

6

Ensaio de Adensamento com Deformação Controlada: Obtenção da Compressibilidade e Permeabilidade dos Resíduos em Laboratório

6.1

Introdução

O estudo do enchimento dos reservatórios das barragens nos quais são lançados os rejeitos é baseado principalmente na teoria de adensamento por grandes deformações. Para tal, é necessário que se conheça as relações constitutivas do resíduo, ou seja, a relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade) e a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios. No caso em estudo, esta determinação deve abranger a fase saturada e não saturada do material. Foi verificado que, mesmo após mais de um mês de contínua exposição ao ressecamento, os resíduos lançados à partir de um baixo teor de sólidos ainda se mantinham saturados, de modo que o conhecimento das leis de compressibilidade e permeabilidade nestas condições é uma etapa importante da pesquisa.

No lançamento dos rejeitos, geralmente com elevados teor de umidade e constituído por grande porcentagem de partículas finas, inicia-se um processo de deposição que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento por peso próprio do material. Para estes materiais muito moles, o modelo de deposição não pode ser interpretado pela teoria clássica de adensamento de Terzaghi, pois o processo de deposição envolve grandes deformações. Embora este processo de adensamento seja um fenômeno tridimensional e já existirem modelos que assim a considerem, a grande maioria das teorias e soluções numéricas propostas para o modelo de deposição de rejeitos finos trata o problema unidimensionalmente. Esses modelos exigem o conhecimento das relações entre tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade) e a variação do coeficiente de permeabilidade com

o índice de vazios. No laboratório, estas características podem ser obtidas através de ensaios edométricos de diversos tipos e dimensões, e ensaios de coluna. Nas últimas décadas, vários tipos de ensaios de adensamento foram desenvolvidos com o objetivo de suprir algumas limitações do ensaio tido como convencional, o com carregamento em estágios proposto por Terzaghi (1927). Dentre os pioneiros, pode-se citar os ensaios com taxa de deslocamento ou deformação constante (*Smith & Wahls, 1969; Wissa et al., 1971*); o ensaio com gradiente controlado (*Lowe e outros, 1969*); o ensaio com taxa de carregamento constante (*Aboshi et al., 1970*); o ensaio com fluxo restringido (*Lee, 1981*); o adensamento hidráulico (*Imai, 1979*). Várias destas técnicas têm sido sistematicamente aprimoradas e modificadas com passar do tempo (por exemplo, *Sills et al., 1986; von Fay & Cotton, 1986* etc.). Botelho (2001) apresenta uma revisão sobre estas técnicas, bem como sobre suas metodologias de análise.

O ensaio de adensamento com deslocamentos constantes, conforme descrito em Guimarães (1990), Alves (1992), Lima (1996) e Botelho (2001), foi o que mais se utilizou neste trabalho. Ele vem sendo cada vez mais aplicado no estudo do comportamento de resíduos de mineração e industriais, no intuito de prever seu comportamento nos reservatórios de disposição e posterior recuperação (por ex., *Znidarcic et al., 1995; Lima, 1996; Santos, 2000; Botelho, 2001* etc.). É o objetivo deste capítulo apresentar as leis de compressibilidade e permeabilidade obtidas para os resíduos à partir de alguns do ensaio de adensamento com deformação controlada, bem como os resultados obtidos por outros pesquisadores nestes mesmos materiais.

Foi decidido somente discutir alguns dos ensaios realizados de forma superficial para resumir o volume de dados a serem apresentados neste trabalho, ainda mais porque a lama vermelha OP neutralizada foi estudada e analisada recentemente em outras pesquisas com relação à estes mesmos aspectos de compressibilidade e permeabilidade (*Santos, 2000 e Botelho, 2001*). Está sendo considerado, portanto, que especialmente a lei de compressibilidade deste resíduo já está bem determinada. Mais estudos são necessários com relação à lei de permeabilidade, mas, para uma primeira abordagem, serão suficientes os resultados aqui discutidos.

Para o resíduo cáustico da região de Ouro Preto, que só se diferencia do neutralizado com relação ao fluido de preenchimento dos poros, também só estarão sendo apresentados alguns dos ensaios considerados típicos, uma vez que em grande parte, a sua resposta foi semelhante aos dos outros materiais similares existentes na literatura, especialmente no tocante à compressibilidade. Fica faltando um estudo mais detalhado com relação à permeabilidade, que será também apresentado em uma outra ocasião.

Desta maneira, aproximadamente uns vinte a trinta ensaios ficaram de fora desta primeira análise. Por meio destes testes foi realizada uma ampla análise sobre a influência de algumas condições de ensaio, tais como velocidade e teor de sólidos inicial, nos resultados obtidos, o que será realizado oportunamente.

6.2

Características de Compressibilidade e Permeabilidade dos Resíduos

Serão apresentadas à seguir, algumas das características de compressibilidade e permeabilidade de resíduos de mineração e processamento de bauxita reportados na literatura.

Os rejeitos, em geral, são mais compressíveis do que solos naturais de consistência similar (*Vick, 1983*). Vários autores já observaram características incomuns de deformação em rejeitos de bauxita, sem falar na acentuada compressão secundária. Como hipóteses explicativas, suspeitam de "creep" individual dos grãos e/ou ligações inter-partículas especiais (*Somogyi & Gray, 1977*). É comum o uso de correlações empíricas para a determinação da compressibilidade, como as determinadas por Stinson (1981), para lamas vermelhas, e Mello(1985) para a mesma lama de lavagem aqui analisada. Na literatura, foram encontrados valores de índice de compressão (inclinação da curva e $x \log \sigma'$) de 0.26 a 0.38, para cargas variando de 50 a 1000 kPa, não sendo informada a duração do carregamento (*Somogyi & Gray, 1977*).

As relações de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos podem ser obtidas a partir dos resultados de ensaios de laboratório, realizados em consolidômetros de lama, que são células de adensamento especiais, nas quais as amostras possuem volume maior que as convencionais. Estes ensaios podem ser por tensão ou deformação controlada e fluxo restrito. Estas mesmas relações podem ser obtidas também através dos resultados de ensaios realizados no campo, como será discutido no próximo capítulo. Juntamente com estas relações vindas destes ensaios mais as soluções numéricas da teoria de adensamento com grandes deformações, é possível otimizar a deposição de rejeitos em lagoas ou reservatórios, permitindo o acompanhamento e monitoramento do seu enchimento, tanto ao longo de sua vida útil quanto após seu abandono (*Mello & Silveira, 1991*).

