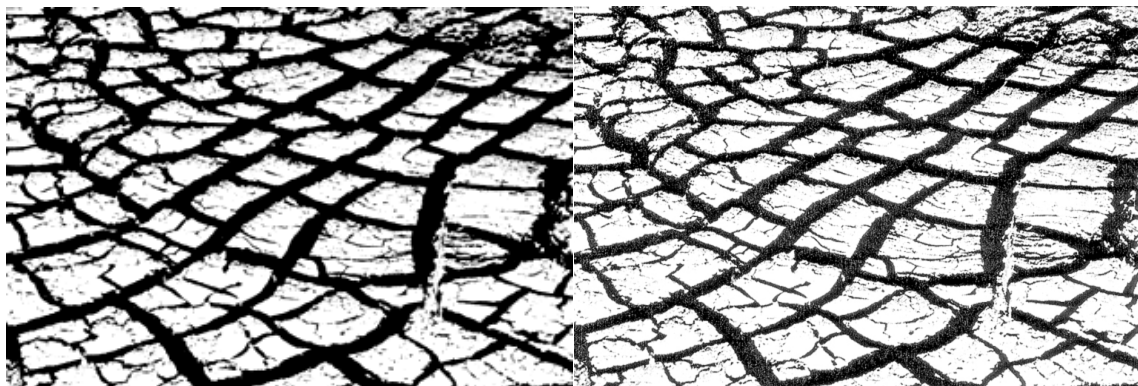
Corte & Higashi (1964), após um extenso programa experimental para investigar fissuras em solo submetidos ao ressecamento, concluíram que o padrão de fissuras é mais dependente da espessura da camada de solo que a temperatura ou umidade do ar, bem como das condições de contato da camada com a base do recipiente usado no teste. O teor de umidade no qual as fissuras se iniciariam também seria uma função da espessura da camada e da umidade do ar, e independente das condições de atrito da base da camada. A Figura 8.48 mostra um de seus resultados, comparando o padrão de trincamento de uma amostra com 6,8mm de espessura (parte a) com outra de 14,7mm (parte b), ambas em contato com madeira.

De acordo com Blight (1997), fissuras por ressecamento verticais em um solo na região não saturada só seriam ininterruptas até aproximadamente um metro de profundidade, no máximo atingindo 1,5 metros. Comumente, elas não seriam contínuas até a superfície, e sim terminariam em uma fissura inclinada em uma das suas extremidades. Nenhuma fissura inclinada existiria usualmente em profundidades menores que aproximadamente 0,5m. No campo, ainda segundo o

mesmo autor, os solos que sazionalmente contraem e expandem apresentariam dois grupos de fissuras, um correspondente à contração e o outro, à expansão. Além disso, ressaltam que o padrão típico de trincas por ressecamento seria mais quadrado que hexagonal, representado pela Figura 8.49. Através de análises de fotografias de superfícies fissuradas por ressecamento em solos cultivados e em depósitos de lama, foi verificado que existem semelhanças entre os seus padrões de trincas, que também estariam entre o quadrado e o hexagonal (Velde, 1999; e Velde, 2001).



**FIGURA 8.48:** Comparação entre Padrões de Trincamento em Função da Espessura da Amostra: (a) espessura de 6,8mm e (b) espessura de 14,7mm. (Corte e Higashi, 1964)



**FIGURA 8.49:** Padrão Típico de Fissuras por Ressecamento em Solos ( adaptado de Blight, 1997)

Ayad et al. (1997) apresentaram um modelo para previsão da profundidade e espaçamento entre fissuras devido a ressecamento. Segundo os autores, a previsão das sucções no início do fissuramento, o tempo para este início e a profundidade da propagação das trincas foi razoável. Konrad & Ayad (1997)b fizeram observações em uma camada de argila exposta ao ressecamento por 35 dias, com uma taxa de evaporação de 0,18mm/hora e um teor de umidade gravimétrico inicial de 103%. Eles relataram o surgimento de trincas sub-horizontais à profundidade de 6 a 8 cm, que seria devido à deformações diferenciais induzidas pela contração diferenciada dos polígonos de solo já formados.

