

FIGURA 7.27: Teor de Sólidos com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.

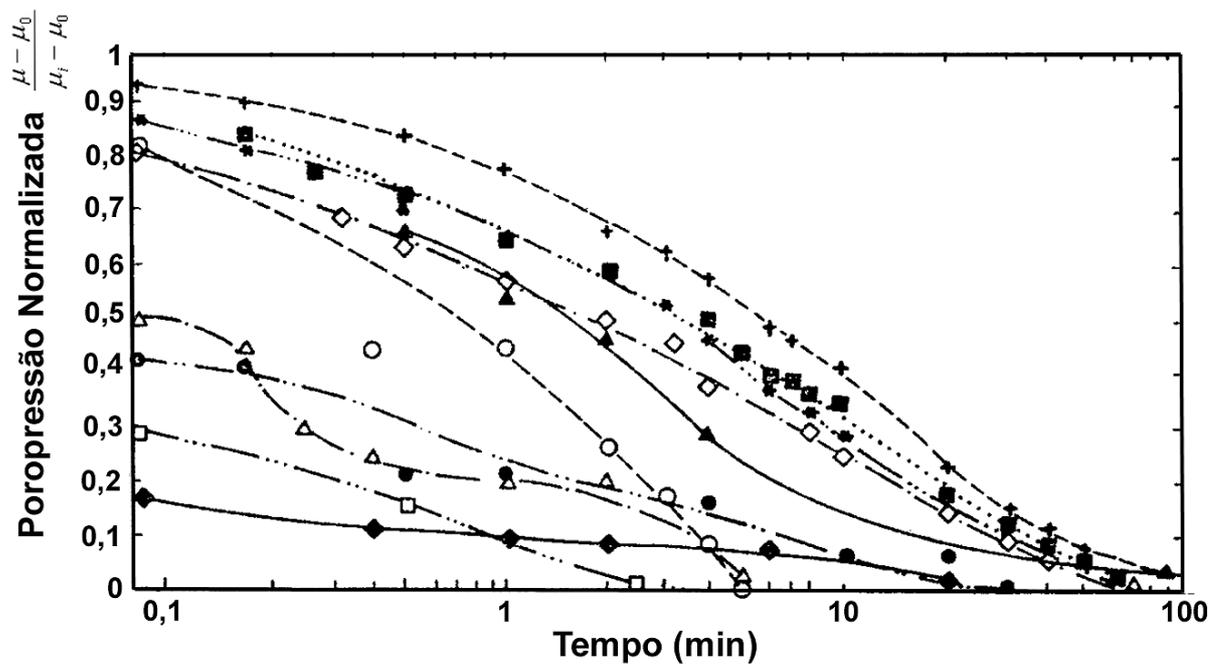
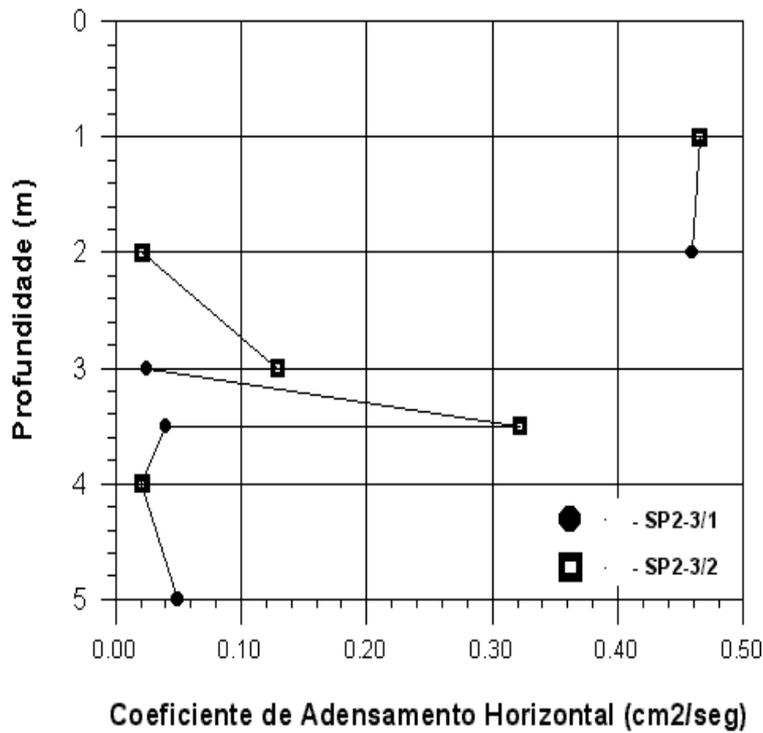
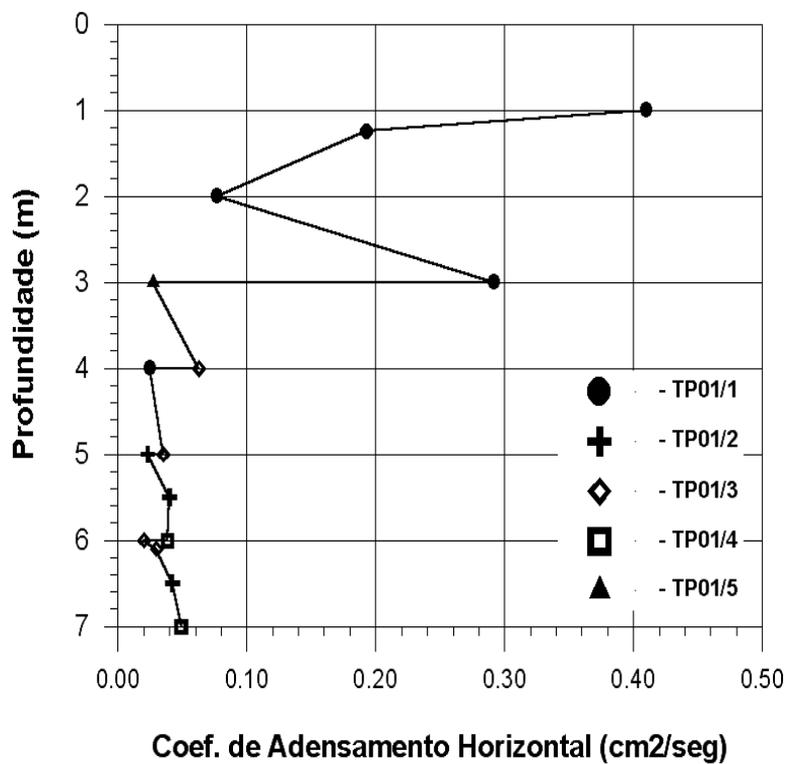


FIGURA 7.28: Curvas de Dissipação de Poropressões de Uma Estação da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.



**FIGURA 7.29:** Coeficiente de Adensamento com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago SP2-3



**FIGURA 7.30:** Coeficiente de Adensamento com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01

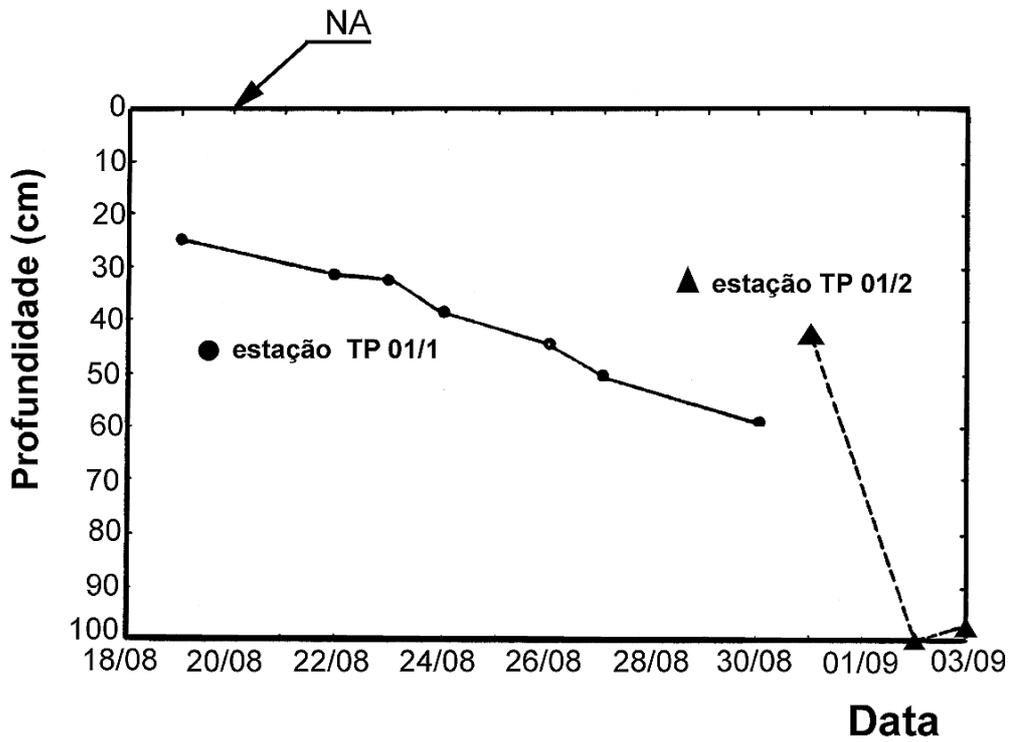


FIGURA 7.31: Resultados de Batimetria na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01 – Variação do Topo da Camada de Lama No Reservatório.

