

## 7

### Ensaio de campo: Determinação da Compressibilidade e Permeabilidade

#### 7.1

##### Introdução

Para a obtenção da compressibilidade "in-situ", foram feitas medições de poropressões por meio de uma sonda piezométrica, com transdutor de pressão e leitura em um sistema de aquisição de dados com resolução de 0.05 kPa (ordem de 5 mm de coluna de água), desenvolvida na PUC-Rio (Villar, 1990). Também foram executadas a extração de amostras neste mesmo horizonte, para medição do teor de umidade e cálculo de índice de vazios e da densidade total. Para a execução dos ensaios, foram instaladas estações experimentais nos lagos, constituídas por balsas ancoradas por meio de poitas. Estes mesmos procedimentos foram descritos em Villar (1990); De Campos et al. (1991); De Campos et al. (1998), Ávila et al. (1995); Ávila & Soares (1995); Gomes (1998); Villar et al. (1998); Gomes & Oliveira Filho (1999), todos em resíduos que foram utilizados ao longo desta pesquisa.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio destes ensaios de campo e faz uma primeira comparação com os resultados obtidos em laboratório. Desta forma, a compressibilidade e permeabilidade dos resíduos ficará melhor estabelecida.

## 7.2

### A Sonda Piezométrica e Sua Metodologia de Uso

A sonda piezométrica usada nos ensaios para esta pesquisa consiste de um corpo cilíndrico, em cuja base se encontra um mini transdutor de pressão, que mede as variações de pressão da água através de pedras porosas cerâmicas finas, de alta permeabilidade, mas com pressão de borbulhamento maior que 1 atm., coladas em uma ponta cônica (ver a Figura 7.1). O ângulo desta ponta é de  $18^\circ$  ao invés do padrão internacional de  $60^\circ$  utilizado em ensaios do tipo CPTU, e foi escolhido com base na análise da propagação das taxas de deformação devido a penetração, realizada por Levadou e Baligh (1986). Neste estudo, eles comparam o desempenho de cones de  $60^\circ$  e  $18^\circ$ , verificando que este último provoca menores deformações ou perturbações ao solo. Conseqüentemente, são geradas menores poropressões de penetração, conduzindo a uma equalização mais rápida, agilizando o ensaio, uma vez que se tem interesse é na poropressão de equilíbrio.

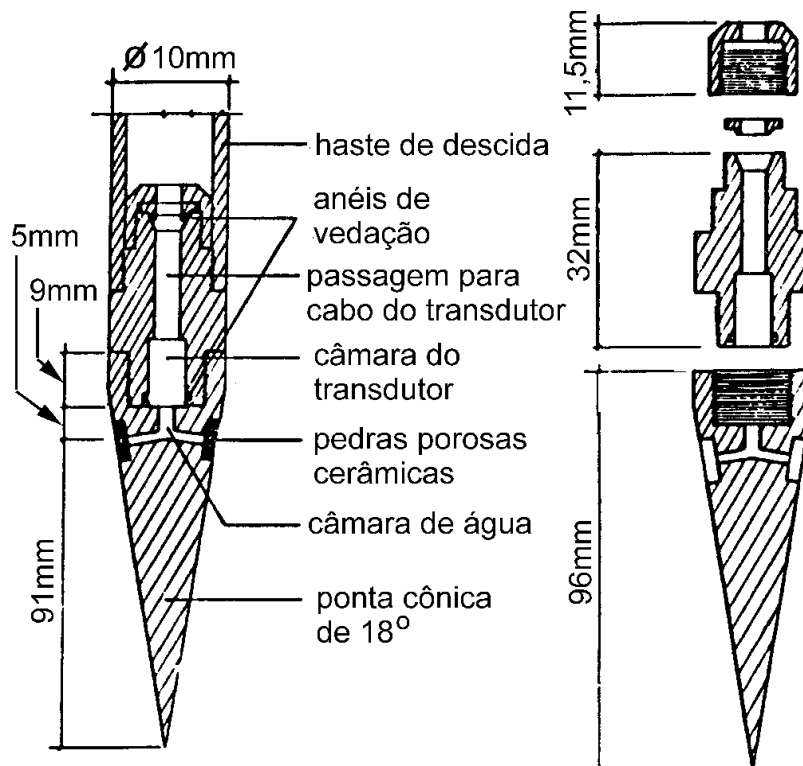


FIGURA 7.1: Esquema da Sonda Piezométrica (Villar, 1990)

Os sinais elétricos do transdutor são lidos com um medidor de "strain gages" e transformados em pressão por meio de uma calibração adequada. Um equipamento tipo *Bundemberg* mais um sistema de colunas de mercúrio foram usados para fazer esta calibração do transdutor. Um sistema de aquisição de dados foi desenvolvido pela PUC-Rio permite o acompanhamento direto do ensaio, via gráficos em tela de computadores portáteis, substituindo o antigo, um aparelho portátil da *Vishay*, que funciona a base de baterias, para a leitura dos sinais elétricos que tinha de ser feita manualmente.

Uma vez determinado os pontos de medição, as balsas eram aí posicionadas, iniciando-se os preparativos para o registro das poropressões. Previamente, a saturação das pedras porosas da ponta da sonda era feita por meio de fervura. Pontas sobressalentes, pré saturadas e mantidas submersas eram preparadas para uma eventual substituição, caso fosse notado alguma resposta inadequada do equipamento, tipo muita flutuação de leitura ou demora de estabilização.

Era feita uma batimetria local, para definição da cota relativa do topo da lama sedimentada, que permitiria uma primeira medição controlada no líquido sobrenadante em pressões hidrostáticas conhecidas, servindo de verificação da calibração da sonda. Para esta batimetria, usava-se uma placa fina de acrílico, perfurada, com aproximadamente 900 cm<sup>2</sup> de área. Uma corda graduada permitia a medição da cota da lama e o nível de água foi adotado como referência de cotas/profundidades.

Amostragem do líquido sobrenadante (água ou soro) foram efetuadas por meio de amostrador tipo caneco, semelhante ao de lama de baixa densidade, que será descrito mais adiante. Um densímetro calibrado em peso específico e um termômetro com precisão de 0.1°C foram utilizados na caracterização deste fluido. Este procedimento era para tentar eliminar os efeitos de temperatura ao se estabelecer o valor de leitura inicial da sonda, já que os mesmos tinham sido constatados em alguns testes. Era assumida uma temperatura constante abaixo do topo da camada de lama.

A descida da sonda era feita através de um alçapão das balsas, sobre o qual se instalava um sistema de travamento para certificar a constância da profundidade atingida. A ponta porosa era mantida submersa em sacos plásticos

cheios de água, até se atingir o NA. Antes, as hastes de descida, feitas de alumínio, e portanto sendo bem leves, eram marcadas de acordo com a profundidade onde seria realizado o ensaio, levando-se em conta o resultado da batimetria. Em geral, eles eram realizados de metro em metro, à partir da interface lama-líquido sobrenadante. O mini transdutor era zerado sem a ponta cônica, à pressão atmosférica.

Durante a descida da sonda, procurou-se manter uma velocidade baixa, já que o interesse era medir a poropressão de equilíbrio, tentando-se, com isso, perturbar o mínimo possível a região ensaiada. Com a cravação interrompida, passava-se a monitorar o excesso de poropressão decorrente e sua dissipação até se atingir um registro estável. A Figura 7.2 mostra um exemplo do tipo de registro fornecido pela sonda. Na Figura 7.3 está explicado como a poropressão de equilíbrio e de penetração são determinadas, à partir de um gráfico de leitura  $\times \sqrt{t}$ . Na realidade, estes gráficos eram montados durante o ensaio, manualmente, e determinavam o seu encerramento, ou seja, quando se atingia uma tendência que permitia determinar a leitura de equilíbrio. Em função da movimentação das balsas, erros de até 1 kPa podem estar associados aos valores obtidos.

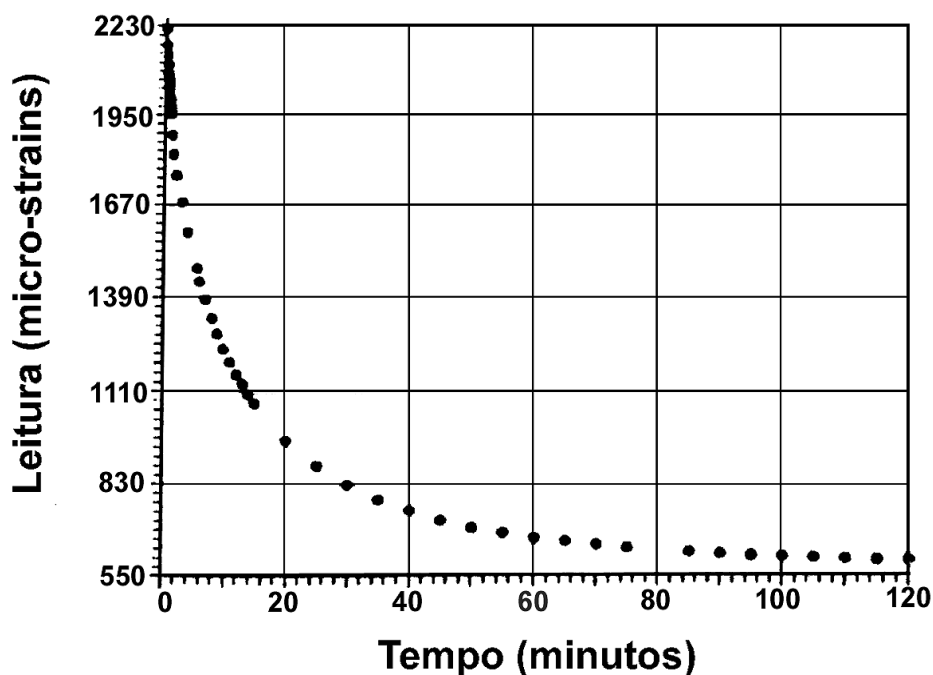
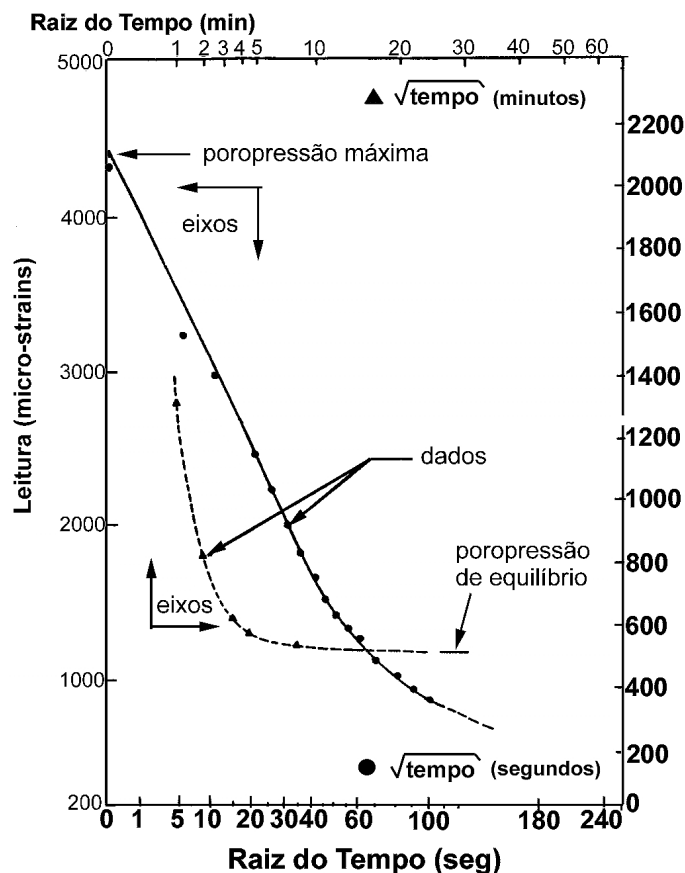


FIGURA 7.2: Registro Típico da Sonda Piezométrica

Em alguns casos, as curvas de dissipação de poropressão foram analisadas na tentativa de calcular os coeficientes de adensamento e permeabilidade de campo, de acordo com o procedimento descrito por Baligh & Levadoux (1986) e explicado em Villar (1990). Neste método, eles sugerem curvas teóricas de fator tempo contra poropressão normalizada, que devem ser usadas como guia para confirmar a validade do método no ensaio, desenvolvidas especialmente para o caso de ponta da sonda com ângulo de  $18^\circ$ . Ou seja, propõem a comparação da curva de dissipação obtida no campo com os resultados teóricos, sendo válido a proposta se elas forem semelhantes. As curvas sugeridas por eles estão na Figura 7.4. Curvas de dissipação típicas obtidas nestes ensaios são mostradas na Figura 7.5. A comparação entre a teórica e a de campo, para este caso, deve ser feita com a curva tracejada de número 2, na Figura 7.4. O método foi escolhido em detrimento a outros mais modernos, como o de Houlby & Teh (1988) por sua simplicidade.