Ao longo das últimas décadas, têm sido várias as relações de compressibilidade e permeabilidade obtidas experimentalmente para materiais muito moles, como os rejeitos lançados na forma de lama. Além dos modelos constantes e lineares, estas relações tem sido modeladas por funções logarítmicas, exponenciais e potenciais. Algumas delas estão resumidas na Tabela 6.1. Nos ensaios realizados neste trabalho, a função do tipo potencial, como a apresentada por Somogyi (1979) é que tem sido verificada de melhor se ajustar aos resultados e, portanto, mais utilizada.

TABELA 6.1: Algumas Funções Ajustadas à Comportamento de Compressibilidade e Permeabilidade de Solos Muito Moles

REFERÊNCIA	FUNÇÃO DE COMPRESSIBILIDADE	FUNÇÃO DE PERMEABILIDADE
LIU (1990)	$e = e_o - C_c \log_{10} \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)$	$e = e_o + C_k \log_{10} \left(\frac{k}{k_o} \right)$
SOMOGYI (1979)	$e = A\sigma'^B$	$k = Ce^D$
LIU e ZNIDARCIC (1991)	$e = A(\sigma'+Z)^B$	

Na Tabela 6.1, tem-se que:

⇨ C_c - índice de compressão, que é constante para um dado solo;

- ⇨ e - índice de vazios e k , permeabilidade;
- ⇨ σ' - tensão efetiva. O subscrito “ θ ” indica um estado de referência arbitrado;
- ⇨ C_k - constante para um dado solo;
- ⇨ A , B , C , D e Z - coeficientes empíricos determinados experimentalmente.

Os coeficientes de compressibilidade volumétrica de diferentes lamas vermelhas, obtido de ensaios edométricos convencionais, estão reproduzidos na Figura 6.1. Não foi mencionada a origem da lama brasileira, apenas de que teria um limite de liquidez em torno de 43%, um índice de plasticidade de 10% e que a densidade relativa dos grãos seria de 2,6. A Figura 6.2 mostra a diferença na compressibilidade entre algumas lamas vermelhas, sendo que a brasileira apresenta as mesmas características da Figura 6.1.

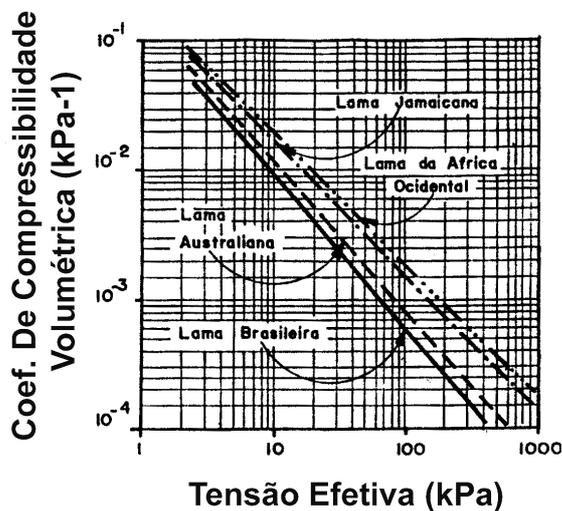


FIGURA 6.1: Comparação Entre Coeficientes de Compressibilidade Volumétrica de Lamas Vermelhas (adaptado de Stinson, 1981)

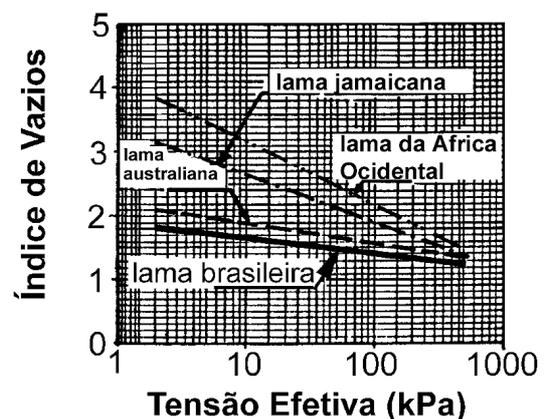


FIGURA 6.2: Comparação Entre a Compressibilidade de Lamas Vermelhas (adaptado de Stinson, 1981)

Uma comparação da compressibilidade de lamas vermelha com outros solos pode ser observada na Figura 6.3, onde também está uma definição do conceito “teor de sólidos”, muito utilizado na indústria e informa a concentração de

partículas sólidas no resíduo. Já na Figura 6.4 estão resultados para a lama de lavagem, obtidos por Lapa & Cardoso (1988). Aí, também está representada por uma linha em traço cheio, o que foi considerado como a média de comportamento dos resíduos ao longo do período analisado (aproximadamente dois anos).

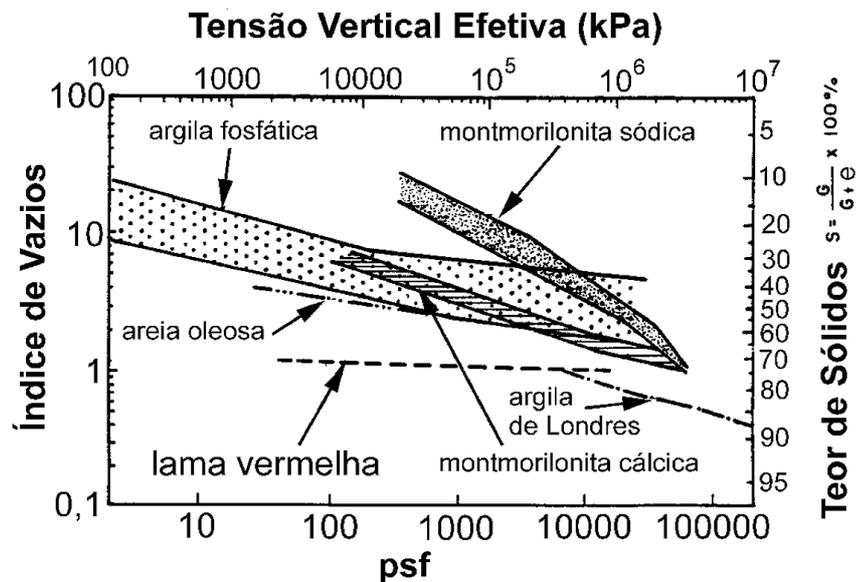


FIGURA 6.3: Compressibilidade de Resíduos Industriais, de Mineração e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1995*).