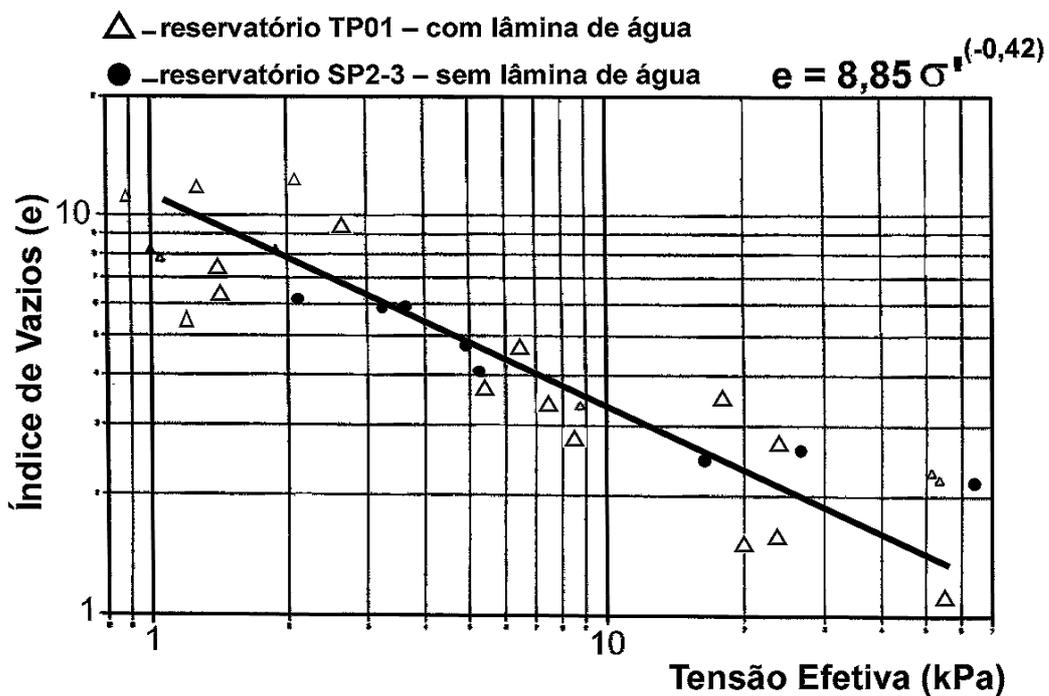


FIGURA 7.32: Estimativa da Curva Final de Compressibilidade de Campo - LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.

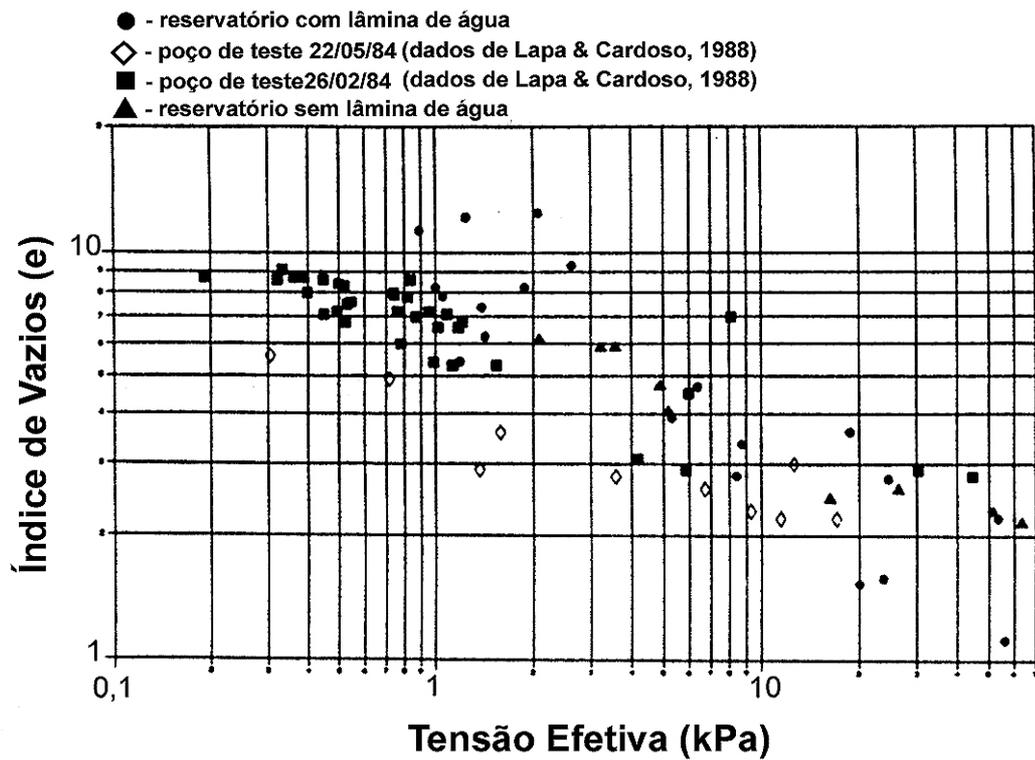


FIGURA 7.33: Comparação entre Curvas de Compressibilidade de Campo Obtidas por Diferentes Equipes na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.

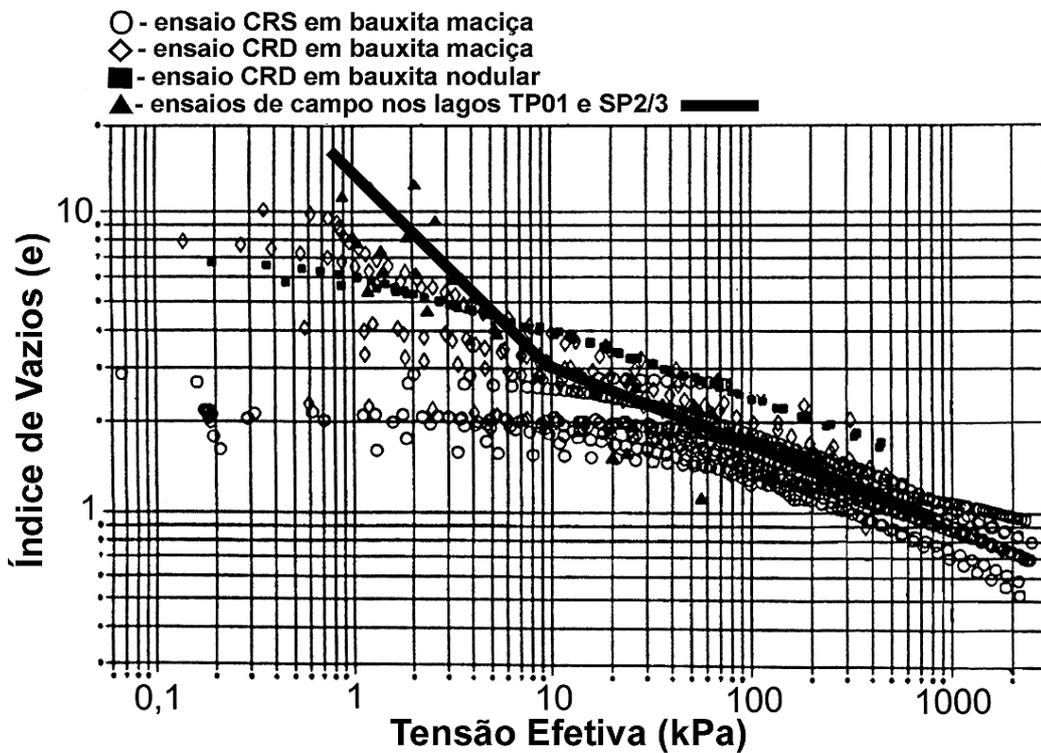
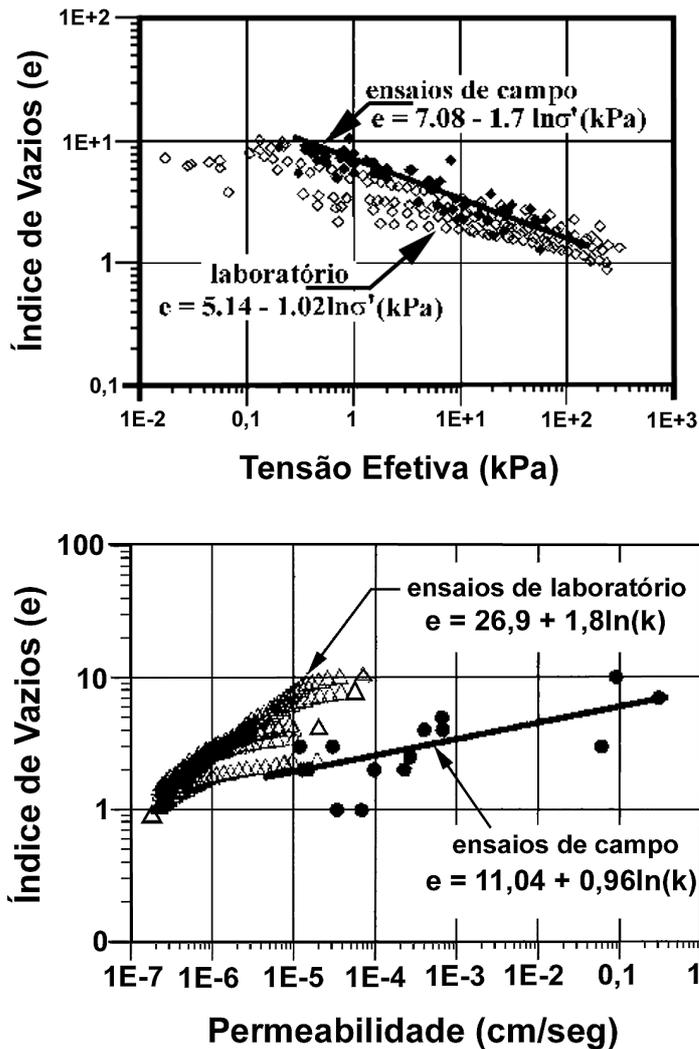