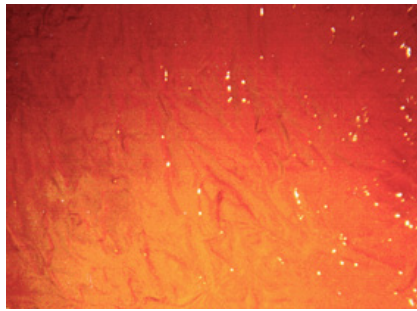
### 8.7.2

#### **Comentários Gerais Sobre o Comportamento Observado**

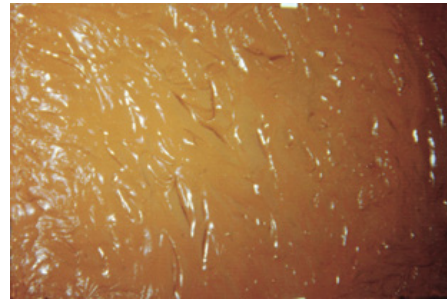
As Figuras 8.50 e 8.51 mostram duas seqüências de secagem da lama vermelha OP neutralizada e a lama cáustica em recipientes menores. Pode ser verificado que o padrão de trincamento foi bem diferente e muito mais intenso do que o apresentado pêlos lisímetros maiores, com maior volume de solo. Também fica evidenciado que a formação da cristalização na crosta é diferenciada, e isto deve influenciar as taxas de evaporação dos dois resíduos. A lama cáustica apresentou um fraturamento maior que a neutralizada.

A Figura 8.52 mostra os resíduos secando em caixas de tamanhos e formas diversas, com condições de atrito na base também diferenciadas. Algumas dessas caixas tinham, por exemplo, a base lubrificada com óleo de silicone, enquanto outras, não. O que se notou de uma maneira geral foi que nos recipientes onde a relação entre seção transversal e altura era baixa, poucas trincas se formaram, independente da taxa de evaporação. Já quando se tinha grandes seções transversais em relação à altura, ou seja, camadas finas, a densidade das trincas era bem maior, de acordo com as observações de Corte & Higashi (1964). A quantidade de trincas também foi maior para recipientes com base rugosa que os com base lisa ou lubrificados (mesmas condições iniciais do resíduo).