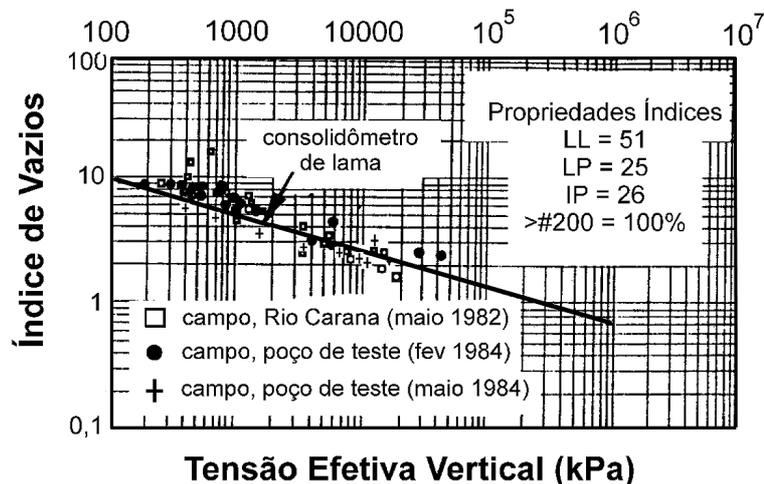


FIGURA 6.4: Compressibilidade de Resíduos Industriais, de Mineração e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1995*).

Mello & Silveira (1991) também apresentaram uma comparação entre diversos tipos de resíduos, entre eles, a lama vermelha. Ela está reproduzida na Figura 6.5 e o que está sendo referenciado como bauxita é, na verdade, a lama de

processamento. A Tabela 6.2 resume as características de cada resíduo. Elias (1995) apresenta um estudo das características de adensamento de lamas vermelhas australianas tipicamente compostas de 50% de fração acima da #200 e 50% abaixo. Segundo ele, o índice de compressibilidade observado do resíduo adensando por peso próprio ficaria em torno de 1,5, não informando a técnica usada para fazer estas observações. Já os valores obtidos em ensaios de laboratório apresentaram valores de 0,4 a 0,8, com média de 0,56. O autor também não informa o tipo de ensaio de adensamento realizado. Segundo ele, o coeficiente de compressão secundária da lama vermelha estaria tipicamente por volta de 0,005. A comparação dos resultados obtidos no campo e no laboratório por Elias (1995) está na Figura 6.6, para as quais o autor também sugere uma função que melhor se ajustou aos dados medidos.

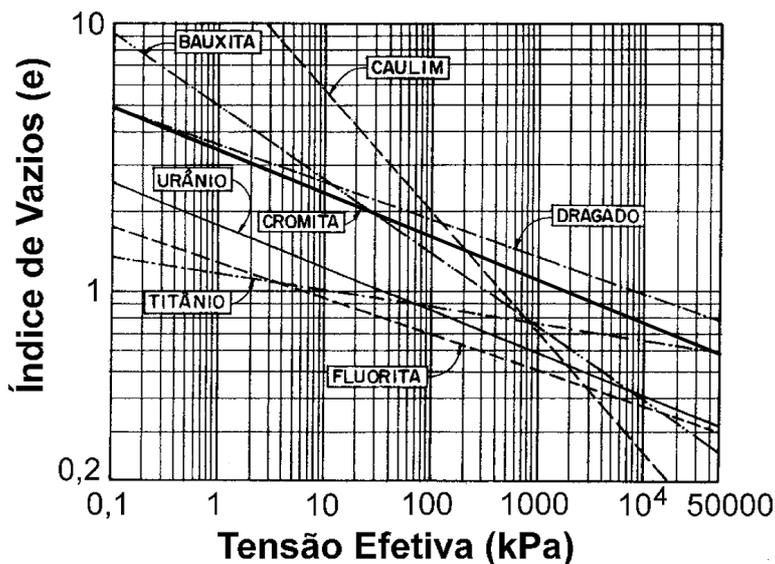


FIGURA 6.5: Comparação entre a Compressibilidade de Diferentes Resíduos Industriais e de Mineração de Mineração (*adaptado de Mello e Silveira, 1991*).

Alves (1992) realizou ensaios de coluna de sedimentação, ensaios de adensamento com fluxo restrito e ensaio de adensamento com deformação controlada na lama vermelha OP neutralizada. As características do resíduo ensaiado naquela ocasião já foram descritas e comparadas anteriormente com as que se usa neste trabalho, também já tendo sido discutido as fontes das eventuais diferenças existentes. Os resultados com relação à compressibilidade podem ser

vistos na Figura 6.7. Percebe-se que os diferentes tipos de ensaio conduzem praticamente à mesma compressibilidade.

TABELA 6.2: Características dos Resíduos Comparados na Figura 6.5.