FIGURA 7.34(a): Curva de Compressibilidade de Campo Comparada com Ensaio de Laboratório CRD/CRS da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.



**FIGURA 7.34(b):** Curva de Compressibilidade Permeabilidade de Campo Comparada com Ensaio de Laboratório CRD da Lama de Lavagem de Bauxita (Villar et al., 1998).

#### 7.4.2

##### Lama Vermelha SL

A lama vermelha SL é o resultado do beneficiamento da lama de lavagem de bauxita aqui analisada. No local de disposição deste resíduo foram realizados ensaios em um reservatório já seco e desativado. O objetivo básico das investigações neste reservatório foi verificar as condições do local para implementação de suas obras de reabilitação, que consistiam na construção de um aterro sobre os resíduo e seu reflorestamento. Todos os detalhes estão descritos em Rodrigues & Costa Filho (1995). Piezômetros hidráulicos foram instalados para auxílio na determinação da permeabilidade. O resíduo era muito fino, tendo

em torno de 90% passando na #200. Os valores médios de limite de liquidez e índice de plasticidade foram de 41 e 11, respectivamente, com uma densidade relativa dos grãos variando de 3.0 a 3.7. Este caso também está descrito em Villar et al. (1998).

No lago desativado, foi executada uma sondagem à percussão, e o perfil obtido está na Figura 7.35. Os ensaios foram realizados nove meses após o esgotamento de sua capacidade de armazenamento. Neste local, foram executados três perfis de amostragem e perfis de poropressão com a sonda piezométrica. Também foram instalados piezômetros de tubo aberto. Na Figura 7.36 (a) estão os valores de poro pressão registrados pela sonda e pelos piezômetros e o teor de umidade obtido das amostras. Nota-se que há uma boa concordância entre os registros de poro pressão medidos pelos dois instrumentos. Os valores foram baixos, tendo sido detectado o nível do licor somente a 4.5m de profundidade. Os resultados indicam, ainda, a eficiência do sistema de drenagem da base. O material da parte superior se apresentava ressecado, com trincas que atingiam até 2.5m de profundidade e 10cm de abertura. Mesmo assim, por meio da amostragem, verificou-se que toda a camada de resíduo estava saturada.

Os valores obtidos de outros índices físicos estão nas Figuras 7.36 (b) e 7.37(a). Pode ser observada a grande variação nos 4 metros iniciais, principalmente devido à variação da densidade dos grãos. O índice de vazios variou entre 1.7 e 2.1, e como a faixa de tensões efetivas foi só de 50 a 260kPa, muito estreita, dificultou a obtenção de uma lei de compressibilidade. Os pesos específicos ficaram entre 16,5 e 18kN/m<sup>3</sup>. Foram encontradas finas camadas de areia através de todo o perfil de medição e amostragem, apesar do ponto de lançamento de resíduos mais próximo, quando ativo, estar uns 100m de distância. Era de se esperar que este material mais grosso se depositasse mais próximo aos pontos de lançamento, não atingindo distâncias tão grandes. Os testes de permeabilidade com os piezômetros e a sonda indicaram valores de coeficiente de permeabilidade da ordem de 10<sup>-5</sup>cm/seg, e de coeficiente de adensamento, de 5 x 10<sup>-2</sup>cm<sup>2</sup>/seg.. O perfil de coeficiente de adensamento está na Figura 7.37(b). Os valores de permeabilidade de campo, via piezômetros foram da ordem de 8 x 10<sup>-6</sup> cm/seg. abaixo do NA.

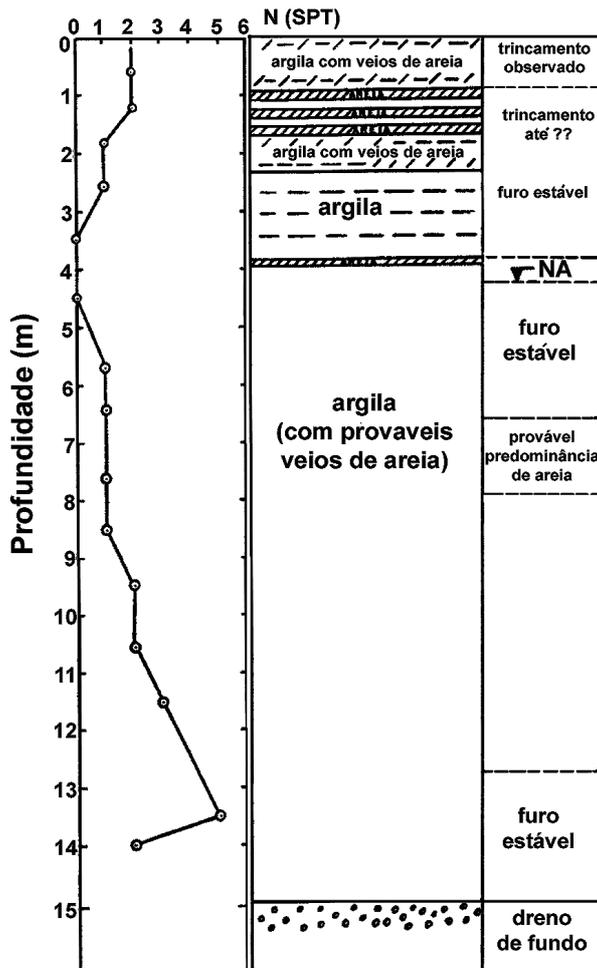


FIGURA 7.35: Perfil de Sondagem em Lago Desativado e Ressecado da LAMA VERMELHA SL.

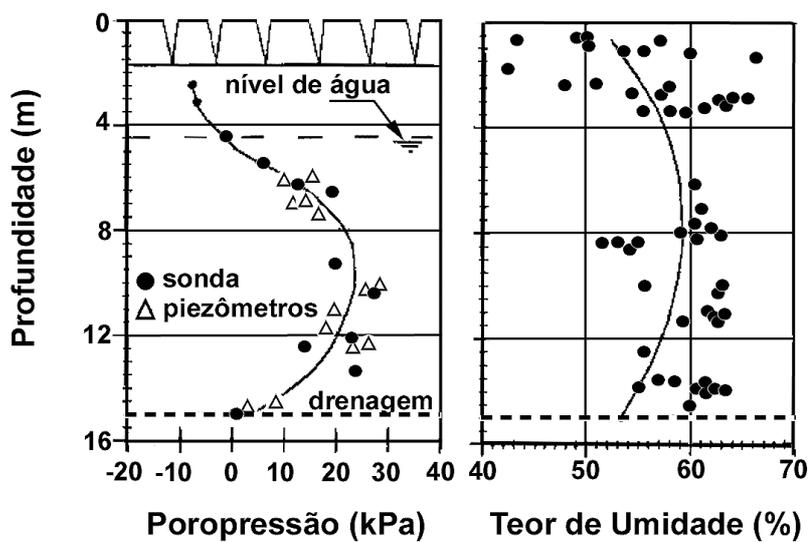


FIGURA 7.36 (a): Perfil de Densidade dos Grãos do Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