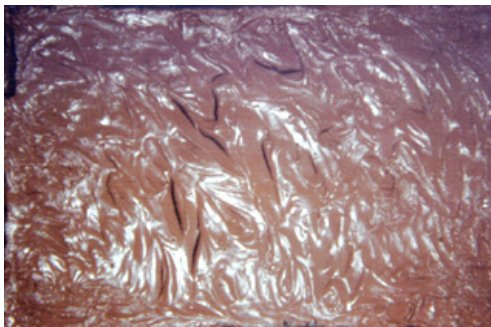




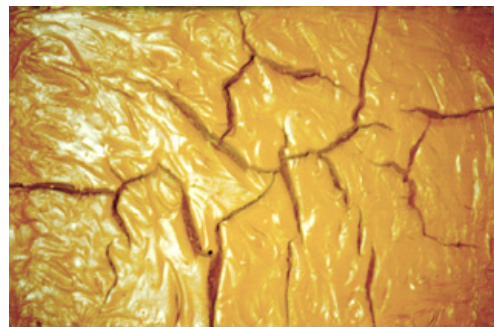
**início**



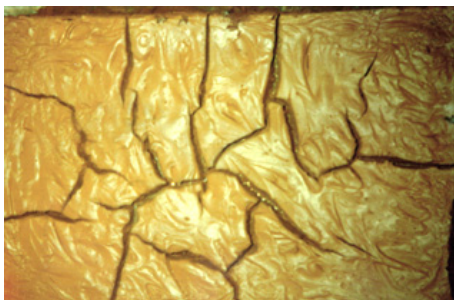
**3 dias**



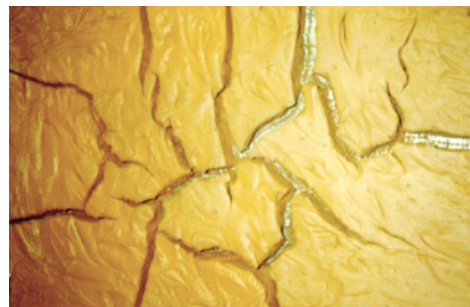
**7 dias**



**12 dias**



**15 dias**



**18 dias**

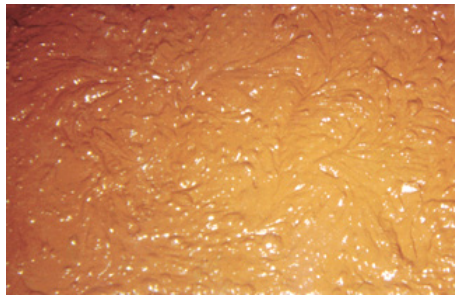


**23 dias**

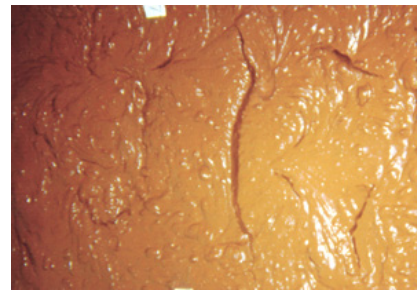


**25 dias**

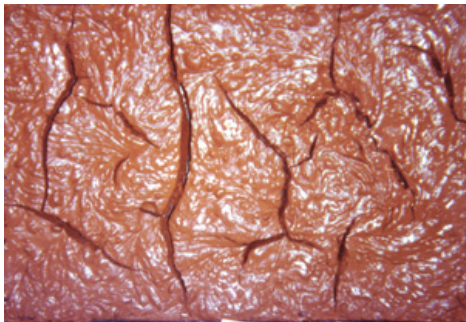
**FIGURA 8.50:** Seqüência de Secagem da Lama Vermelha OP Neutralizada em Lisímetros Menores.