REJEITO	LL (%)		LP (%)		ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)	Densidade dos grãos
	#40	#200	#40	#200				
urânio	-	34	-	28	8	36	56	2.7
titânio	26.3	30.4	21.4	21.2	1	69	30	3.6
fluorita	37	-	17	-	4	96	0	2.9
cromita	113.9	110.8	38	35.9	2	96	2	2.7
lama vermelha	-	51	-	25	56	44	0	2.9
caulim	53	50	26	25	46	54	0	2.6
Dragado	82	-	31	-	10	45	45	2.5

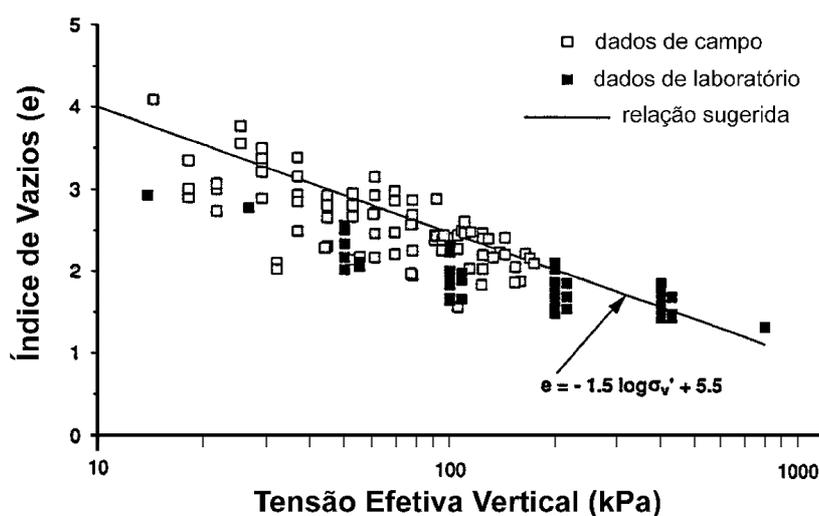


FIGURA 6.6: Compressibilidade de Lamas Vermelhas Australianas (*adaptado de Elias, 1995*).

Santos (2000) também relata investigações realizadas no mesmo resíduo, a lama vermelha OP neutralizada. Através de ensaios de adensamento com deformação controlada, foram ensaiados resíduos coletados em duas regiões distintas dentro do reservatório de disposição. A lama em um dos locais apresentava uma densidade $G = 3,77$ e teor de sólidos iguais a 35% (estação 01). No outro, o resíduo retirado a um metro de profundidade, apresentava uma

densidade $G = 3,55$; teor de sólidos de 37% (estação 02). Os índice de vazios iniciais dos ensaios variaram de 4,39 a 5,27. Os resultados obtidos estão reproduzidos na Figura 6.8. Foram realizadas dois tipos de análise, uma simplificada, descrita em Lima (1996), e outra, rigorosa, descrita por Znidarcic et al. (1986), que fornecem curvas de compressibilidade bastante semelhantes.

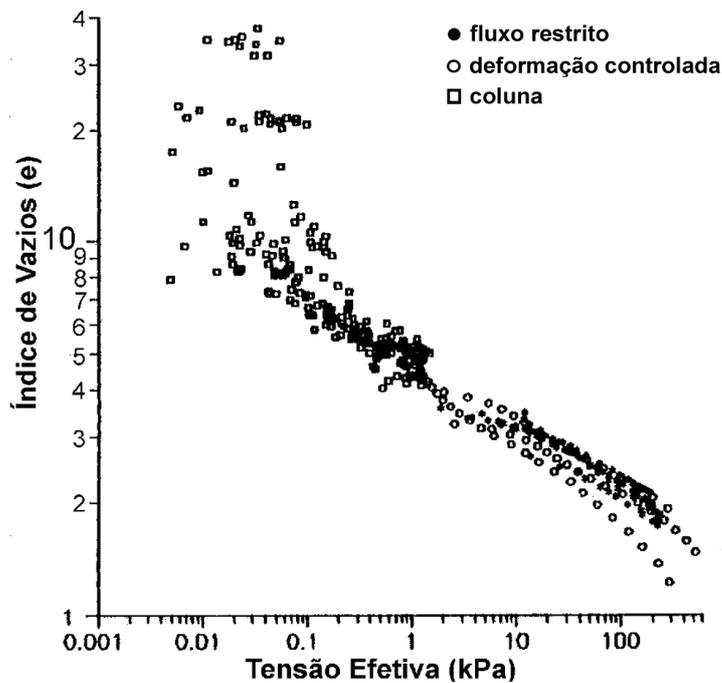


FIGURA 6.7: Compressibilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada. (adaptado de Alves, 1992).

As curvas da parte superior da Figura 6.8, destacadas das demais, foram ensaios realizados com velocidade de 0,35mm/min, considerada alta para o resíduo em questão. Mesmo assim, são paralelas às outras. Todos os outros ensaios foram executados com velocidades inferiores a esta (0,015mm/min e 0,035mm/min). As duas curvas do limite inferior correspondem a ensaios realizados em amostras da estação 02, com velocidade de 0,015mm/min, uma referente à interpretação dita rigorosa e a outra, simplificada.

Santos (2000) também ensaiou a mesma lama vermelha OP neutralizada em ensaios de adensamento induzido por forças de percolação (HCT). Nesta técnica, uma taxa de fluxo é imposta à amostra pela retirada de água da sua parte inferior por uma bomba. A amostra adensa devido ao fluxo descendente imposto, sendo

que a diferença de pressão através dela é medida por um transdutor diferencial de pressão. A mesma taxa de fluxo é mantida até que a diferença de pressão através da amostra (ΔP) seja constante. Posteriormente, ensaios de carregamento em estágios e permeabilidade são realizados com o intuito de obterem-se dados de compressibilidade e permeabilidade em uma faixa de tensão efetiva alta. A Figura 6.9 compara os resultados obtidos pelas duas técnicas, mostrando que se ajustam bem. A curva em linha tracejada e cheia correspondem aos ensaios do tipo HCT, realizados nas estações 01 e 02, respectivamente.