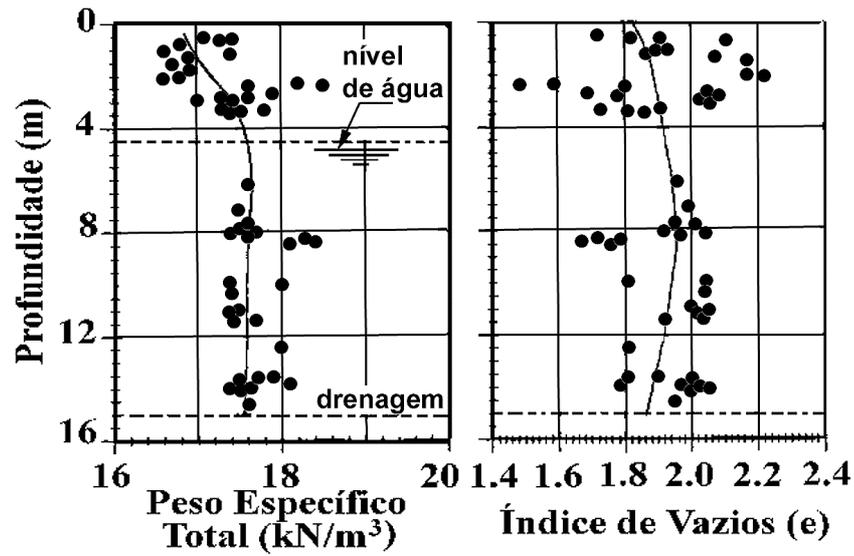


FIGURA 7.36 (b): Perfil Médio de Índice de Vazios e Densidades do Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

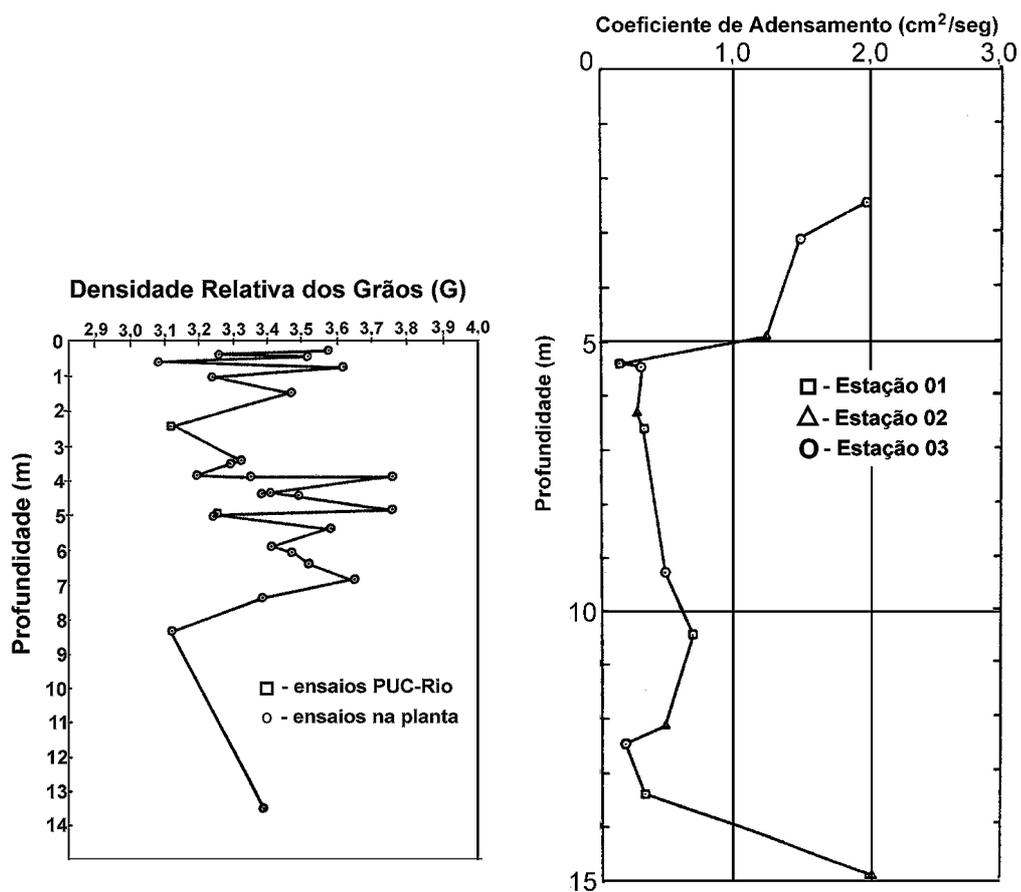
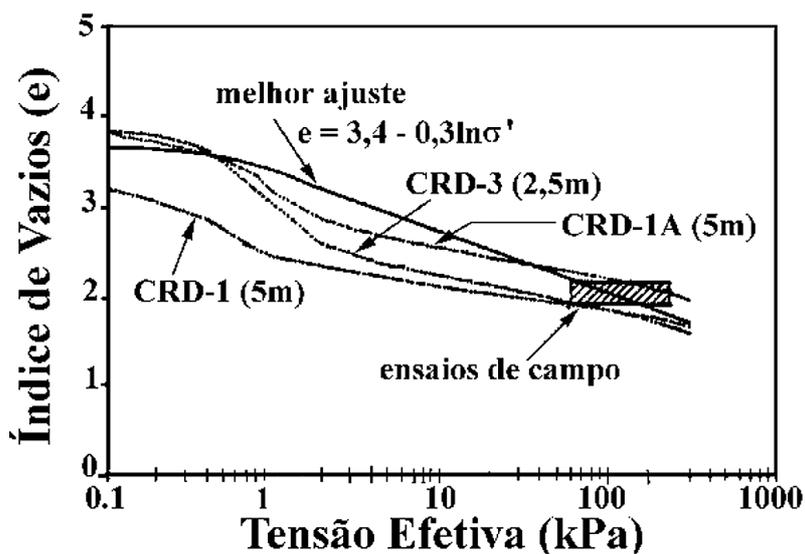


FIGURA 7.37: (a) Densidade dos Grãos e (b) Coeficiente de Adensamento Horizontal Interpretado da Sonda Piezométrica - Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

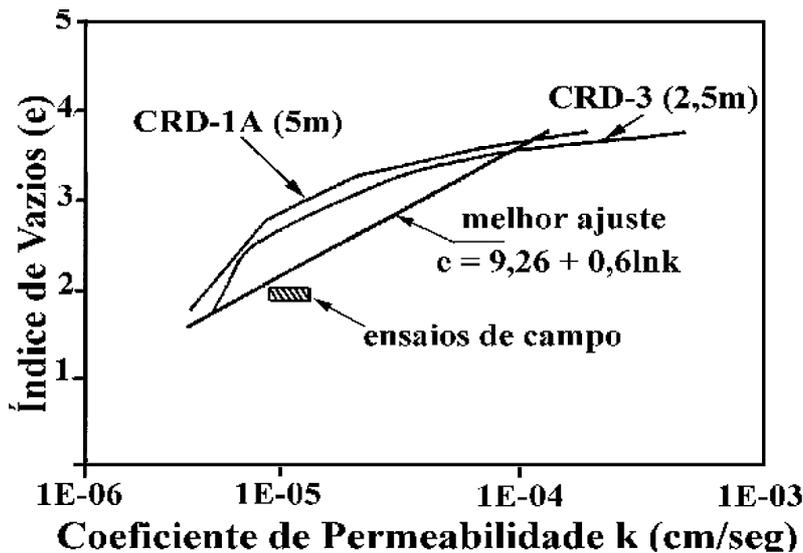
A comparação entre os resultados dos ensaios de campo e laboratório está na Figura 7.38 e 7.39. Com relação à compressibilidade, mesmo não se tendo determinado uma curva de campo, nota-se que os valores estão dentro dos medidos em laboratório. Já com relação à permeabilidade, nota-se que os valores de campo são ligeiramente superiores, podendo ser uma influência das lentes de areia das quais já se comentou. Estas figuras também mostram as curvas de melhor ajuste dos dados tanto de campo como laboratório. Tendo-as como ponto de partida, foi feita uma retroanálise por diferenças finitas do enchimento do lago, com as curvas medidas e teóricas apresentando excelente concordância, o mesmo ocorrendo com os valores previstos e medidos de recalque do aterro construído sobre os resíduos (Rodrigues & Costa Filho, 1995).



**FIGURA 7.38:** Comparação Entre Resultados de Ensaio de Campo e Laboratório em Amostras do Lago Ressecado da LAMA VERMELHA SL: Curva de Compressibilidade. (Villar et al., 1998)

Nos lagos ativos do mesmo material, foram feitas duas campanhas, antes e depois da abertura do sistema de drenagem de fundo, e a campanha de campo tinha o objetivo de checar a eficiência desta drenagem. A Figura 7.40 mostra os valores dos índices físicos, e a Figura 7.41, o perfil de poro pressões obtidos em um dos três pontos de medição no lago. A ligeira caída de poro pressão durante a

primeira medição é acreditada de ser devido a comunicação da base do lago com o fluido sobrenadante através da camada superficial de proteção dos taludes laterais. Pelos resultados da segunda medição, fica também evidente o bom funcionamento do sistema de drenagem. Os maiores valores de peso específico da segunda medição em relação à primeira e os menores índices de vazios também comprovam o processo de adensamento em andamento.