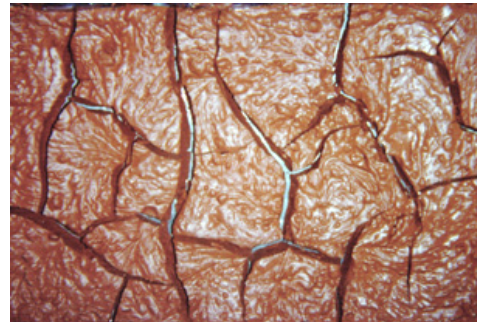
**início**



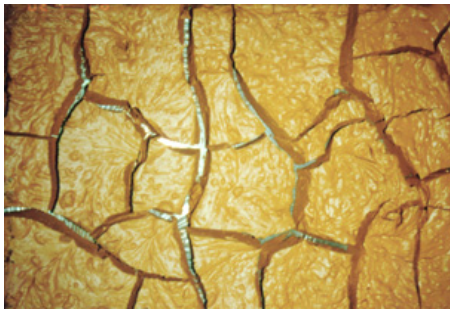
**4 dias**



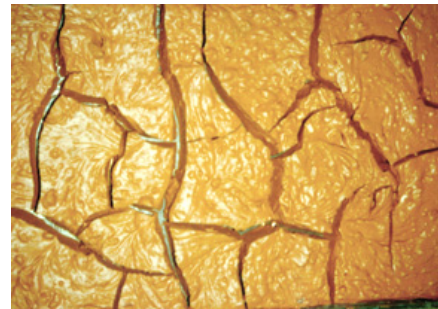
**7 dias**



**12 dias**



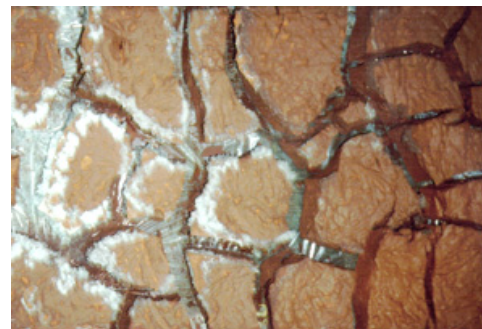
**13 dias**



**15 dias**

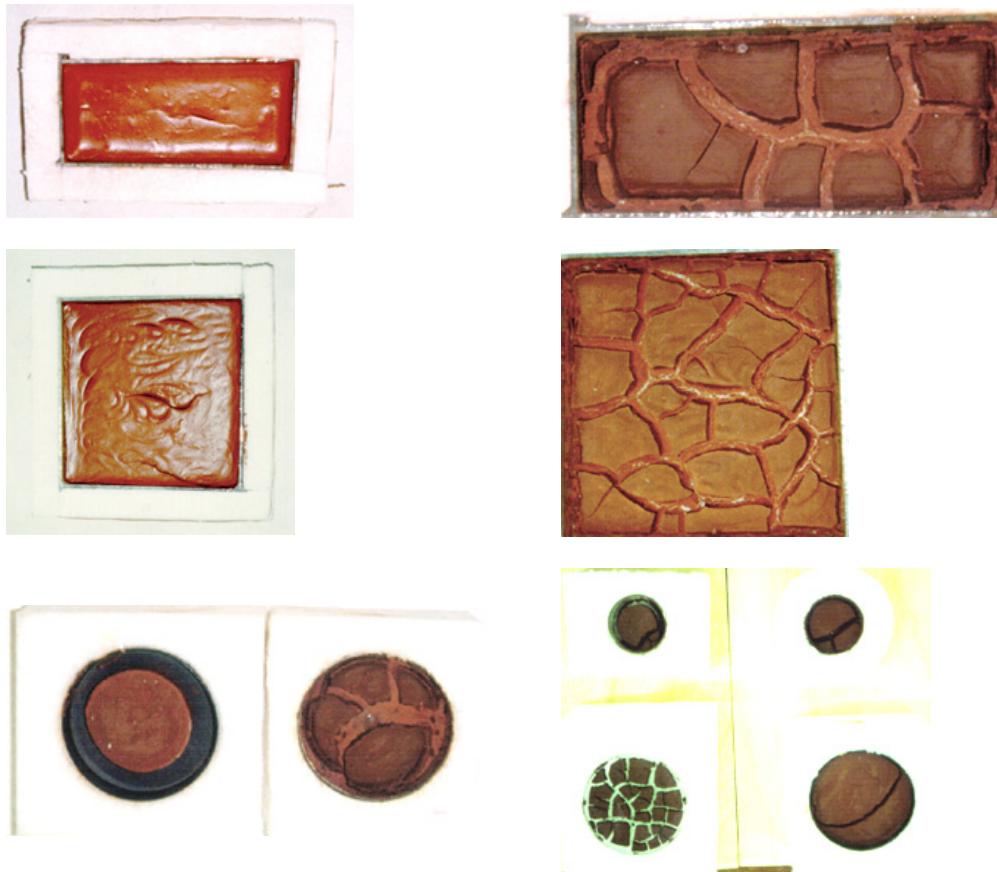


**21 dias**



**23 dias**

**FIGURA 8.51:** Seqüência de Secagem da Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Lisímetros Menores.



**FIGURA 8.52:** Seqüência de Secagem Nos Resíduos em Lisímetros Menores.

Esta dependência da relação entre a área superficial exposta à secagem e a espessura da camada de certa forma já era de conhecimento daqueles que manipulam resíduos, uma vez que é considerado como um dos aspectos de projeto mais importantes para o sucesso com secagem solar o fato de que a camada de lama exposta ao sol seja de pequena profundidade (*Chandler, 1988; Kerr e Colombero, 1992*). Essa relação pode ser pelo fato de que o atrito entre camadas subjacentes impedissem uma maior contração e propagação das fissuras. A formação da crosta superficial seria mais rápida que a abertura de novas fissuras, reduzindo a taxa de evaporação, que se daria agora preferencialmente pelas paredes daquelas já existentes, que então se abririam mais e se aprofundariam, sem que muitas novas trincas se formassem. Newson et al. (1996) mediram taxas de evaporação em fissuras e verificaram que ela cai em torno de 30% a 24cm de profundidade, mesmo havendo umidade suficiente no material para manter uma taxa mais elevada. Isso seria explicado pela consideração de que a evaporação de fissuras de contração é parcialmente dependente do movimento turbulento de ar

no topo da fissura, que diminui com a profundidade da trinca. Por isso, teria-se mais eficiência secando-se camadas mais finas que espessas.

Por esses ensaios, também notou-se que o efeito do teor de umidade inicial é principalmente no recalque total, logicamente muito maior nas amostras mais úmidas. Outro efeito é que, amostras com teores de umidade inicial menores iniciaram o processo de trincamento mais cedo, com a formação de crosta mais resistente e maior eficiência da secagem nas camadas subjacentes.