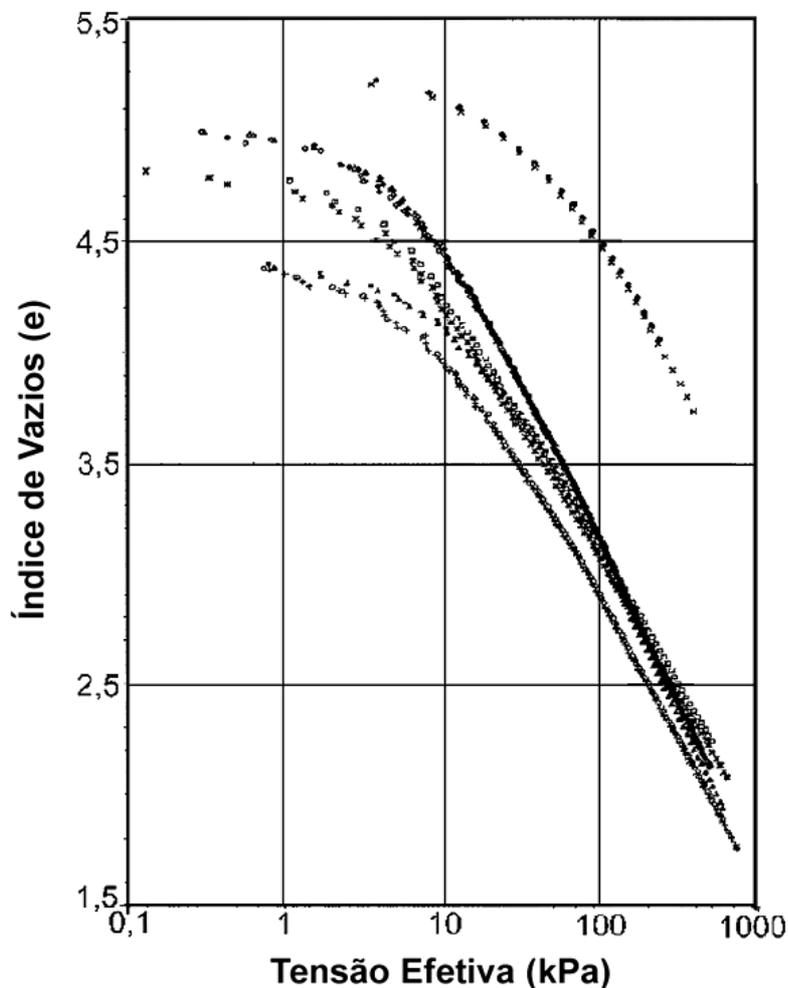


FIGURA 6.8: Resultados de Ensaio do Tipo CRD na Lama Vermelha OP Neutralizada. (adaptado de Santos, 2000).

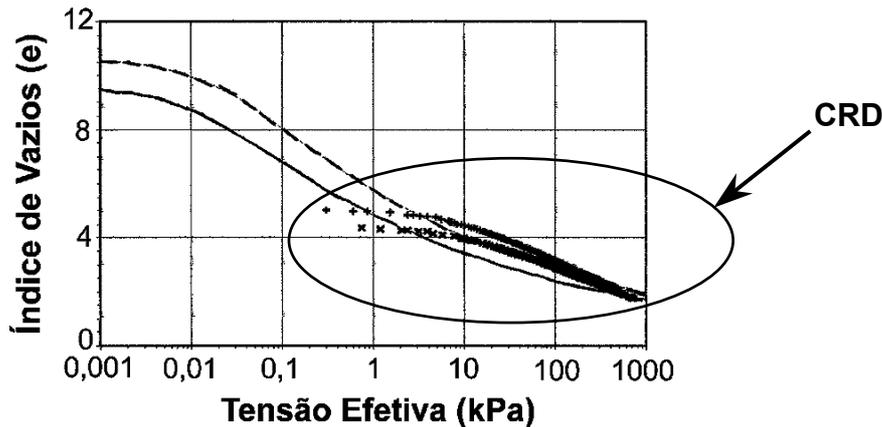


FIGURA 6.9: Comparação Entre Resultados de Ensaio do Tipo CRD e HCT na Lama Vermelha OP Neutralizada (*adaptado de Santos, 2000*).

Botelho (2001) também executou ensaios do tipo HCT na lama vermelha OP neutralizada. As amostras utilizadas possuíam uma densidade relativa dos grãos de 3,65, e eram compostas de 30% de fração tamanho argila, 20% de silte e 50% de areia fina. O limite de liquidez foi 48% e o índice de plasticidade, 17%. Os ensaios foram executados com índice de vazios inicial de 7,55 e 7,39, equivalente à tensão efetiva zero, correspondente a um teor de sólidos de 32,45 e 31,07%, respectivamente. As amostras, contudo, antes do início do ensaio propriamente dito, tinham índice de vazios respectivamente de 7,60 (ensaio 01) e 8,10 (ensaio 02). Foram atingidos índices da vazios ao final do ensaio de 2,8 e 1,6, para tensão efetiva de aproximadamente 50kPa. Para o ensaio 02 foram aplicados maiores gradientes hidráulicos, o que explica a diferença entre os índices de vazios finais encontrados. Os resultados obtidos estão na Figura 6.10.

Alguns pesquisadores (por exemplo, *Rodrigues, 1987, Somogyi & Gray, 1977*) observando o comportamento de depósitos formados por resíduos de processamento de bauxita, afirmam que eles parecem não obedecer teorias convencionais de adensamento, apresentando na prática, compressibilidades menores do que as teóricas. Uma das causas, segundo Rodrigues (1987), poderia ser a existência de uma aderência de natureza química entre partículas que restringe o índice de vazios final a um valor limite, reduzindo a capacidade de armazenamento. Observações de campo sugerem a utilização de uma maior concentração inicial de sólidos no lançamento, o que poderia aumentar o recalque

final do depósito e levar a uma redução de 30 a 40% no volume final a ser armazenado, independente das condições de drenagem do lago.