**FIGURA 7.3:** Estimativa de Poropressões Máximas e de Estabilização dos Resultados da Sonda Piezométrica

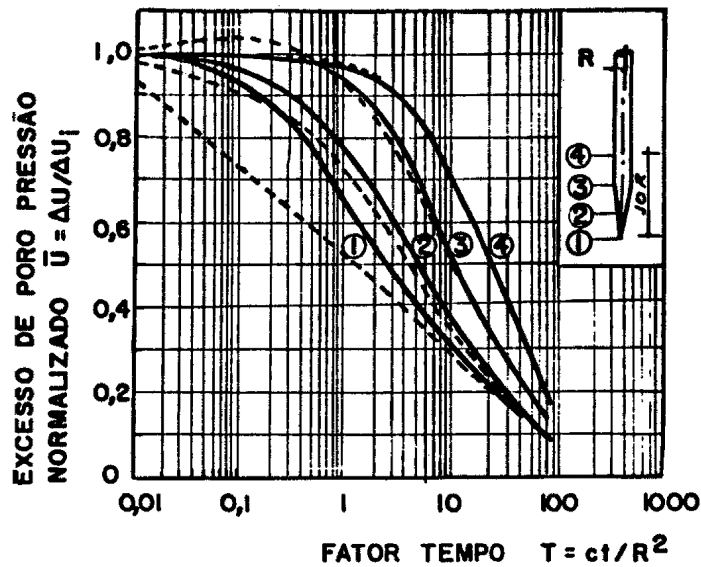


FIGURA 7.4: Curvas Teóricas de Dissipação de Poropressão da Sonda Piezométrica  
(Baligh & Levadoux, 1986)

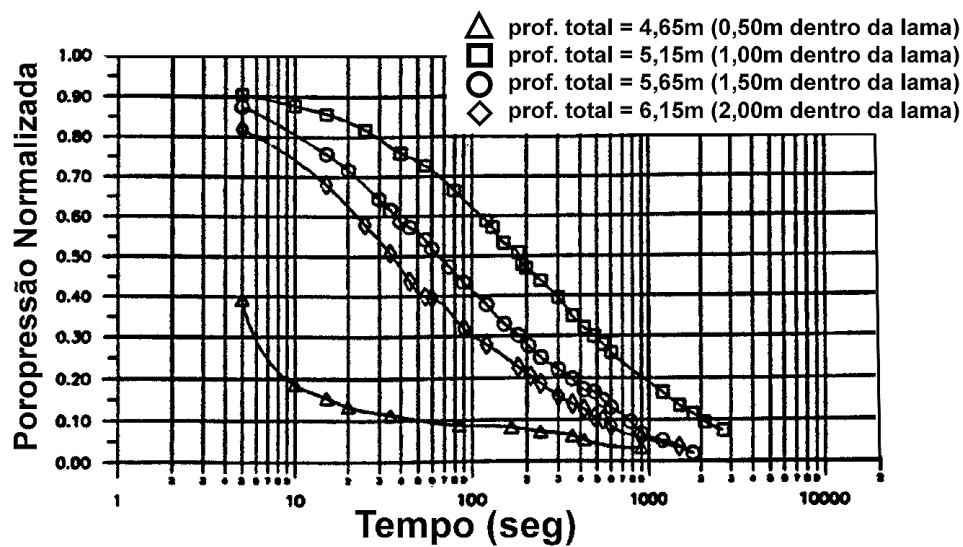


FIGURA 7.5: Curvas Típicas de Dissipação de Poropressão Obtidas com o Uso da Sonda Piezométrica

Pela Figura 7.5, pode ser notado que as curvas de campo obtidas quando a sonda ainda não havia penetrado muito na lama fogem desta configuração, mas as outras são bem similares à curva padrão. O material superficial é ainda muito afetado pelo movimento do líquido sobrenadante, uma vez que ainda não alcançaram um bom grau de adensamento, e as leituras da sonda ficam sujeitas às

oscilações da balsa, como pode ser percebido na Figura 7.6. Por esta figura, percebe-se que é difícil o controle dos valores iniciais do teste, valores estes indispensáveis para uma correta determinação da curva de dissipação.

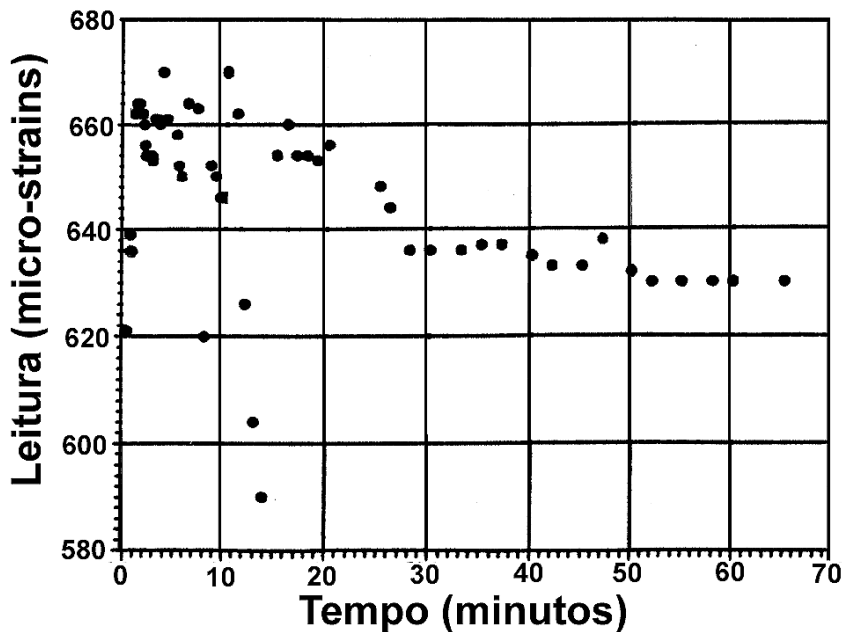
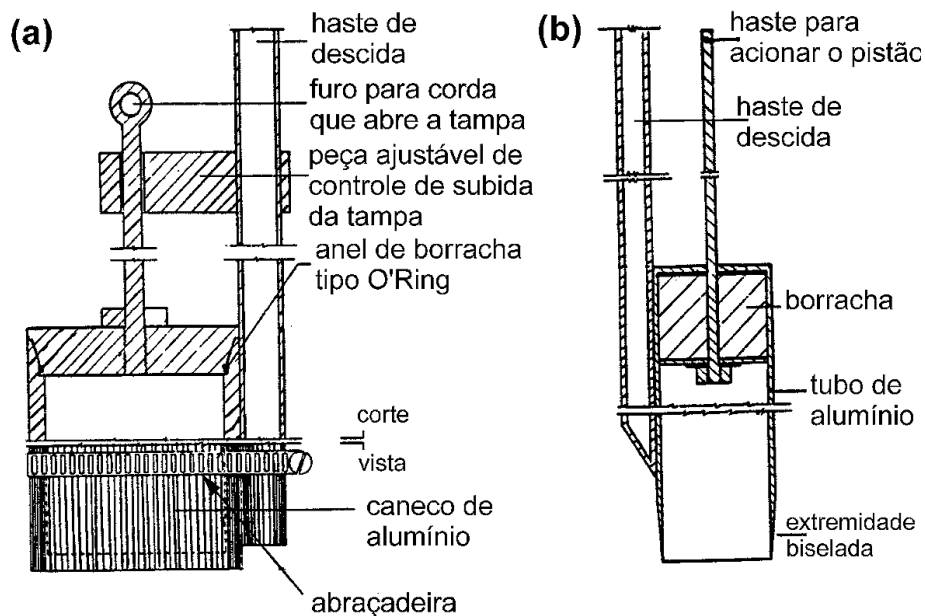


FIGURA 7.6: Leituras da Sonda Piezométrica - Influência de Movimento da Balsa

### 7.3

#### Técnica de Amostragem

Logo após concluída a medição de poropressão, era iniciada a retirada de amostras. Dois tipos de amestradores foram utilizados, um para lama de baixa densidade e outro para alta, também desenvolvidos na PUC-Rio, permitindo a determinação de índices físicos. A Figura 7.7, parte a, mostra um esquema do amostrador de lama de baixa densidade ou baixo teor de sólidos. Ele consiste de uma espécie de caneco, provido de tampa vedada com um anel de borracha do tipo O'Ring, que só permite a entrada do fluido no nível desejado, sob controle do operador. Tem capacidade aproximada de  $0.60 \text{ dm}^3$ .



**FIGURA 7.7:** Amostradores de Lama: Parte (a): Lama de Baixa Densidade e Parte (b): Lama de Alta Densidade

O esquema do amostrador de lama de alta densidade está na Figura 7.7, parte b. Ele se constitui de um tipo de "shelby", de pistão estacionário. É cravado até a profundidade de interesse com a boca vedada pelo pistão. Lá, o pistão é mantido estacionário e o tubo é cravado na lama, que é mantida no interior do mesmo por sucção. Amostras de  $\approx 0.80\text{dm}^3$  são coletadas com este equipamento.

Inicialmente, era descido o amostrador de baixo teor de sólidos, coletando-se material no mesmo nível onde anteriormente haviam sido medidas poropressões. Em geral, o amostrador de baixa densidade é utilizado no máximo até 1,5m de profundidade dentro da lama. No momento em que se sentia dificuldades em descer com este tipo de amostrador, trocava-se o mesmo pelo de lama de alta densidade.

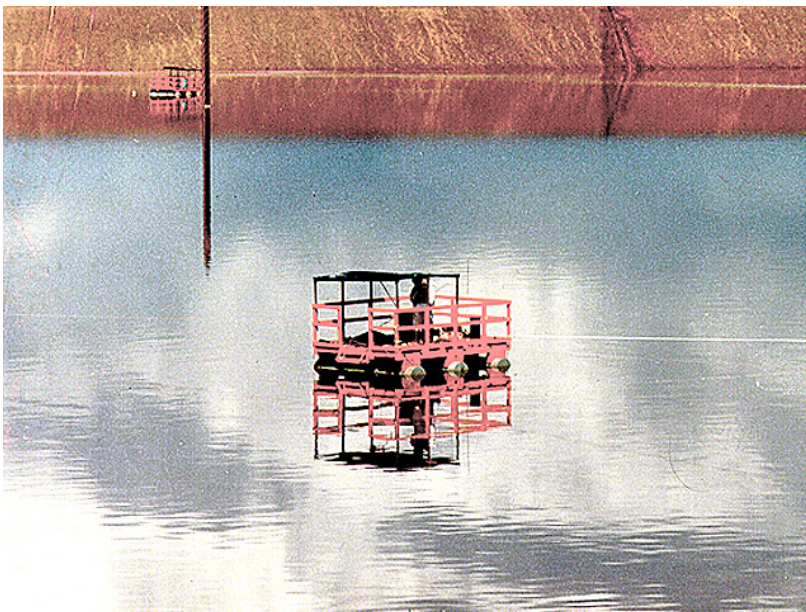
À partir das amostras coletadas, obtém-se o peso específico total ( $\gamma_t$ ), teor de umidade ( $w$ ), densidade dos grãos ( $G_s$ ) e índice de vazios ( $e$ ). De um modo geral, cada profundidade ou horizonte de amostragem fornecia 4 sub-amostras, de onde se obtia valores médios. Os valores de peso específico total eram obtidos através da determinação dos teores de umidade das amostras em laboratório, assumindo-se saturação e representatividade da densidade dos grãos. Algumas



vezes, este valor também é comparado com uma medição direta (peso/volume). Com os dados de poropressão e índices físicos, obtém-se os perfis de tensões totais e efetivas.

As Figuras 7.8 a 7.13 mostram os tipos de estações utilizadas para as medições de campo. Na Figura 7.8, está o tipo de balsa usado em reservatórios com boa espessura de líquido sobrenadante e resíduos com baixo grau de adensamento, já que não conta com um tripé de sondagem para descida de hastes mais pesadas, como a da Figura 7.9, necessárias para se atingir maiores profundidades e penetrar o rejeito mais adensado. A Figura 7.10 mostra a forma de acesso normalmente utilizado, por meio de barcos tipo “pedalinhos”. Nos locais onde não havia líquido sobrenadante permitindo o acesso da balsa, as estações de trabalho eram montadas sobre plataformas flutuantes (Figura 7.11), ou diretamente sobre o resíduo mais firme (Figura 7.12 e 7.13).

Por esta seqüência de figuras, poderá ser percebido que nas regiões onde os resíduos ainda se apresentavam muito mole, a descida da sonda era feita por meio de hastes leves e onde se esperava atingir maiores profundidades, fazia-se uso de um equipamento completo de sondagem à percussão, adaptando a sonda e os amostradores à estas hastes.



**FIGURA 7.8:** Balsa Usada em Reservatórios Navegáveis e Resíduo Pouco Espessado.



**FIGURA 7.9:** Balsa Usada em Reservatórios Navegáveis e Resíduos Espessados



**FIGURA 7.10:** Forma de Acesso às Estações de Trabalho



**FIGURA 7.11:** Estação de Trabalho em Região do Reservatório Pouco Navegável



**FIGURA 7.12:** Estação de Trabalho em Região do Reservatório Não Navegável



**FIGURA 7.13:** Estação de Trabalho em Região Seca do Reservatório

As Figuras 7.14 e 7.15 mostram uma seqüência de montagem da ponta cônica com as pedras porosas e o transdutor, após a saturação, que era feita por meio de fervura. A Figura 7.16 mostra a forma de descida do equipamento em resíduos muito moles (hastes leves), notando-se o dispositivo de travamento das mesmas à balsa. A Figura 7.17 mostra a sonda instalada, acoplada às hastes de sondagem, com o dispositivo de leitura usado neste caso, um sistema analógico. Um novo sistema de aquisição de dados foi desenvolvido ao longo da pesquisa, permitindo agora registros automáticos.