**FIGURA 7.39:** Comparação Entre Resultados de Ensaios de Campo e Laboratório em Amostras do Lago Ressecado da LAMA VERMELHA SL: Curva de Permeabilidade (Villar et al., 1998)

A comparação entre as curvas de compressibilidade estão na Figura 7.42. A de campo é ligeiramente maior que a de laboratório e esta diferença já foi notada antes entre diferentes tipos de solos. Leroueil et al. (1988), por exemplo, afirmam que isto é devido ao fato das taxas de deformação do ensaio tipo CRD, o utilizado, serem em geral maiores que as condições de campo.

As leis de permeabilidade de campo e laboratório foram:

$$\text{Campo: } e = 5.77 + 0.27 \ln k \quad (k \text{ em cm/seg}) \quad (7.2)$$

$$\text{Lab: } e = 10.5 + 0.71 \ln k \quad (k \text{ em cm/seg}) \quad (7.3)$$

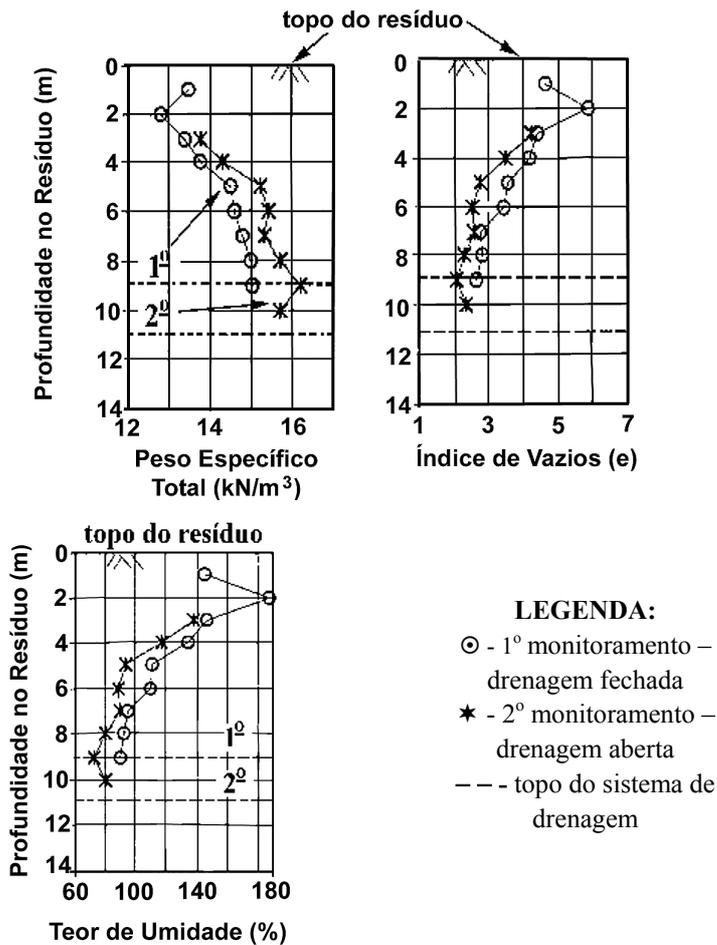


FIGURA 7.40: Índices Físicos Medidos em Reservatórios Ativos da Lama Vermelha SL. (Villar et al., 1998)

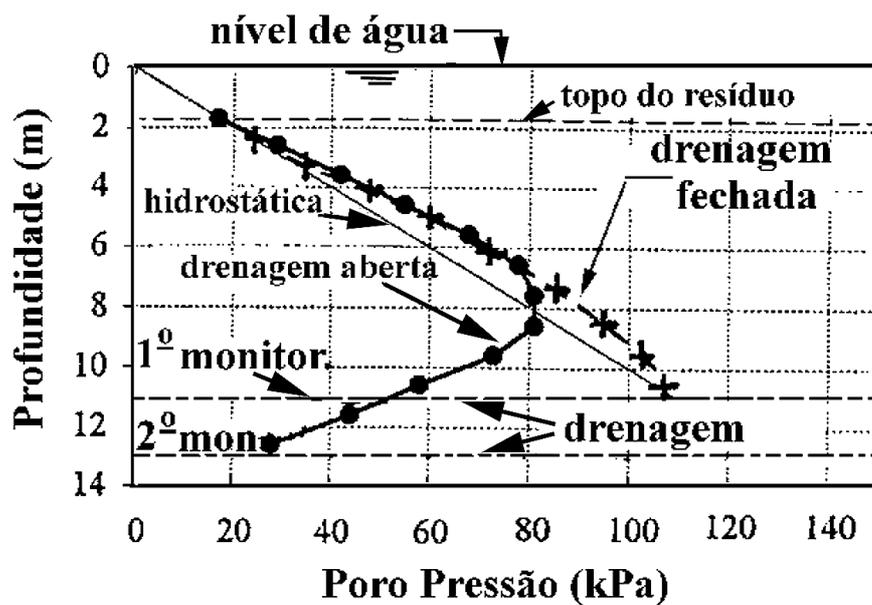
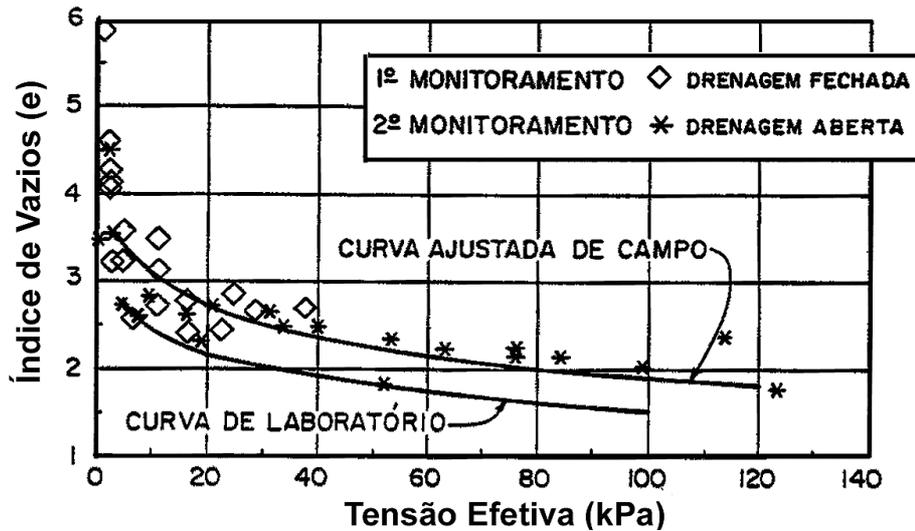


FIGURA 7.41: Perfil de Poro-Pressões Medidas em Reservatório da Lama Vermelha SL Antes e Após Abertura de Drenagem de Fundo. (Villar et al., 1998)



**FIGURA 7.42:** Comparação de Medições de Campo e Ensaios de Laboratório em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA SL) (Villar et al., 1998)

A diferença entre as leis de permeabilidade foram mais expressivas e isto pode tanto ser creditado às elevadas taxas de deformação do ensaio ou à presença de lentes de material mais grosso no campo e que não estão presentes nas amostras de laboratório. A permeabilidade de laboratório foi calculada pelo método proposto por Martinez et al. (1987). Eles admitem que a velocidade dos sólidos durante o teste, usada na fórmula de Darcy-Gersevanov, seria igual à do deslocamento do pistão do equipamento. De acordo com Barbosa et al. 1996, os resultados fornecidos por este método simplificado são bons em relação ao de compressibilidade, quando comparado com o método proposto por Znidarcic et al. (1986). Porém, no caso da permeabilidade, a boa concordância ocorreria somente nas fases iniciais do ensaio. Os valores do coeficiente de adensamento de campo calculados com o a sonda piezométrica variaram de  $7 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/seg.

Resultados de medições de campo estão nas Figuras 7.43 e 7.44, em uma outra forma de apresentação. Pela Figura 7.44, há indicações de haver uma mudança na lei de compressibilidade em função do nível tensões efetivas. A Figura 7.45 compara as relações de compressibilidade medida para a lama vermelha SL e a lama de lavagem de bauxita, apenas para feito de se ter uma noção superficial da transformação sofrida pelo material devido aos processos diferenciados por que passam. Parece que um dos efeitos do beneficiamento é reduzir a compressibilidade do resíduo, o que até era de se esperar, já que a rocha

é ainda mais triturada antes de ser processada, ou seja, este resíduo possui uma granulometria mais fina. Porém, quase todos os argilo-minerais também são destruídos ao longo do processo.