Ao desmontar alguns ensaios, foi percebida a formação de fissuras internas e também em torno de grãos maiores presentes na matriz. Notou-se muitos vazios devido a bolhas de ar, alguns preenchidos com cristalização do fluido. Nos ensaios maiores, notou-se ainda, trincas mais largas na parte de baixo que na de cima, como a da Figura 8.53, em função da contração lateral diferenciada, que deve gerar forças de atrito entre camadas que podem influenciar o padrão de fissuramento e até mesmo favorecer o surgimento de trincas horizontais, como observado por Konrad & Ayad (1997a). Na Figura 8.54 pode-se notar a influência do atrito das quinas da caixa na amostra e uma trinca horizontal, formada talvez em consequência dos gradientes térmicos ou do efeito do atrito entre camadas devido à contração diferenciada da camada. Isto se repetiu em outros ensaios. Nesta figura, também se percebe a crosta superficial soltando-se da amostra.

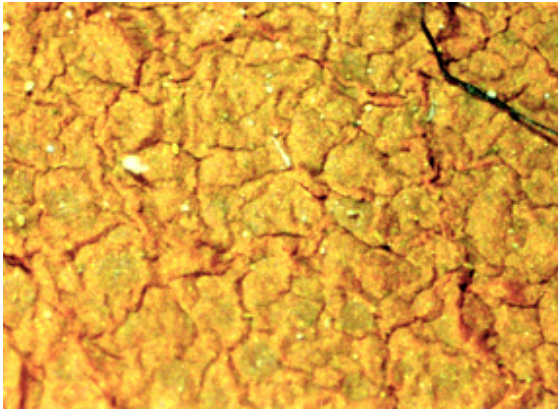


**FIGURA 8.53:** Trinca Com Maior Abertura na Base – Contração Lateral Diferenciada.



**FIGURA 8.54:** Trinca Formada Horizontalmente na LV04.

Ao examinar a superfície de algumas amostras, foi observado uma malha de micro-fissuras e elevações na sua superfície, registrada na Figura 8.55, ampliada 40 vezes. Muitas destas micro fissuras não estavam abertas ou pareciam preenchidas e esse padrão não foi notado em todas as ocasiões. Foi também verificado com frequência da crosta ressecada destas amostras menores ser bastante lisa, com aparência de serem impermeáveis. A Figura 8.56 mostra a superfície de um reservatório desativado, exposto ao ressecamento por alguns meses, e é interessante notar a semelhança com Figura 8.55, sugerindo que o padrão em micro escala se repetiria em macro escala.



**FIGURA 8.55:** Superfície Seca de Amostra Cilíndrica Ampliada 40 Vezes



**FIGURA 8.56:** Superfície de Um Lago Desativado Exposto a Ressecamento

## 8.8

### Conclusões

Foi verificado que, com o uso de uma metodologia simples, os parâmetros sobre o ressecamento de resíduos obtidos via ensaios em laboratório fornecem respostas animadoras quando usados em um modelo numérico. Através destes testes, percebeu-se que a técnica de “dry-stacking” é viável de ser aplicada em lamas vermelhas, o resíduo do processamento da bauxita para obtenção da alumina. Mesmo tendo sido ensaiada em um teor de umidade inicial muito elevado, contrário do que se recomenda na prática, o material apresentou uma

taxa de secagem elevada, reduzindo seu teor de umidade em quase 50% em apenas 20 dias. Ao final de 2 meses, o resíduo já apresentava níveis de sucção matricial em torno de 300kPa entre cinco e dez centímetros de profundidade, com resistência à tração próxima a 50kPa. Estes valores conferem à camada, resistência satisfatória para realização de algumas obras sobre a superfície, permitindo adiantar os trabalhos de reabilitação da área.

O fissuramento ocorrido também foi considerado satisfatório para facilitar a drenagem das camadas que seriam lançadas posteriormente. As fissuras atingiram, em média, ao longo do período de ensaio, de 4 a 6cm de largura, com mais de 35cm de profundidade.

Através destes ensaios, também foi verificado que a densidade de trincas é dependente da espessura da amostra. Aquelas menos espessas apresentaram maior densidade de trincas que as de camadas mais grossas, independente do teor de umidade inicial, forma do recipiente e taxa de evaporação. Notou-se também que o fissuramento se iniciava mais rapidamente nas amostras depositadas em um maior teor de sólidos inicial (menor teor de umidade). A contração vertical total da camada foi de quase 30% nos ensaios com a lama vermelha OP não neutralizada, lançada com 54% de teor de sólidos, e quase 50% na lama vermelha OP neutralizada, lançada com 34% de teor de sólidos. Este valor dá uma idéia do ganho em capacidade de estocagem de uma área de disposição quando se utiliza a técnica de “dry stacking”, se comparada com a técnica de lançamento sob a forma de lama.