**FIGURA 7.14:** Seqüência de Montagem Da Ponta Cônica da Sonda Piezométrica



**FIGURA 7.15:** Seqüência de Montagem Da Ponta Cônica da Sonda Piezométrica

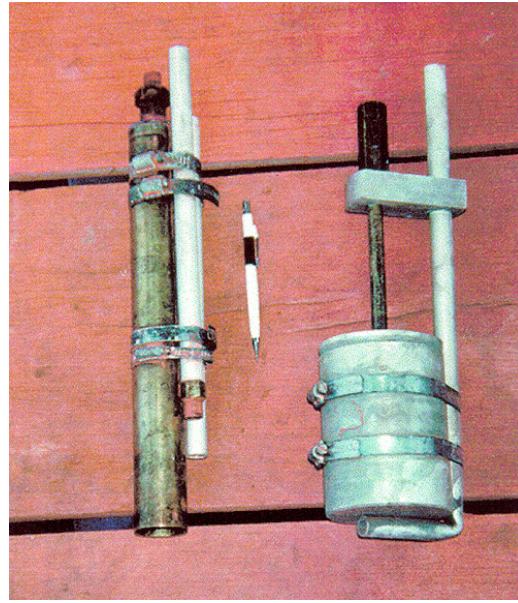


**FIGURA 7.16:** Descida da Sonda em Resíduos Muito Moles

A Figura 7.18 mostra os amostradores mais utilizados. Também tiveram outros, especialmente desenvolvidos para o caso específico dos resíduos já secos, semelhantes a um do tipo “shelby”, bipartido.



**FIGURA 7.17:** Sonda Em Operação: Esperando Equalização das Leituras



**FIGURA 7.18:** Amostradores Especiais de Lama

A Figura 7.19 mostra o uso do amostrador para lama com baixo teor de sólidos e a Figura 7.20, a amostra sendo extraída do amostrador tipo pistão estacionário, para lamas com alta densidade. Ela já era diretamente acondicionada em sacos plásticos para mínima perda de umidade, e tinha seu comprimento medido para obtenção de densidade total “in-situ”, que depois era comparada com as obtidas via índices físicos.



**FIGURA 7.19:** Uso do Amostrador Para Lamas de Baixa Densidade



**FIGURA 9.20:** Uso do Amostrador Para Lamas de Alta Densidade

## 7.4

### Resultados dos Ensaios

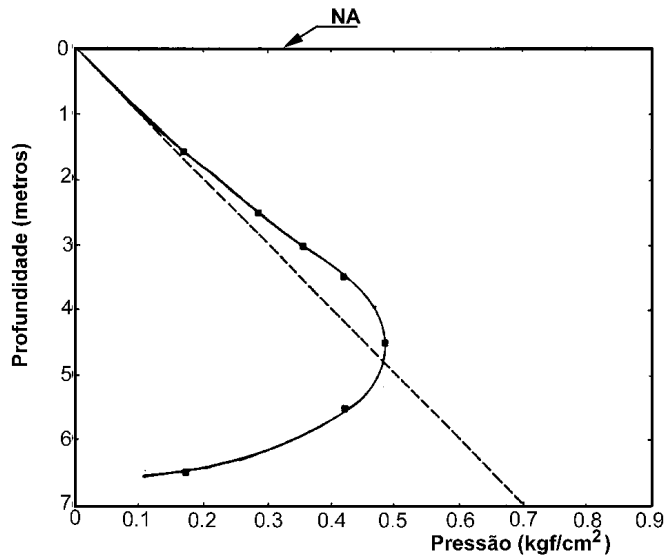
#### 7.4.1

##### Lama de Lavagem de Bauxita

Neste material, foram realizados ensaios em 7 estações, distribuídas por dois reservatórios de disposição, atingindo uma profundidade média de 7.0 metros. Um dos reservatórios, chamado de TP01, era utilizado para um primeiro lançamento e, o segundo, chamado de SP-02-3, onde os resíduos eram destinados após já ter atingido um teor de sólidos em torno de 30% no primeiro reservatório. Estes mesmos resultados já foram previamente analisados por Ávila & Soares (1995) e Ávila et al. (1995).

O perfil de poropressões típico medido nos dois lagos é o da Figura 7.21, acusando uma drenagem de fundo que não havia sido considerada no projeto. As Tabelas 7.1 a 7.4 resumem os valores encontrados de índices físicos e os coeficientes de adensamento horizontal computados a partir das curvas de

dissipação de poropressões, conforme o método proposto por Baligh & Levadoux (1986) e Levadoux & Baligh (1986), descrito em Villar (1990).



**FIGURA 7.21:** Perfil Típico de Poropressões Medido na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.

As Figuras 7.22 e 7.23 mostram os perfis de tensões medidos. Os valores de índices físicos foram plotados nas Figuras 7.24 a 7.27. As curvas de dissipação e os valores de coeficiente de adensamento estão nas Figuras 7.28 a 7.30. Pelas curvas de dissipação, nota-se que os resultados de testes executados a pequenas profundidades não são adequadas ao método de Baligh & Levadoux (1986), justificando a variação dos valores de coeficientes de adensamento na parte superior dos gráficos de coeficiente de adensamento contra a profundidade. A Figura 7.31 apresenta as variações do topo da camada de lama durante o período de execução dos ensaios.

A Figura 7.32 mostra a relação de compressibilidade de campo obtida. A equação que está escrita no canto superior á direita, tendo sido calculada por Ávila e Soares (1995). Os mesmos autores calcularam o coeficiente de permeabilidade como seguindo a relação:

$$k = 17,28 \times 10^{-5} \cdot e^{2,9} \text{ (m/dia)} \quad (7.1)$$

**TABELA 7.1:** Índices Físicos Obtidos Por Ensaio de Campo Para a LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01.

ESTAÇÃO	PROF. (M)	TEOR DE SÓL. (%)	TEOR DE UM. (%)	ÍNDICE DE VAZIOS	PESO ESPEC. TOTAL (KN/M <sup>3</sup> )
<b>01</b>	0.75	20.48	388.3	11.3	11.32
	1.69	23.73	321.4	9.3	11.60
	2.68	27.79	259.8	7.5	11.98
	3.56	28.87	246.4	7.1	12.08
	4.91	44.15	126.5	3.7	13.78
<b>02</b>	1.08	15.63	539.8	15.6	10.92
	2.08	23.49	325.7	9.4	11.58
	2.58	27.91	258.3	7.5	11.99
	3.08	31.14	221.1	6.4	12.32
	3.50	27.81	164.5	4.8	13.03
	4.50	49.42	102.3	2.3	14.49
<b>03</b>	1.0	18.96	427.4	12.4	11.19
	1.27	20.47	388.5	11.3	11.32
	2.0	26.06	288.7	8.2	11.82
	3.0	34.85	186.9	5.4	12.70
	4.0	42.61	134.7	3.9	13.58
	5.0	44.55	124.5	3.6	13.84
	5.50	51.28	95	2.8	14.74
	6.0	55.78	79.3	2.3	15.44
6.12	56.70	76.4	2.2	15.61	
<b>04</b>	1.0	23.75	321.0	9.3	11.61
	2.0	27.01	270.2	7.8	11.90
	3.0	31.67	215.8	6.3	12.36
	4.0	38.28	161.2	4.7	13.07
	5.0	50.81	96.8	2.8	14.68
	6.0	65.47	52.7	1.5	17.16
	7.0	72.20	38.5	1.1	18.57
<b>05</b>	0.05	19.29	418.4	12.1	11.22
	1.05	28.20	264.6	7.4	12.03
	2.05	40.39	147.6	4.3	13.33
	3.05	46.28	116.1	3.4	14.05
	4.05	64.73	54.5	1.6	17.02



**TABELA 7.2:** Índices Físicos Obtidos Por Ensaios de Campo Para LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago SP2-3

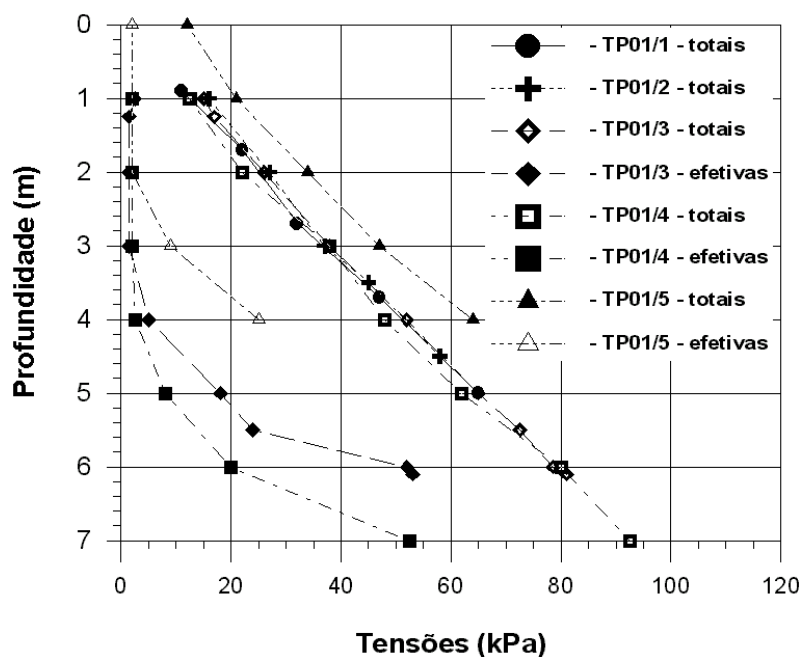
ESTAÇÃO	PROF. (M)	TEOR DE SÓL. (%)	TEOR DE UM. (%)	ÍNDICE DE VAZIOS	PESO ESPEC. TOTAL (KN/M <sup>3</sup> )
01	1	32.85	204.4	5.9	12.50
	2	32.39	204.0	5.9	12.49
	3	37.89	163.9	4.7	13.04
	4	53.81	85.8	2.5	15.14
	4.8	57.22	74.8	2.2	15.67
02	1	31.83	214.2	6.2	12.38
	2	41.51	140.9	4.1	13.45
	3	52.49	90.5	2.6	14.96

**TABELA 7.3:** Coeficientes de Adensamento Interpretados da Sonda Piezométrica Para A LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01

ESTAÇÃO	DATA	PROFUNDIDADE (m)		COEF. DE ADENSAMENTO HORIZ. (cm <sup>2</sup> /seg.)
		TOTAL	NA LAMA	
01	24/10	1.39	1.0	0.41
	25/10	1.66	1.27	0.195
	25/10	2.39	2.0	0.077
	24/10	3.39	3.0	0.294
	24/10	4.39	4.0	0.026
02	02/09	5.50	4.50	0.041
	02/09	6.50	5.50	0.043
03	25/10	5.39	5.0	0.037
	26/10	5.89	5.50	1.264
	25/10	6.39	6.0	0.021
	26/10	6.51	6.12	0.032
04	28/10	1.095	1.0	1.279
		2.005	2.0	-
		3.095	3.0	0.877
		4.095	4.0	0.062
		5.095	5.0	0.025
		6.095	6.0	0.037
	29/10	7.095	7.0	0.048
05	31/10	4.0	3.05	0.027
		5.0	4.05	0.025
		6.0	5.05	0.023
		7.0	6.05	0.038

**TABELA 7.4:** Coeficientes de Adensamento Interpretados da Sonda Piezométrica Para a LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago SP2-3

ESTAÇÃO	DATA	PROFUNDIDADE (m)		COEF. DE ADENSAMENTO HORIZ. (cm <sup>2</sup> /seg.)
		TOTAL	NA LAMA	
01	30/10	2.0	2.0	0.458
		3.0	3.0	0.026
		3.5	3.50	0.04
		4.0	4.0	0.023
		4.91	4.91	0.048
02	01/11	1.0	1.0	0.465
		2.0	2.0	0.043
		3.0	3.0	0.128
		3.5	3.5	0.323

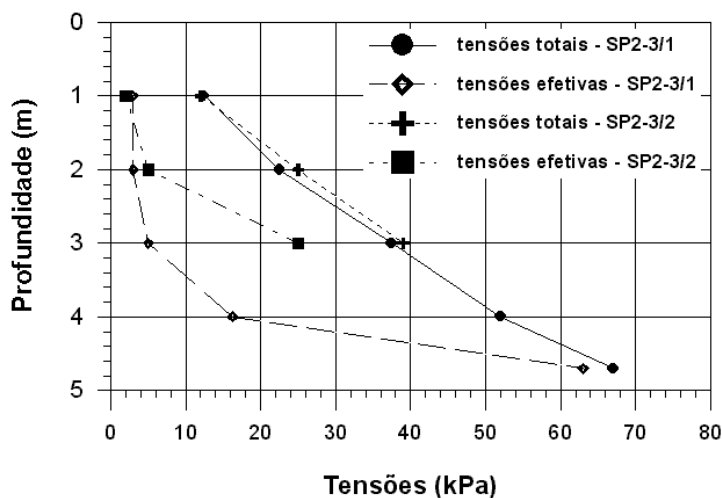


**FIGURA 7.22:** Perfil de Tensões Totais e Efetivas Medido na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01

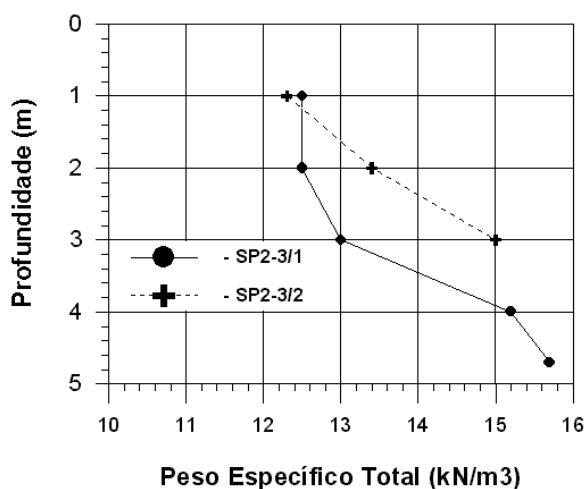
Os mesmos autores verificaram que um aumento de um ordem de grandeza na permeabilidade poderia conduzir a um erro de até 10% na previsão de teor de sólidos esperado para a camada após o processo de adensamento.