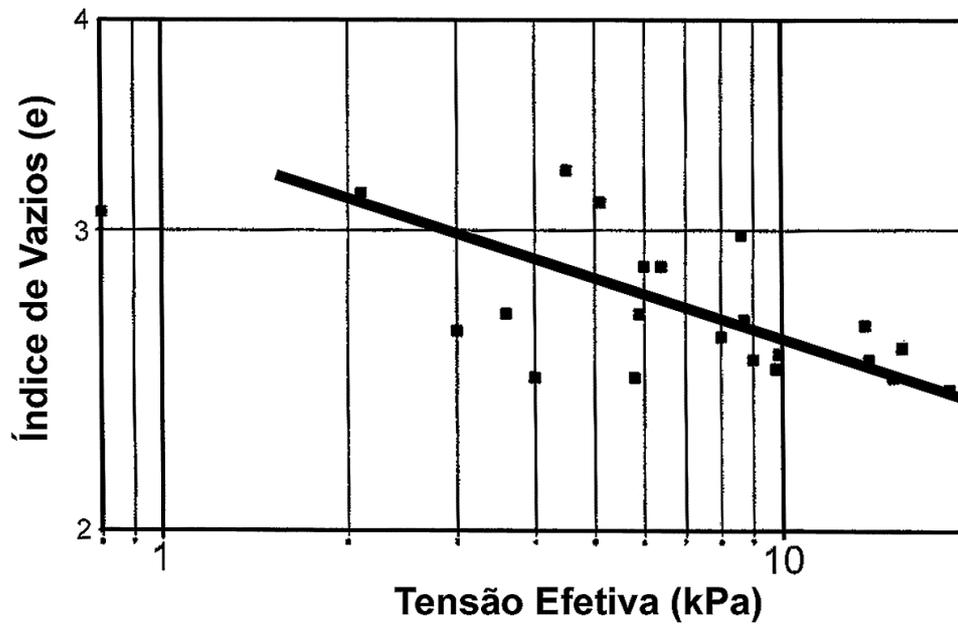


FIGURA 7.43: Medições de Campo em um Reservatório Ativo da Lama Vermelha SL.

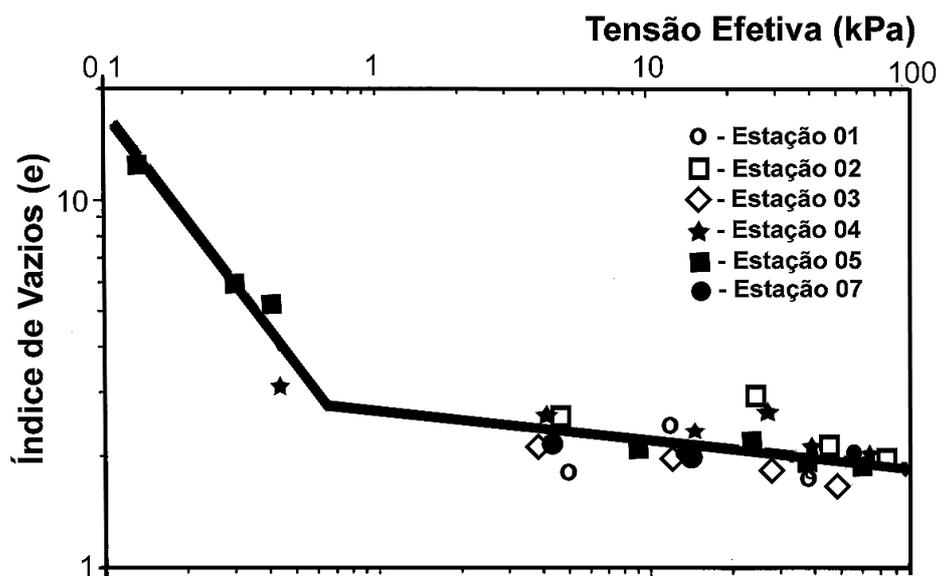
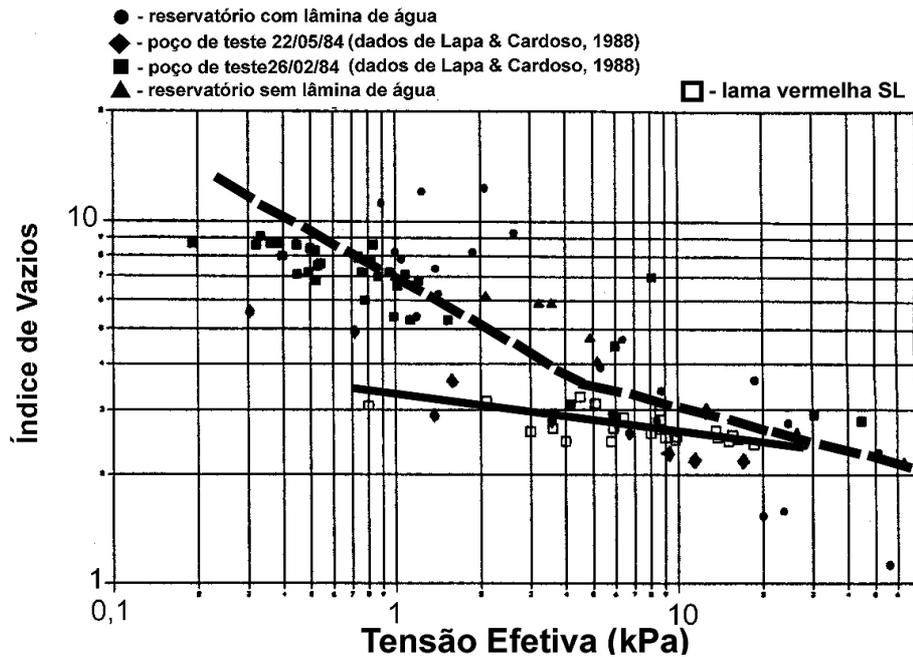


FIGURA 7.44: Compressibilidade de Campo de Reservatório Ativo da Lama Vermelha SL.



**FIGURA 7.45:** Comparação de Medições de Campo em Rejeitos de Lavagem e Processamento de Bauxita (Lama De Lavagem De Bauxita E Lama Vermelha SL )

### 7.4.3

#### Lama Vermelha PC.

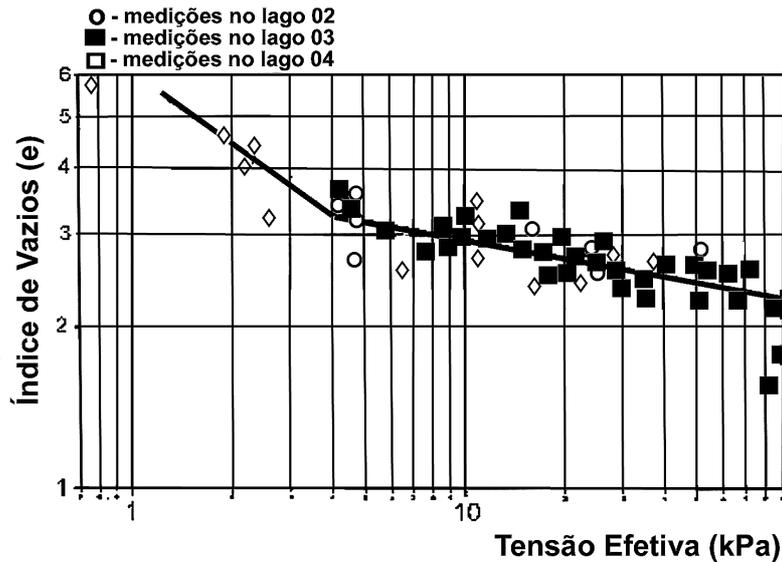
Neste resíduo foram executados medições em quatro diferentes reservatórios. A Figura 7.46 resume os valores medidos em três. A Figura 7.47 traz os resultados da lama vermelha SL e a lama vermelha PC, as diferenças devendo ser creditadas ao fato de serem originadas de jazidas diferentes. Provavelmente, as curvas ficarão mais semelhantes com o aumento da tensão efetiva na lama SL.