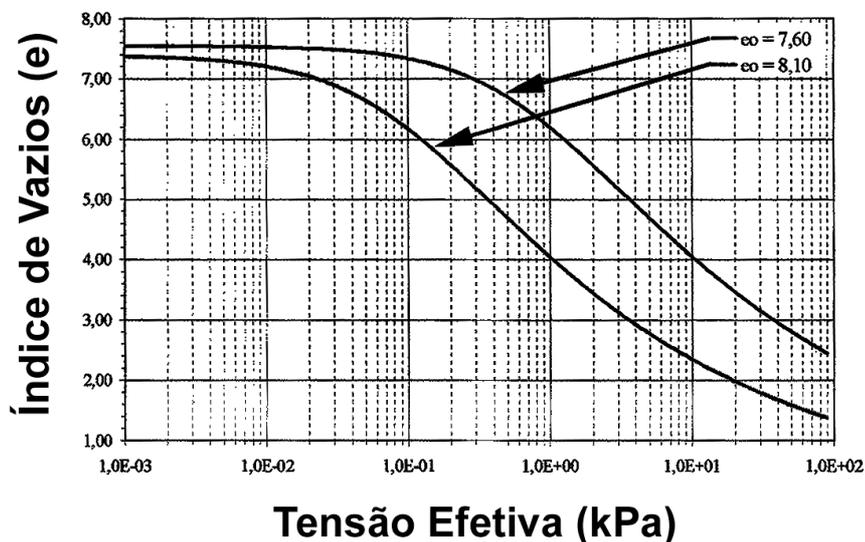


FIGURA 6.10: Resultados de Ensaio do Tipo HCT na Lama Vermelha OP Neutralizada (adaptado de Botelho, 2001).

Alguns autores não consideram eficaz a incorporação de bases drenantes para aceleração do processo de consolidação, alegando que a formação de camadas de baixa permeabilidade logo na interface inferior devido às maiores pressões, reduz a eficiência dos drenos (Mello *et al.*, 1987, analisando lago de armazenagem de lama de lavagem).

Somogyi & Gray (1977) calcularam coeficientes de adensamento de 10^{-3} a 5×10^{-2} cm^2/seg para lamas vermelhas do Estados Unidos, por meio de ensaios edométricos convencionais. Elias (1995), também por meio de ensaios convencionais, chegou a valores de coeficientes de adensamento variando de 5 a $30 \text{ m}^2/\text{ano}$, tendo sido considerado $20 \text{ m}^2/\text{ano}$ como o valor médio. Na Figura 6.11 estão valores obtidos por Stinson (1981) para lamas vermelhas de diferentes regiões, por meio de ensaios com tensão controlada. Ele também reporta que com base nos resultados vindos deste tipo de ensaio, conseguiu boas previsões de recalque em relação ao comportamento das lamas australiana e jamaicana.

A determinação da permeabilidade já é um tanto mais complicada, já que exige ensaios com gradientes hidráulicos muito pequenos para não provocar a ruptura da estrutura do material. Isto agora pode ser obtido com maior facilidade através do ensaio do tipo HCT, e provavelmente, as curvas de permeabilidade deste tipo de ensaio poderão ser consideradas uma boa referência. Ainda hoje, de uma maneira geral, este parâmetro tem sido normalmente obtido pelo uso de correlações empíricas, que também variam dentro do lago devido à segregação e exposição de algumas de suas regiões ao ressecamento devido a flutuações do nível do líquido sobrenadante, conferindo comportamento particular ao resíduo desta região do reservatório. Não há consenso entre se adotar o material como isotrópico ou valores diferentes para as direções vertical e horizontal.

Os mesmos autores citados anteriormente com relação às curvas de compressibilidade, também fizeram determinações de permeabilidade, que serão apresentadas à seguir. A Figura 6.12 mostra os valores obtidos por Stinson (1981) à partir de ensaios por tensão controlada. Na Figura 6.13 está uma comparação entre permeabilidades de diversos resíduos, obtidas à partir de ensaios com deformação controlada e já considerando a teoria do adensamento com grandes deformações.

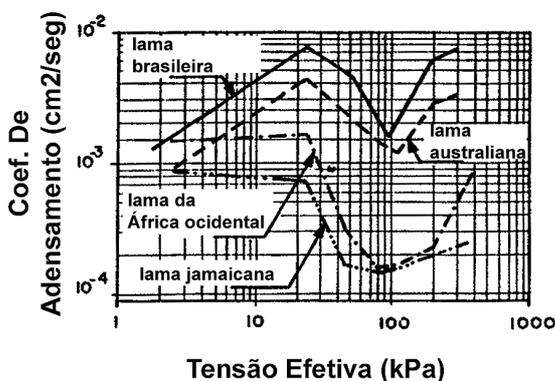


FIGURA 6.11: Coef. de Adensamento de Lamas Vermelhas Obtidos de Ensaio Convencionais (apud de Stinson, 1981).

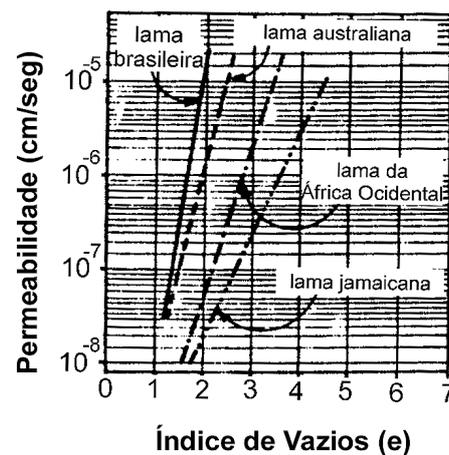


FIGURA 6.12: Permeabilidade de Lamas Vermelhas Obtidas de Ensaio Com Tensão Controlada (adaptado de Stinson, 1981).

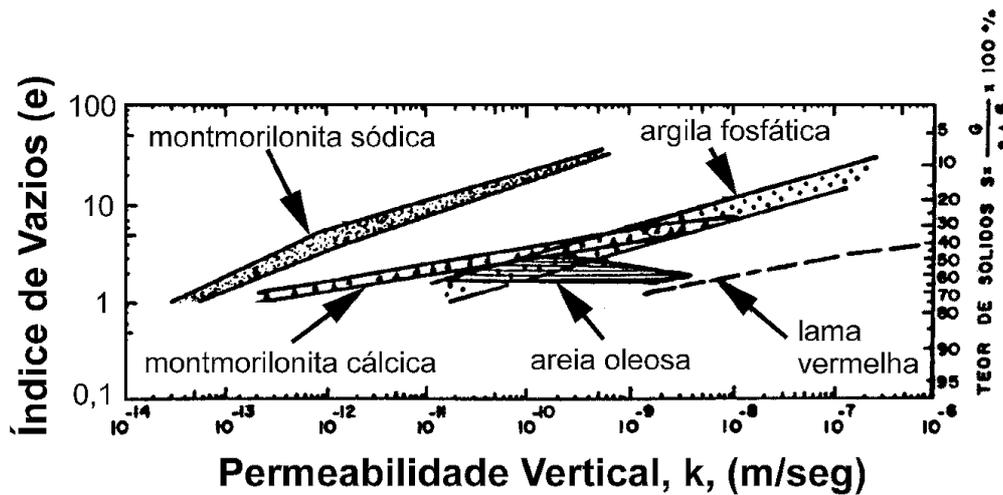


FIGURA 6.13: Comparação Entre Permeabilidades de Rejeitos e Argilas Remoldadas (adaptado de Mello, 1985).