A Figura 7.33 inclui os valores obtidos por meio de ensaios de campo executados por outra equipe, com equipamento e técnicas diferentes, mostrando

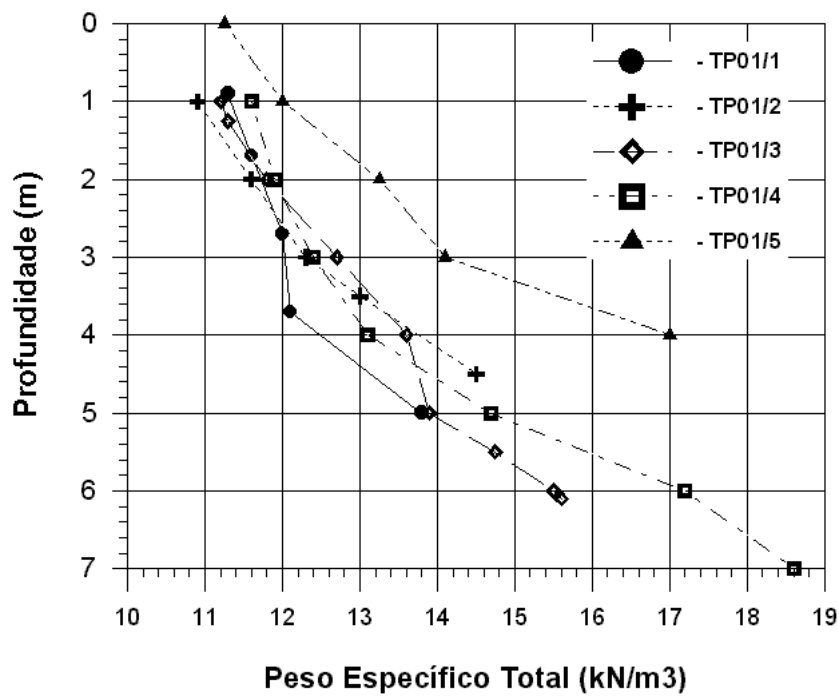
boa concordância. Na Figura 7.34(a), vê-se que os dados de campo estão na faixa de variação dos resultados de ensaio CRD/CRS. Os ensaios de campo estão com sua tendência média reforçada por uma reta em traço cheio, para facilitar a visualização. A Figura 7.34 (b) mostra os mesmos resultados de campo, porém só considerando os ensaios do tipo CRD. Nesta figura também está a permeabilidade calculada tanto para campo como para laboratório. Em relação à compressibilidade, com uma boa aproximação. No caso da permeabilidade, a diferença foi maior, como pode ser notado pela figura. Os valores de permeabilidade foram, então, avaliados por um estudo paramétrico antes de serem aplicados como pode ser visto em Ávila & Soares (1995).



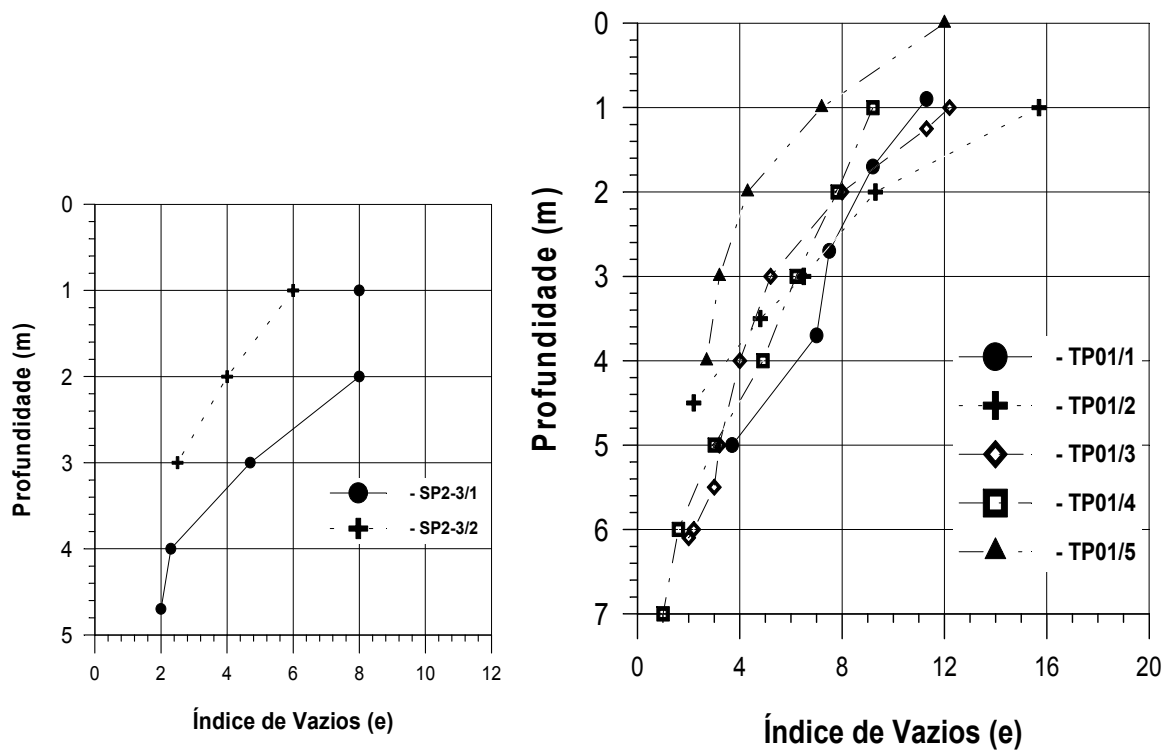
**FIGURA 7.23:** Perfil de Tensões Totais e Efetivas Medido na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago SP2-3



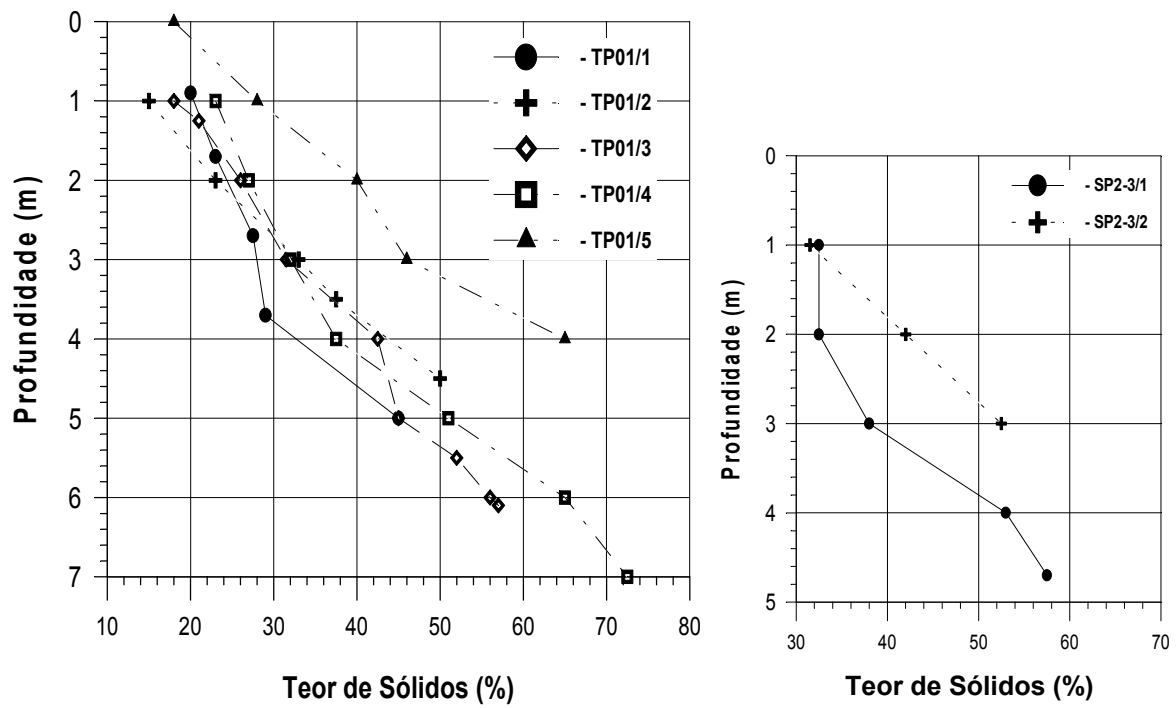
**FIGURA 7.24:** Peso Específico Total com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago SP2-3.



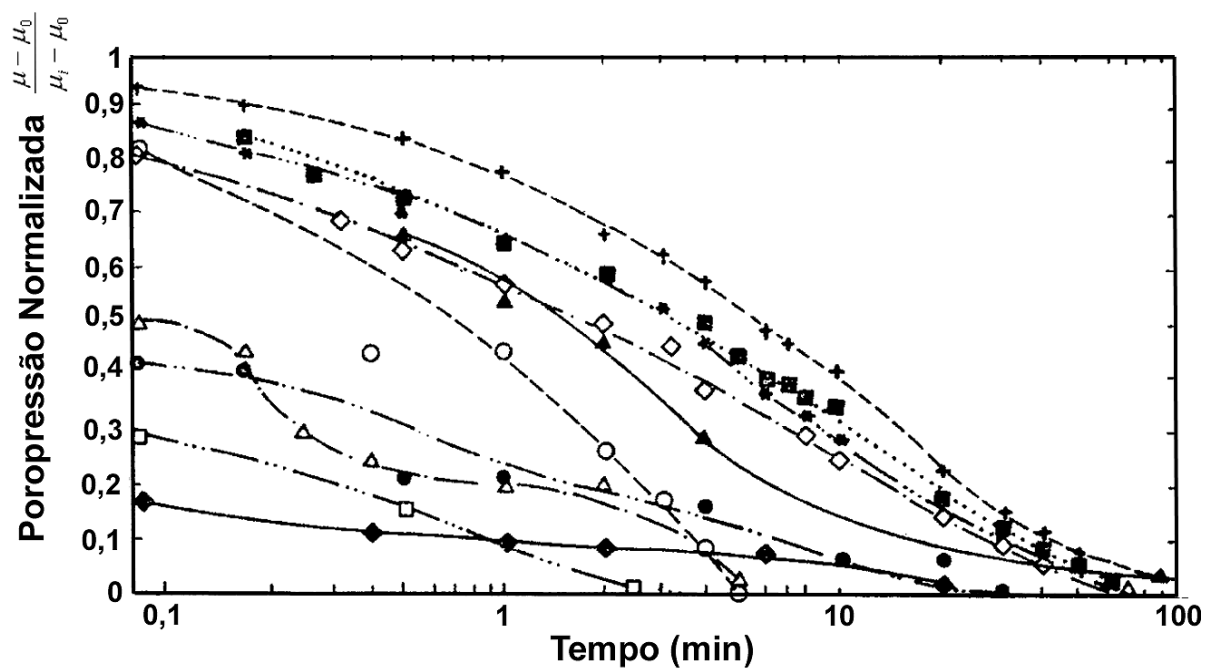
**FIGURA 7.25:** Peso Específico Total com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01



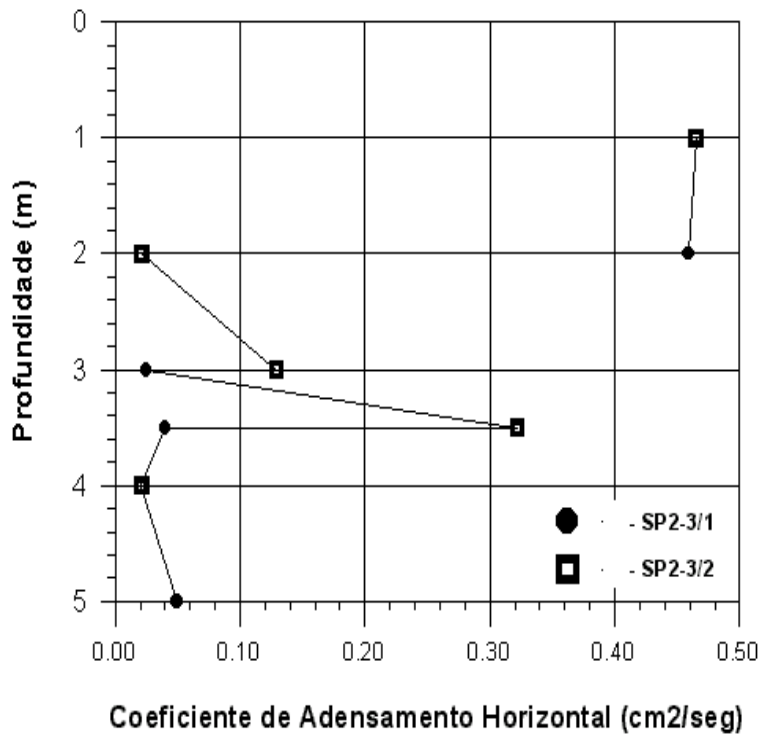
**FIGURA 7.26:** Índice de Vazios com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.