### 7.4.4

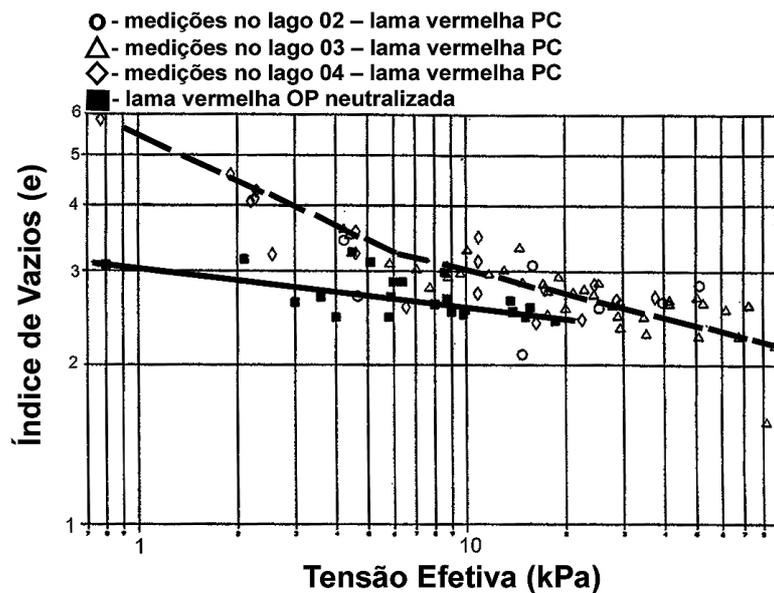
#### Lama Vermelha OP Neutralizada.

A Figura 7.48 mostra resultados medidos na lama vermelha OP neutralizada, com um intervalo de aproximadamente 20 dias entre aos testes (Villar, 1990). O índice de compressão encontrado foi de quase não mudando e com um valor de 3.13. Santos (2000) também executou ensaios de campo neste

mesmo reservatório, em dois locais distintos, conseguindo atingir maiores profundidades. Os resultados obtidos por ela estão nas Figuras 7.49 e 7.50, comparados com os valores obtidos por Villar (1990). A permeabilidade foi calculada à partir do valor de coeficiente de adensamento horizontal proposto pelo método de Baligh & Levadoux (1986).

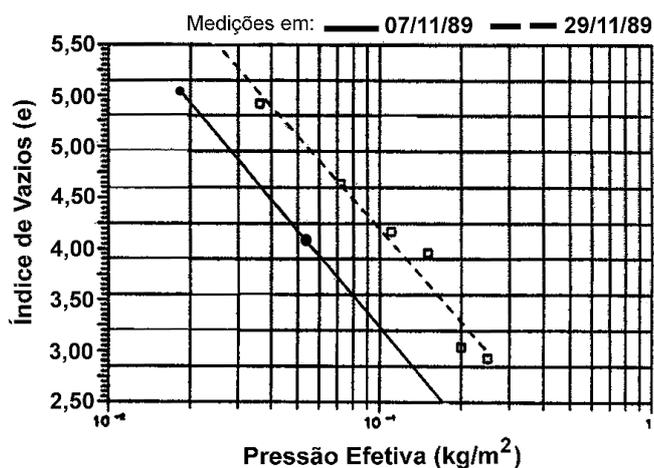


**FIGURA 7.46:** Medições de Campo em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA PC)

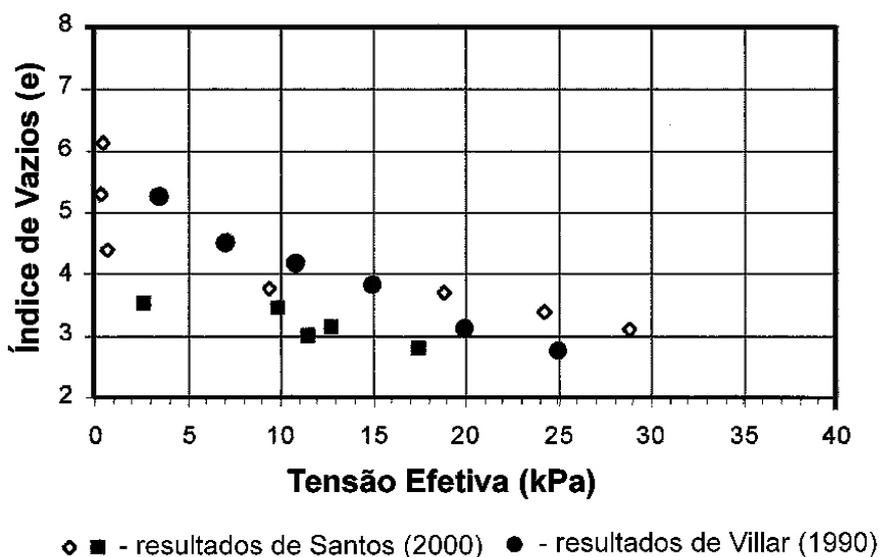


**FIGURA 7.47:** Comparação de Medições de Campo em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA SL e LAMA VERMELHA PC)

As Figuras 7.51 e 7.52 fazem uma comparação entre os resultados obtidos em laboratório por Santos (2000), Botelho (2001) e Alves (1992). Pode ser visto que a concordância é muito boa, especialmente para os valores de compressibilidade. Os de permeabilidade ficaram um tanto dispersos, mas mesmo assim, os valores calculados à partir dos ensaios de campo se encaixaram razoavelmente bem.



**FIGURA 7.48:** Medições de Campo em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA) - (Villar, 1990).



**FIGURA 7.49:** Comparação entre Curvas de Compressibilidade Obtida de Medições em Campo na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA por Santos, (2000) e Villar (1990).

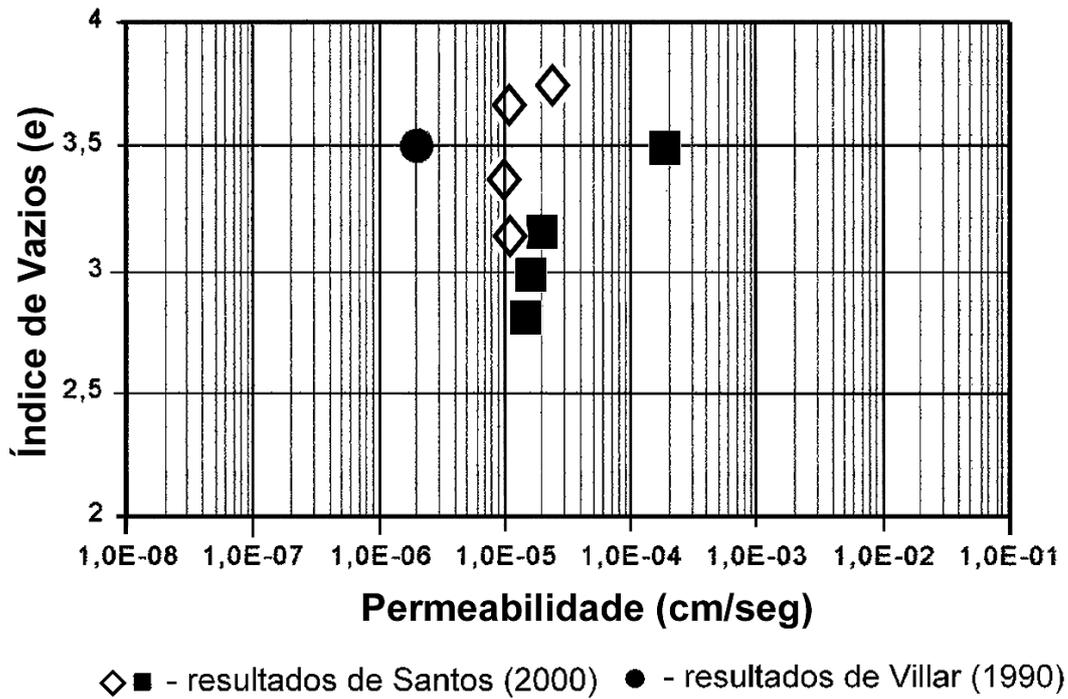


FIGURA 7.50: Valores de Permeabilidade de Medições em Campo na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA (Santos, 2000).