A permeabilidade da lama de lavagem aqui analisada, obtida por outros pesquisadores, pode ser vista na Figura 6.14. Uma outra comparação entre a permeabilidade de lamas vermelhas em relação a outros resíduos pode ser vista na Figura 6.15. As características dos materiais comparados são aquelas apresentadas na Tabela 6.2. Os resultados obtidos por Elias (1995) para lamas Australianas estão na Figura 6.16, bem como a função que melhor se ajustou aos pontos.

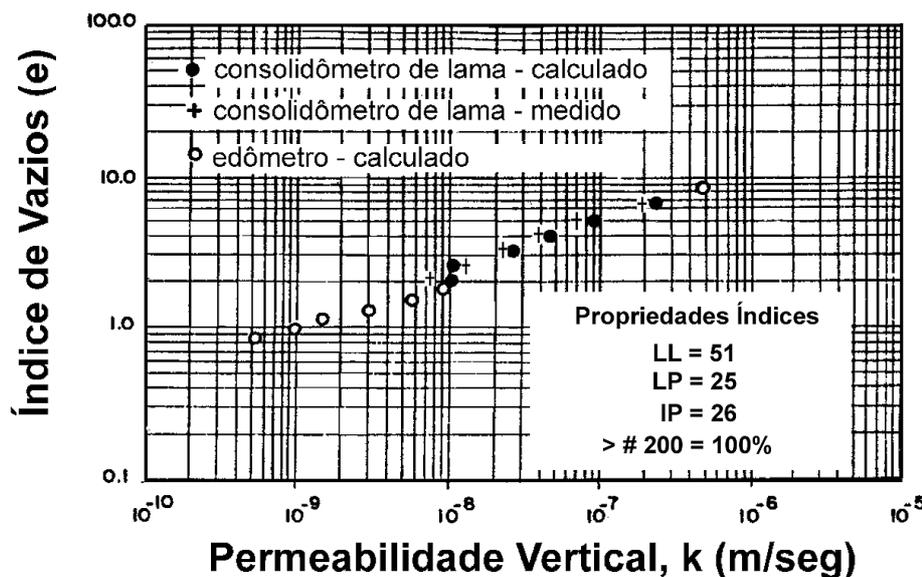


FIGURA 6.14: Permeabilidade de Rejeitos de Lavagem de Bauxita (adaptado de Lapa & Cardoso, 1988).

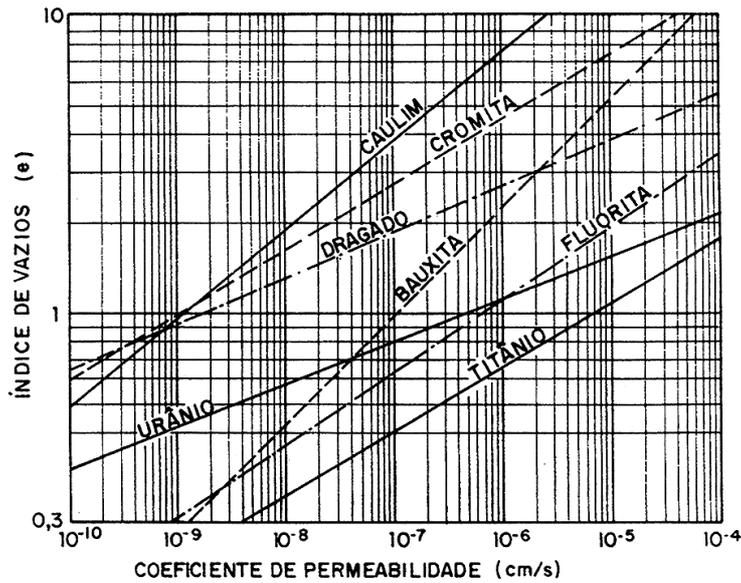


FIGURA 6.15: Comparação entre a Permeabilidade de Diferentes Resíduos Industriais e De Mineração (adaptado de Mello & Silveira, 1991).

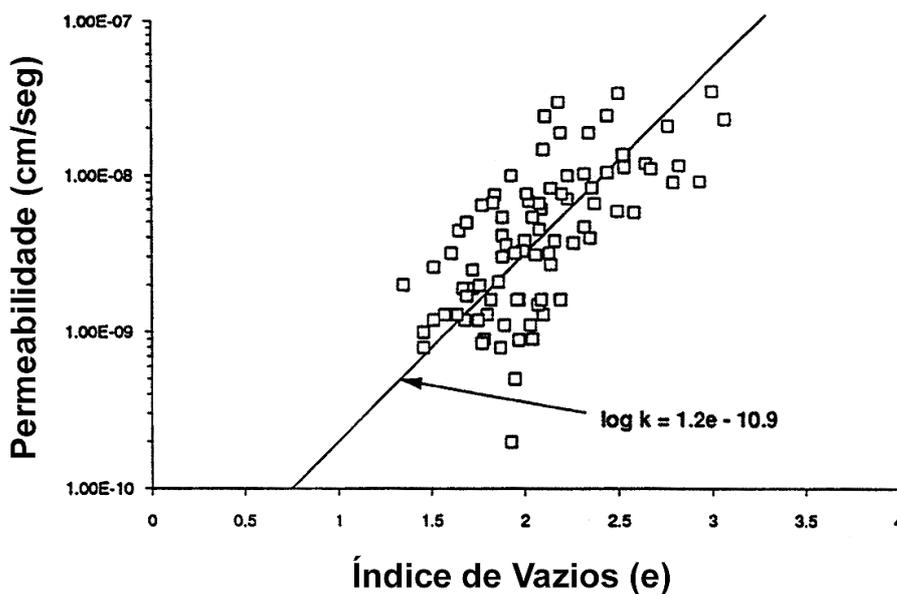


FIGURA 6.16: Permeabilidade de Lamas Vermelhas Australianas (apud de Elias, 1995)

A comparação feita por Alves (1992) entre resultados de permeabilidade obtidos de ensaios de coluna e do tipo CRD para a lama vermelha OP neutralizada está reproduzida na Figura 6.17. O cálculo da permeabilidade dos dados vindos do CRD foram feitos pela metodologia simplificada proposta por Martinez et al. (1987), e se ajustou bem aos valores dos ensaios de coluna.