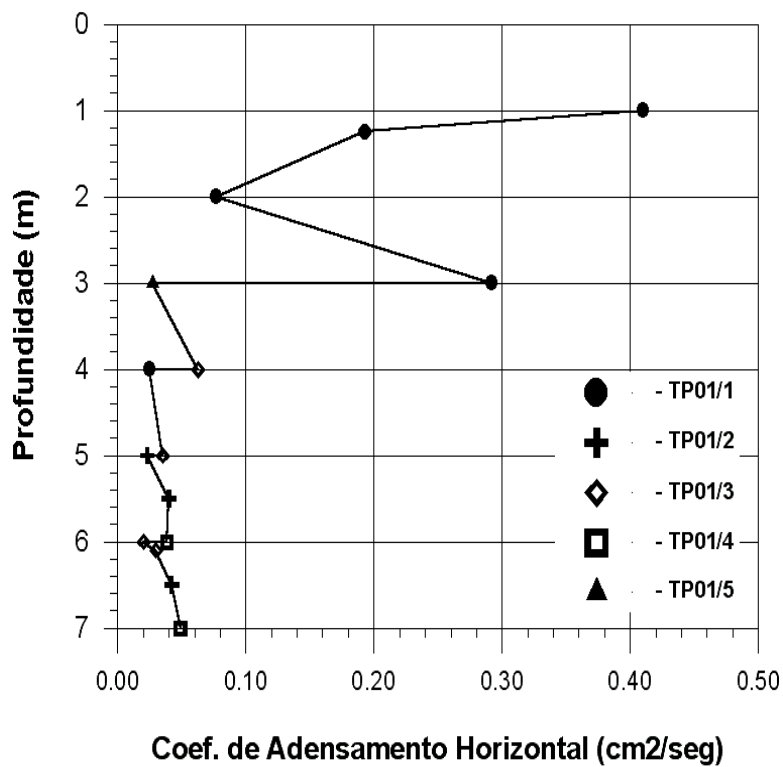
**FIGURA 7.27:** Teor de Sólidos com a Profundidade da LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.



**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

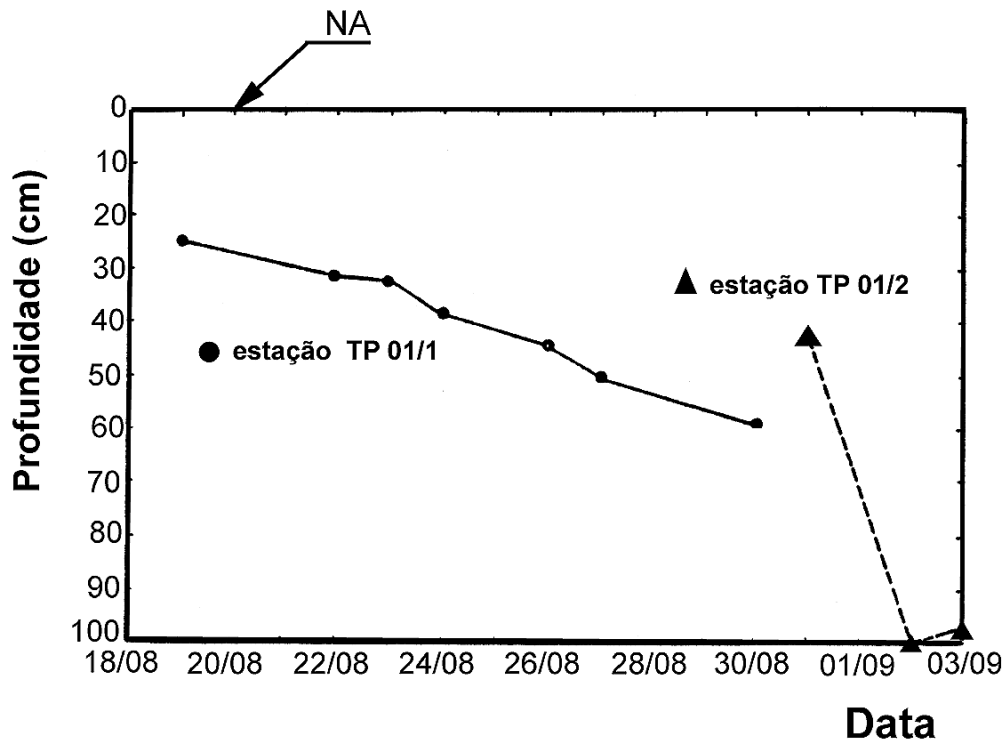


FIGURA 7.31: Resultados de Batimetria na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA: Lago TP01 – Variação do Topo da Camada de Lama No Reservatório.

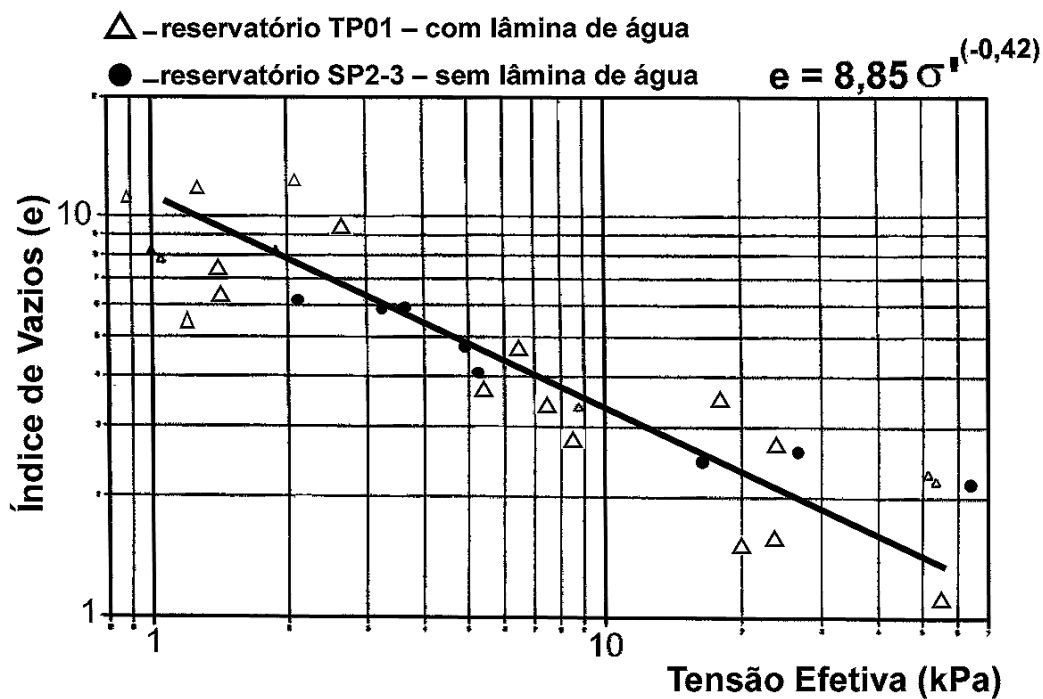
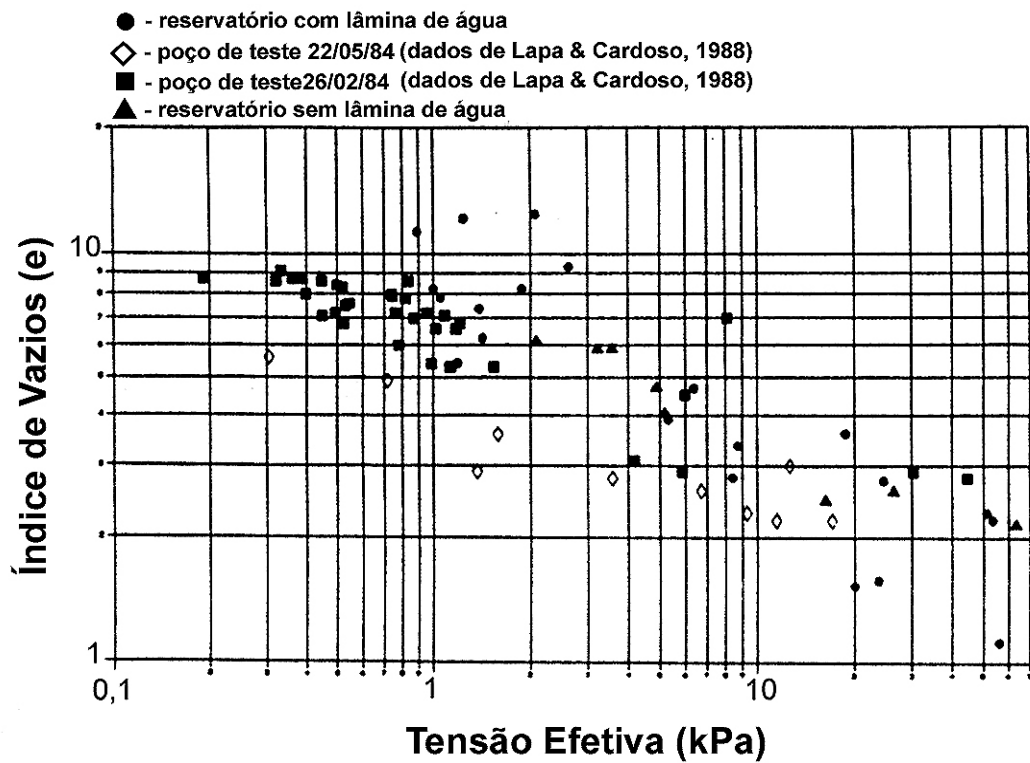
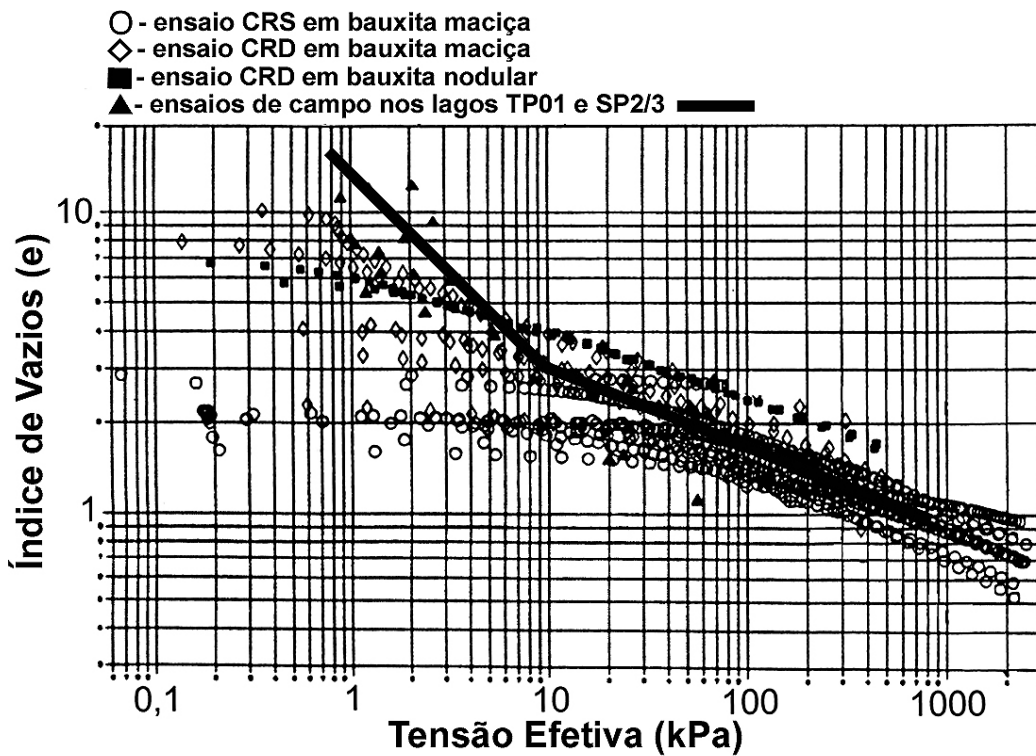


FIGURA 7.32: Estimativa da Curva Final de Compressibilidade de Campo - LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.

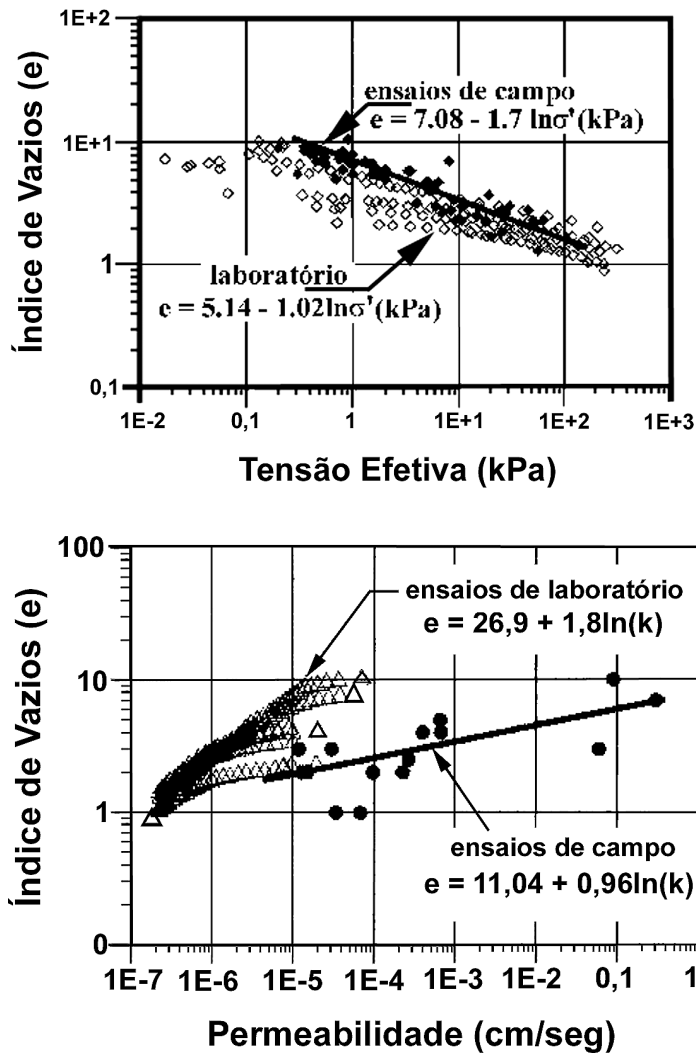


**FIGURA 7.33:** Comparação entre Curvas de Compressibilidade de Campo Obtidas por Diferentes Equipes na LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA.