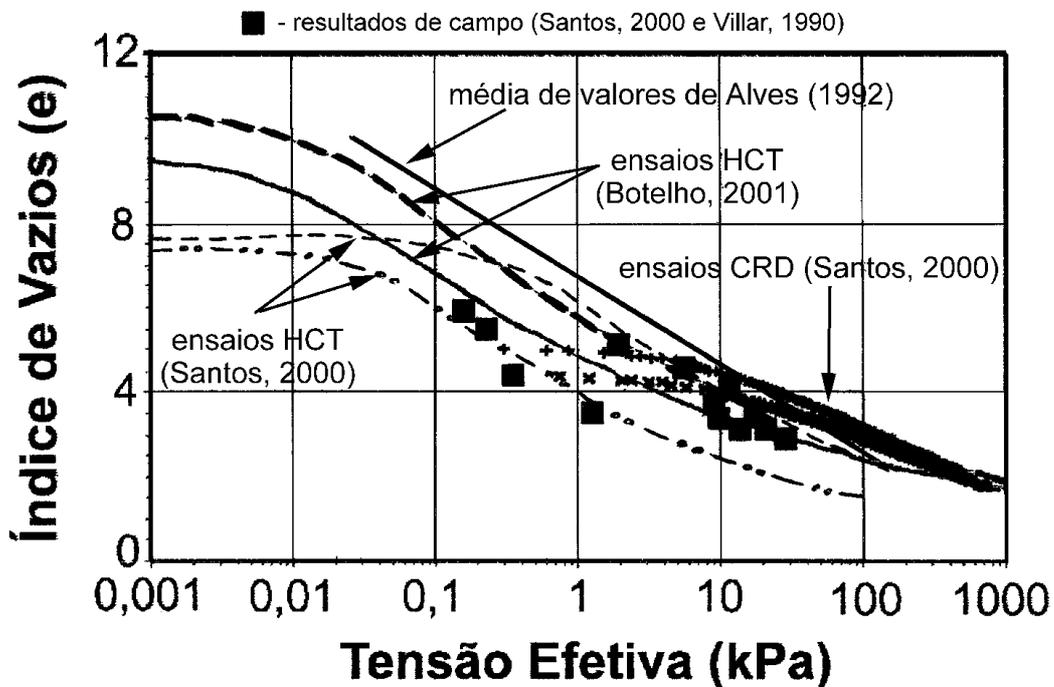
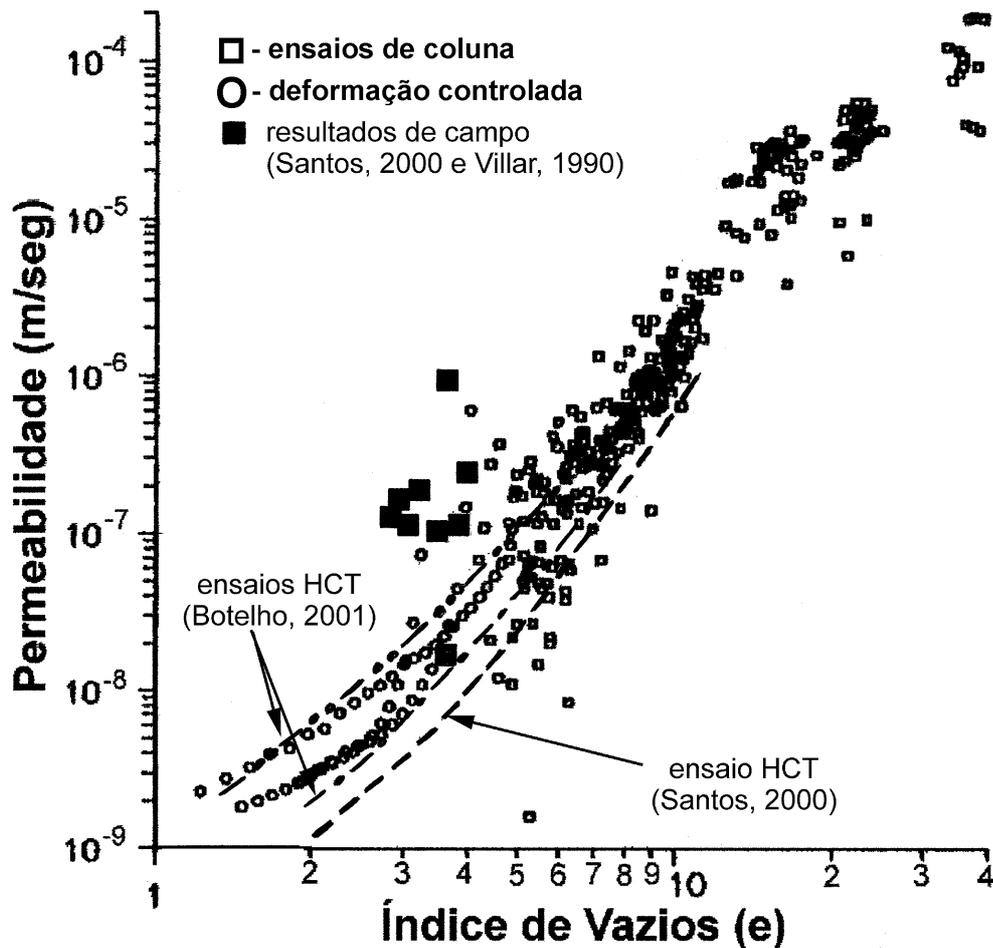
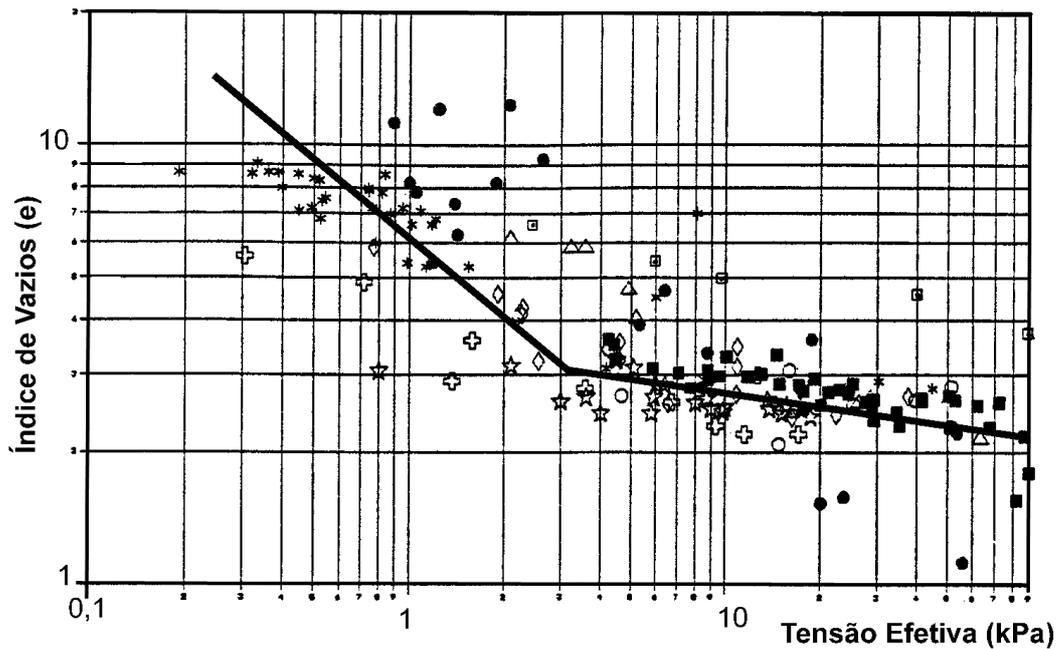


FIGURA 7.51: Comparação entre Medições em Campo e Ensaios de Laboratório na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA – Curva de Compressibilidade.



**FIGURA 7.52:** Comparação entre Medições em Campo e Ensaios de Laboratório na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA – Curva de Permeabilidade.

A Figura 7.53 apresenta resultados de medições de campo em vários resíduos, tanto de lavagem como de processamento, para efeito de definição de uma faixa de variação dos valores encontrados para a compressibilidade de campo. Foi feita uma interpretação dos resultados, obtendo-se uma lei de compressibilidade “média”, que pode servir como uma primeira aproximação para efeito de anteprojeto de um lago de disposição destes rejeitos. Foi assumido a mudança de comportamento em função do nível de contato entre os grãos, demarcando quando a lama passaria a ter um padrão mais próximo de um solo em um índice de vazios em torno de 3. Muitos dos ensaios também apresentaram este ponto de inflexão ocorrendo para um nível de tensão efetiva em torno de 10kPa, valor que também pode ser usado como referência.



**FIGURA 7.53:** Relação Índice de Vazios Contra a Tensão Efetiva de Campo Para Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita

## 7.5

### Conclusões

A metodologia empregada para realização de ensaios de campo se mostrou simples e eficiente. É um procedimento que poderia se tornar rotineiro no locais de disposição de resíduos, fornecendo parâmetros mais adequados para o acompanhamento do comportamento final do depósito.

Os resultados de determinação das leis de compressibilidade do material obtidos com base nos ensaios de campo foram semelhantes aos do ensaio de adensamento em laboratório do tipo CRD, o que também dá uma indicação da adequabilidade deste último para esta finalidade, já que é mais simples que o ensaio do tipo HCT. O modelo de variação do índice de vazios com a tensão efetiva foi verificado de ser bi-linear em um espaço log. x log. O nível de tensão efetiva de referência para a mudança de comportamento é da ordem de 10kPa, o que representa mais ou menos um índice de vazios em torno de 3 para os resíduos.

Com relação à permeabilidade, o ensaio de campo utilizado mostrou que é capaz de fornecer uma estimativa inicial razoável. Poucas medições foram realizadas em camadas mais firmes, e portanto, esta escassez de dados ainda não permitiu verificar se o modelo de interpretação utilizado, baseado em proposta de Baligh & Levadoux (1986) e Levadoux & Baligh (1986), é adequado. Para a lama com baixo teor de sólidos (< que aproximadamente 40%), porém, já foi verificado que ele não se ajusta.