**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.

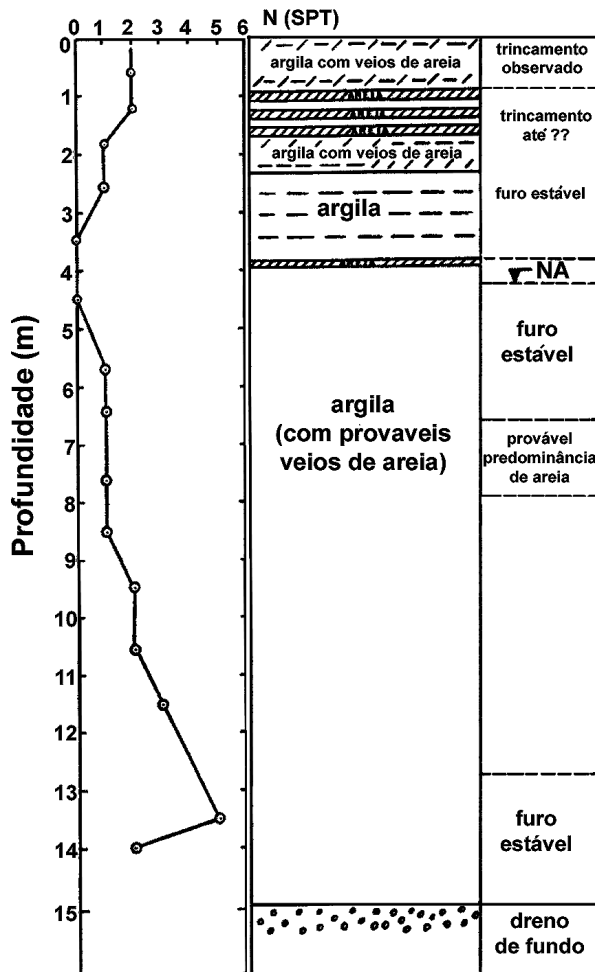


FIGURA 7.35: Perfil de Sondagem em Lago Desativado e Ressecado da LAMA VERMELHA SL.

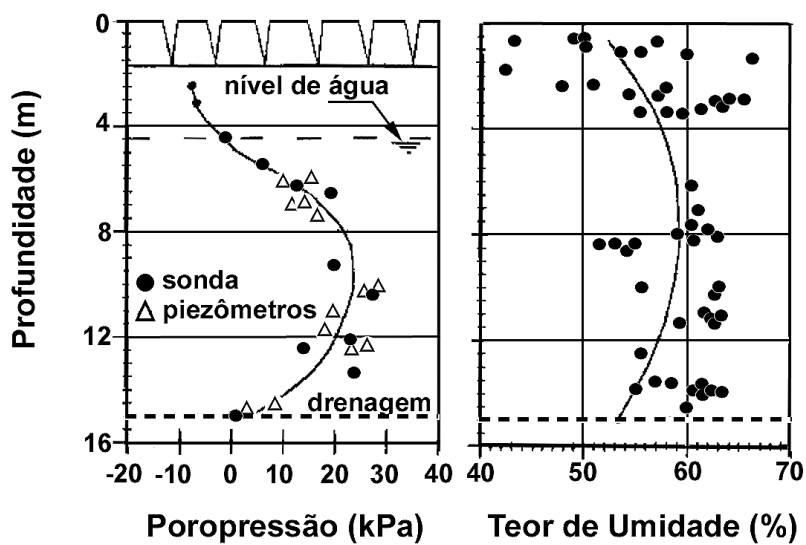


FIGURA 7.36 (a): Perfil de Densidade dos Grãos do Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

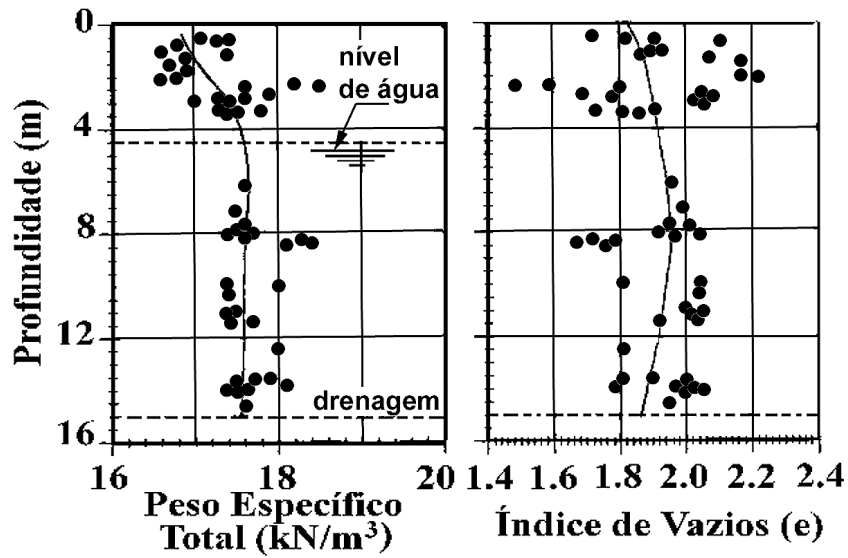


FIGURA 7.36 (b): Perfil Médio de Índice de Vazios e Densidades do Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

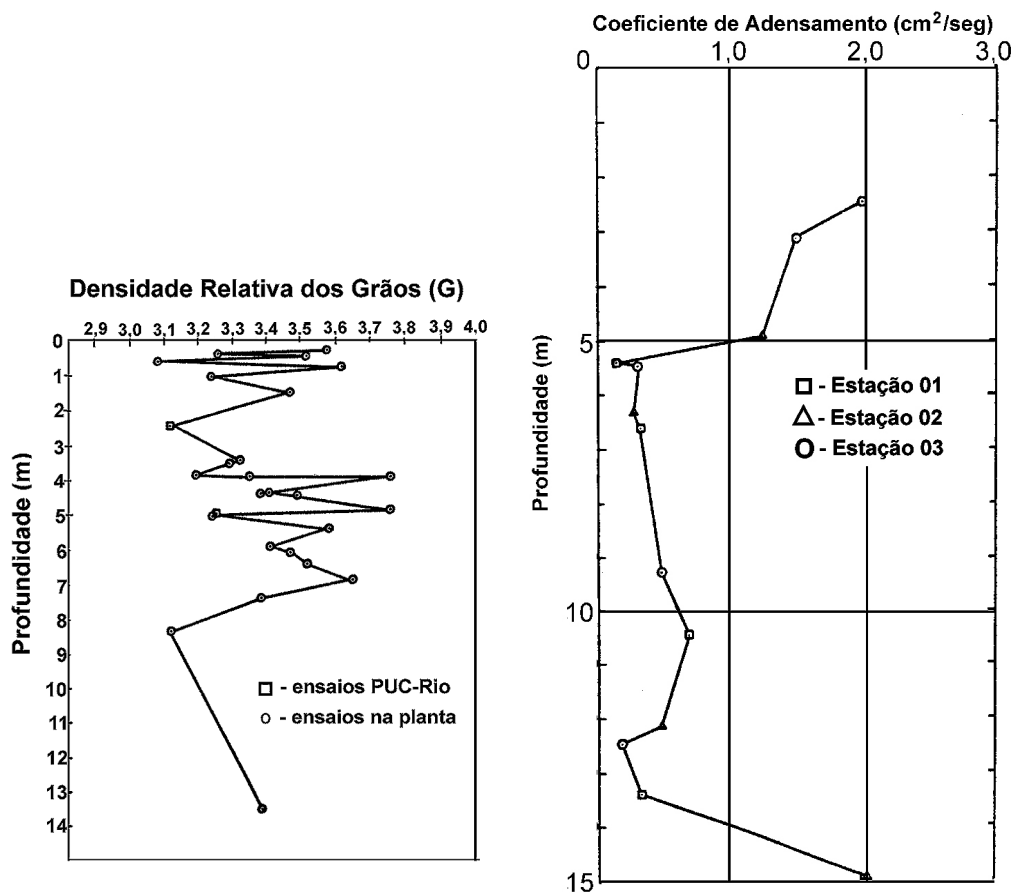
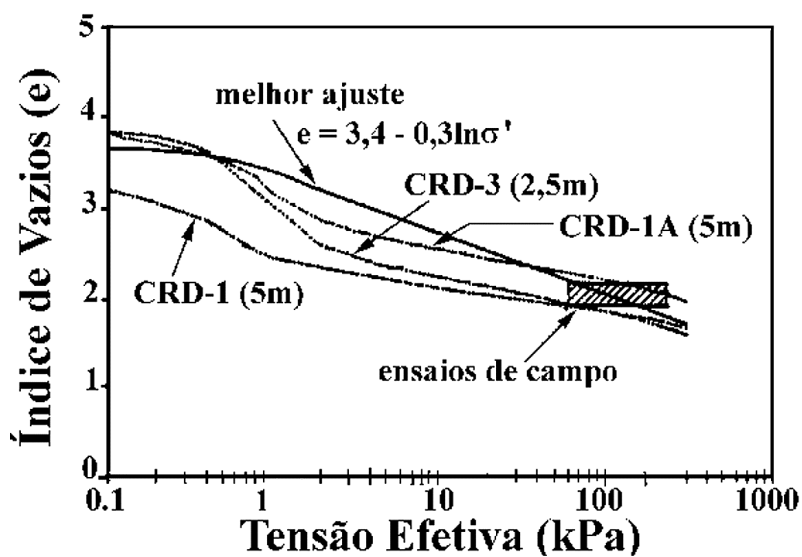


FIGURA 7.37: (a) Densidade dos Grãos e (b) Coeficiente de Adensamento Horizontal Interpretado da Sonda Piezométrica - Lago Ressecado da Lama Vermelha SL.

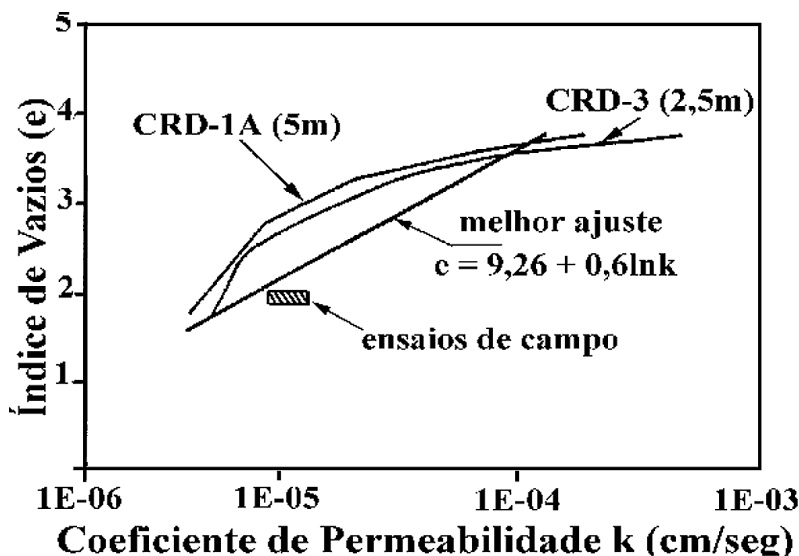
A comparação entre os resultados dos ensaios de campo e laboratório está na Figura 7.38 e 7.39. Com relação à compressibilidade, mesmo não se tendo determinado uma curva de campo, nota-se que os valores estão dentro dos medidos em laboratório. Já com relação à permeabilidade, nota-se que os valores de 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:

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

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

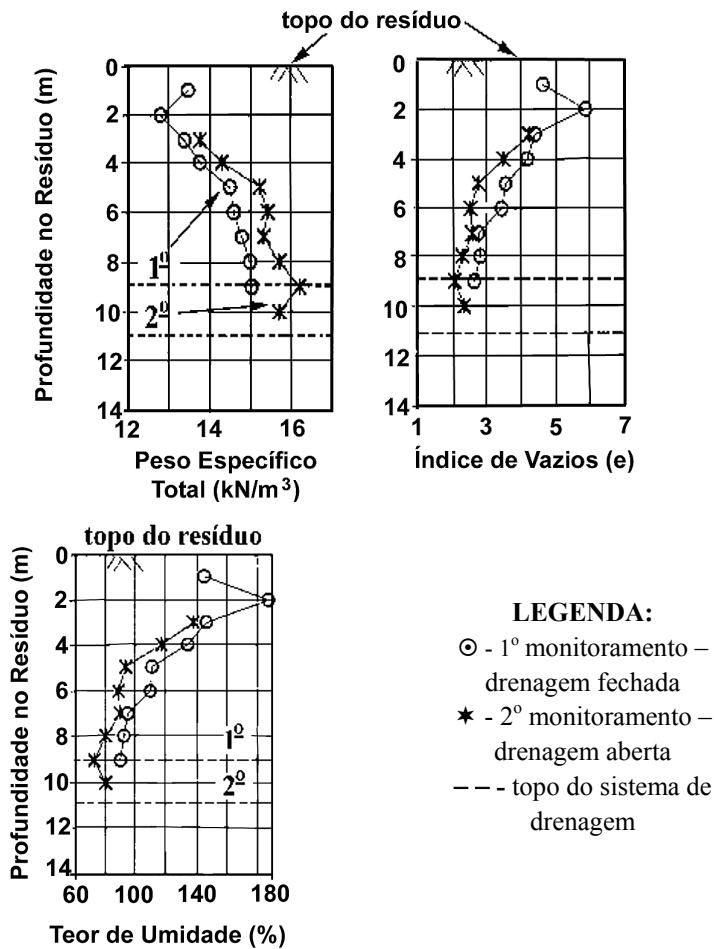


FIGURA 7.40: Índices Físicos Medidos em Reservatórios Ativos da Lama Vermelha SL. (Villar et al., 1998)

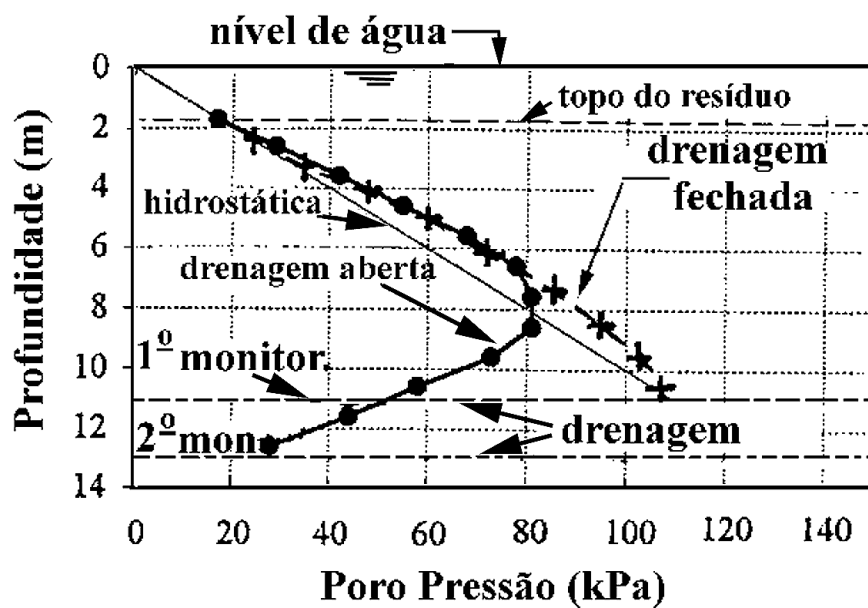
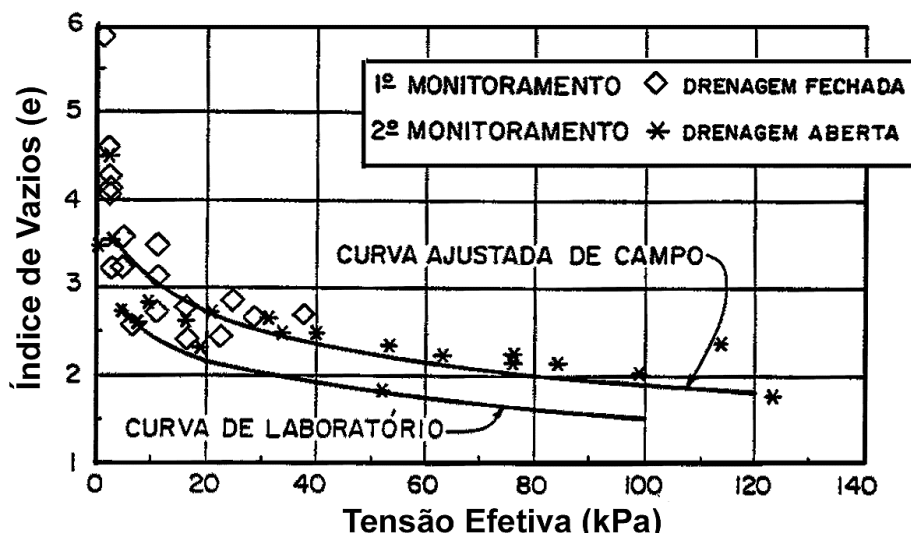


FIGURA 7.41: Perfil de Poro-Pressões Medidas em Reservatório da Lama Vermelha SL Antes e Após Abertura de Drenagem de Fundo. (Villar et al., 1998)



**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.

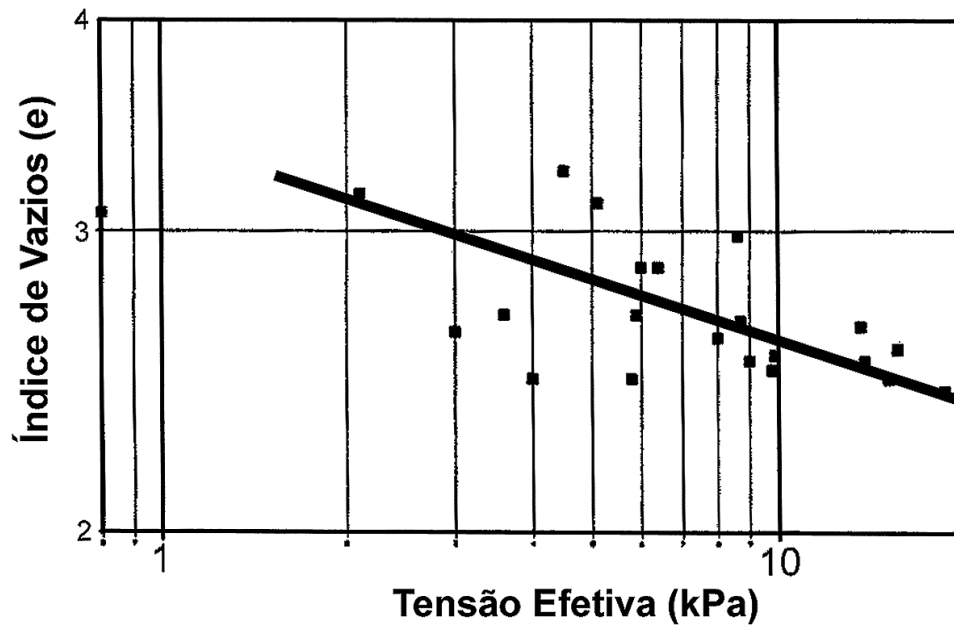


FIGURA 7.43: Medições de Campo em um Reservatório Ativo da Lama Vermelha SL.

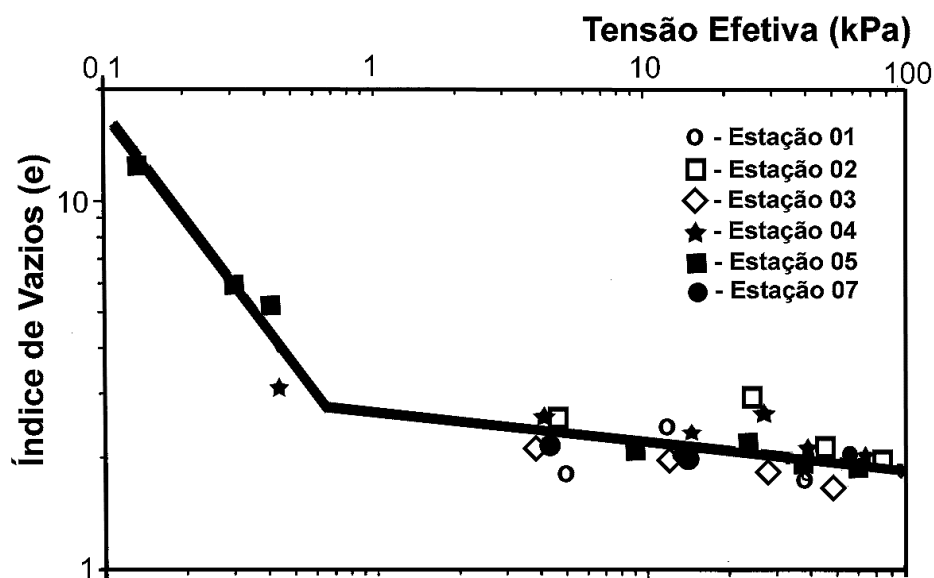
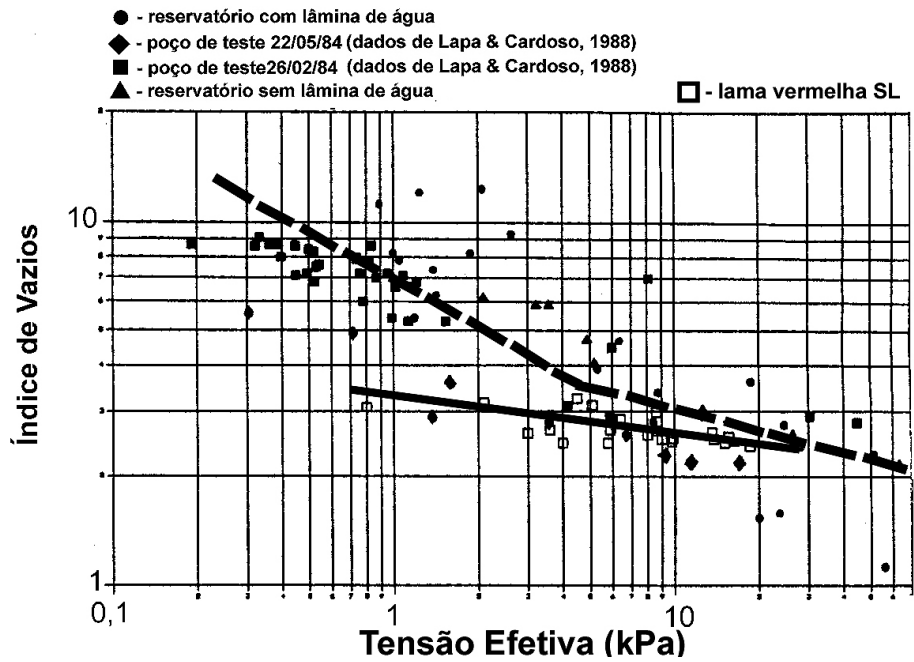


FIGURA 7.44: Compressibilidade de Campo de Reservatório Ativo da Lama Vermelha SL.



**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.

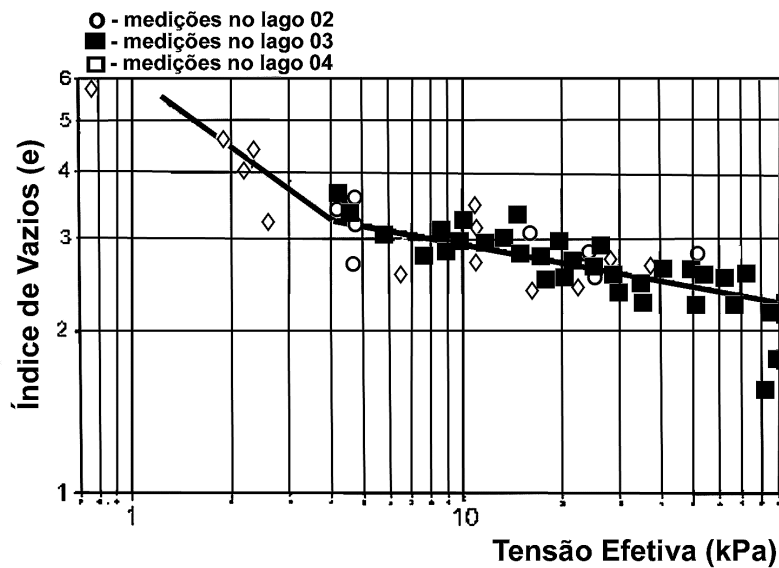
Neste resíduo foram executados medições em quatro diferentes reservatórios. A Figura 7.46 resume os valores medidos em três. A Figura 7.47 traz os resultados da lama vermelha SL e a lama vermelha PC, as diferenças devendo ser creditadas ao fato de serem originadas de jazidas diferentes. Provavelmente,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

### 7.4.4

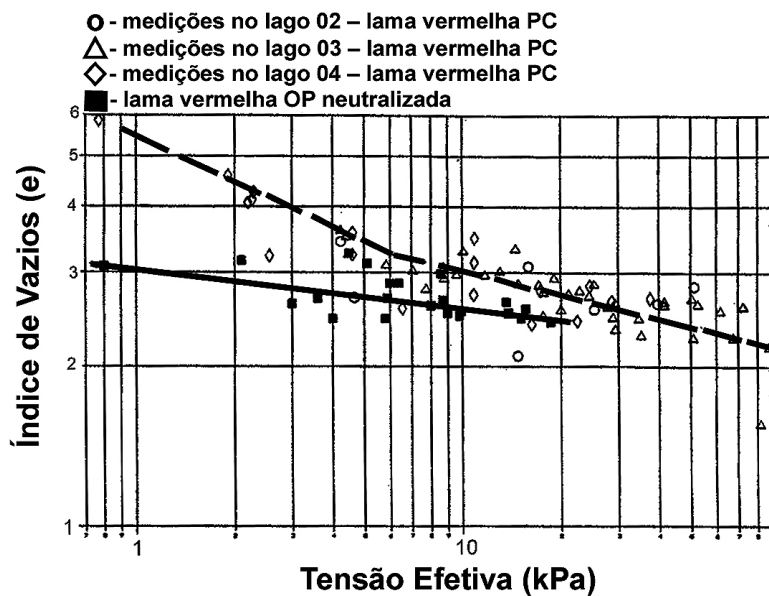
#### Lama Vermelha OP Neutralizada.

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).

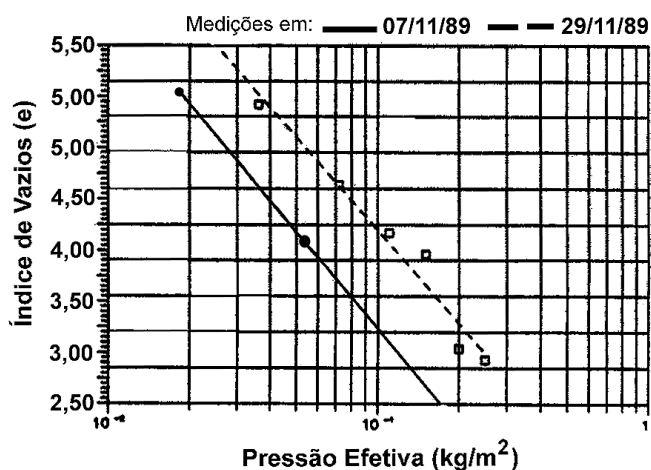


**FIGURA 7.46:** Medições de Campo em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA PC)

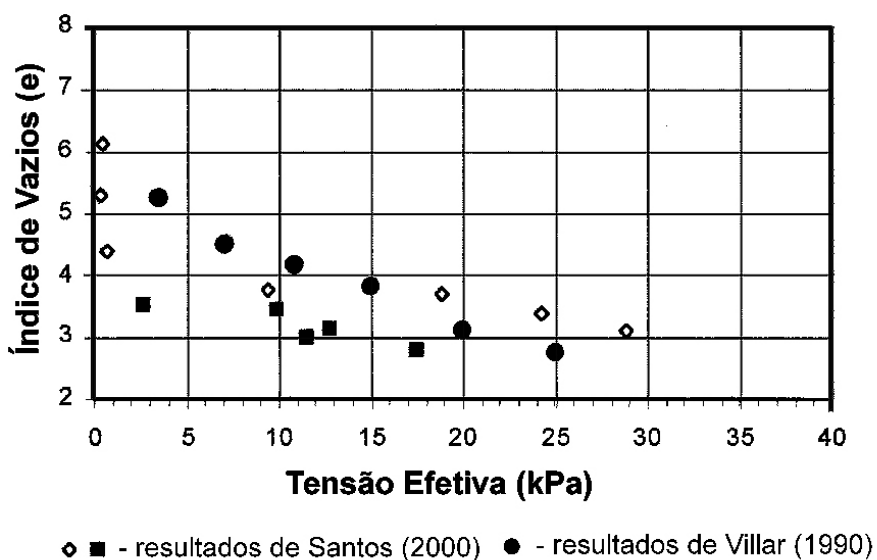


**FIGURA 7.47:** Comparação de Medições de Campo em Rejeitos de Processamento de Bauxita (LAMA VERMELHA SL e LAMA VERMELHA PC)

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).

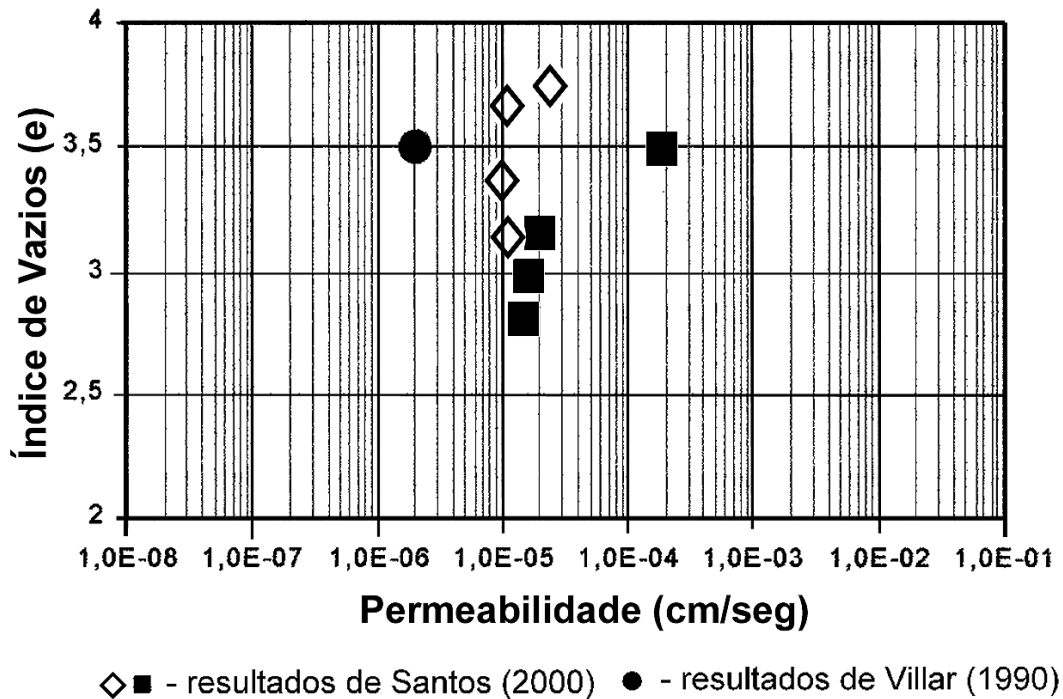


FIGURA 7.50: Valores de Permeabilidade de Medições em Campo na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA (Santos, 2000).

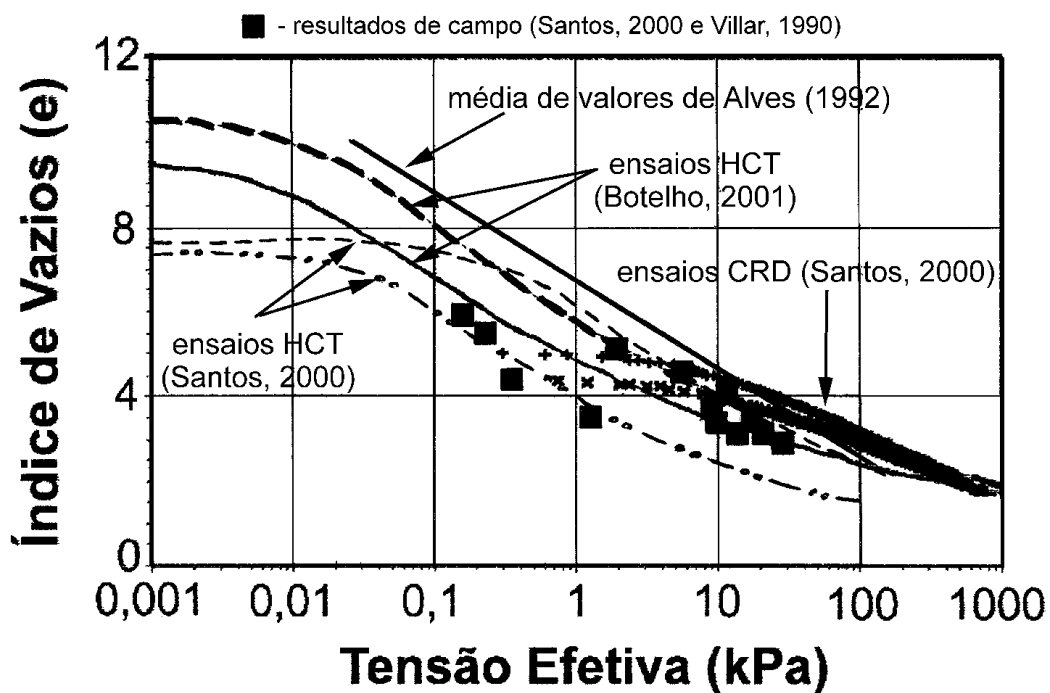
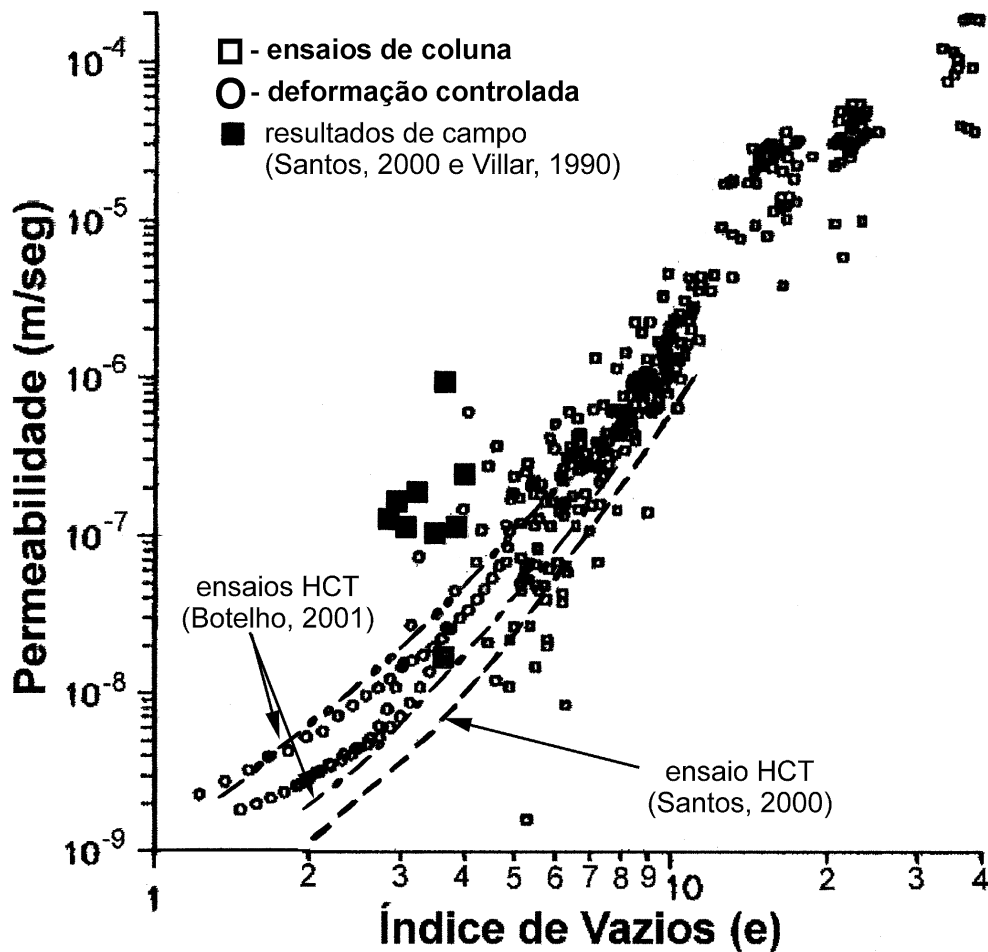
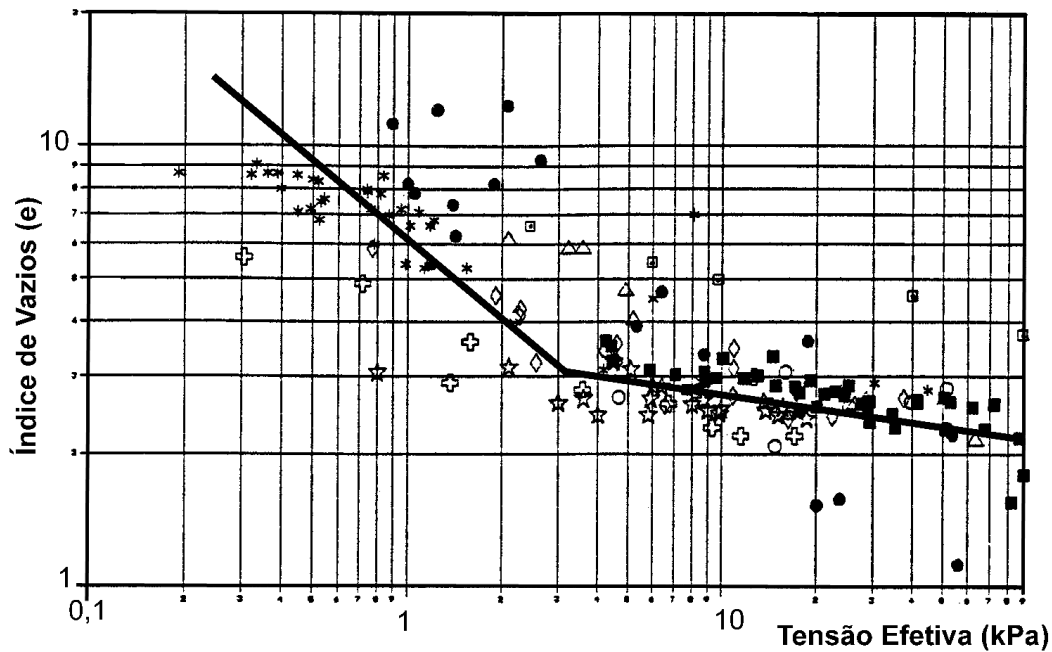


FIGURA 7.51: Comparação entre Medições em Campo e Ensaios de Laboratório na LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA – Curva de Compressibilidade.



**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.