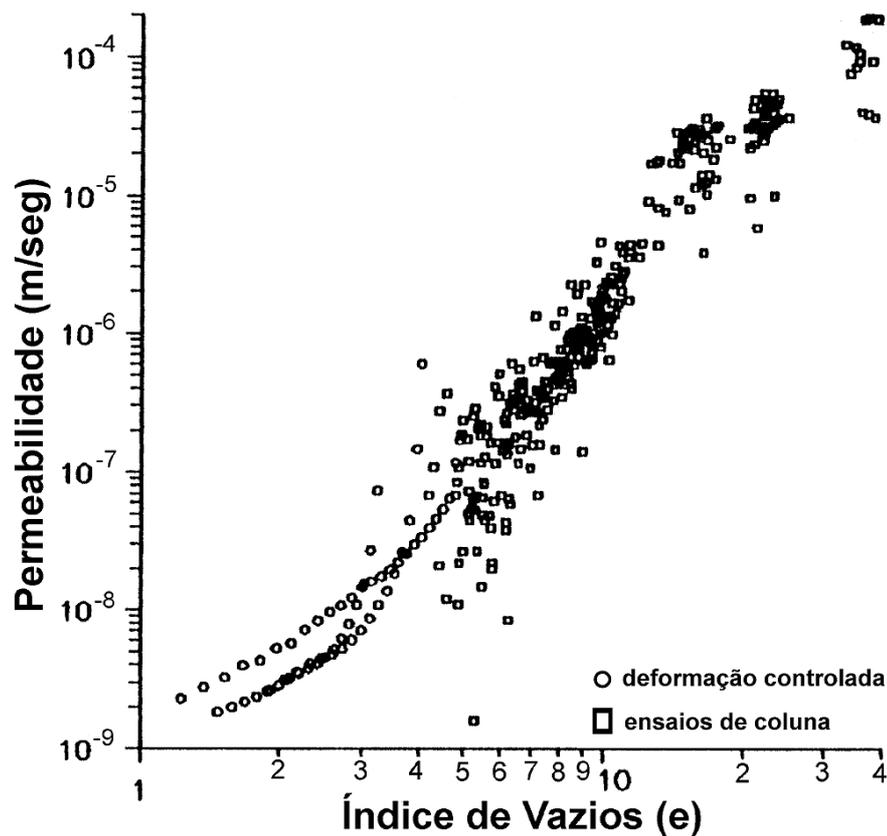


FIGURA 6.17: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida Por Ensaios de Coluna E Deformação Controlada (*adaptado de Alves, 1992*).

Os resultados medidos por Santos (2000) para o mesmo resíduo utilizado por Alves (1992), ou seja, a lama vermelha OP neutralizada, obtidos de ensaios CRD e ensaios HCT podem ser vistos na Figura 6.18. Aí estão os resultados do CRD calculados somente pela análise rigorosa para as duas estações amostradas. É interessante notar que os cálculos feitos com base na análise simplificada dos resultados vindos do ensaios de deformação controlada se ajustaram melhor aos resultados do HCT que os calculados pela análise mais rigorosa, como pode ser percebido pela Figura 6.19, onde só estão mostrados dados obtidos para uma das estações. Mesmo assim, a discrepância entre os valores fornecidos pelas duas técnicas em relação a este parâmetro já é grande, independente da forma de análise do ensaio do tipo CRD. Pelo fato do HCT englobar valores de medição direta, é provável de estar mais próximo do real. Os resultados dos ensaios do tipo HCT executados por Botelho (2001) também na lama vermelha OP neutralizada, estão na Figura 6.20.

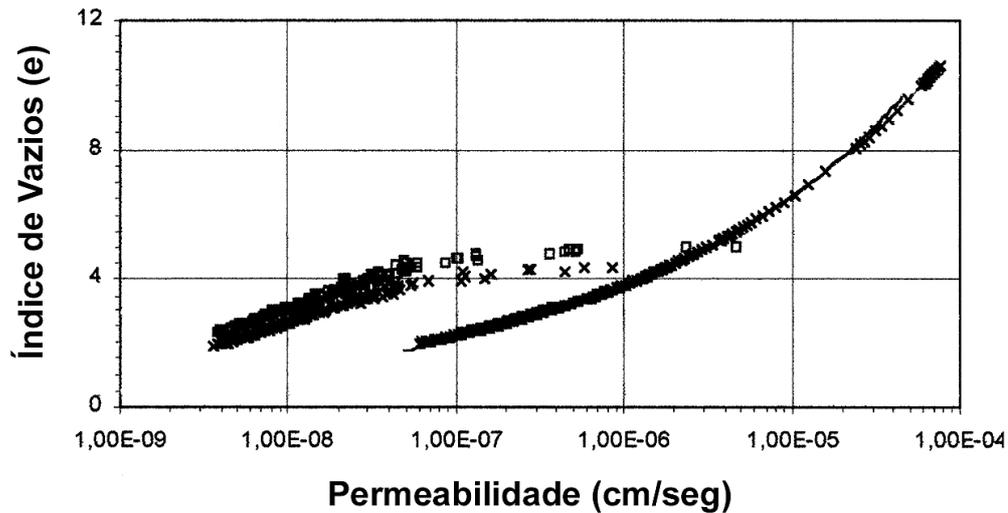


FIGURA 6.18: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaio do Tipo HCT e CRD Análise Rigorosa (*adaptado de Santos, 2000*).

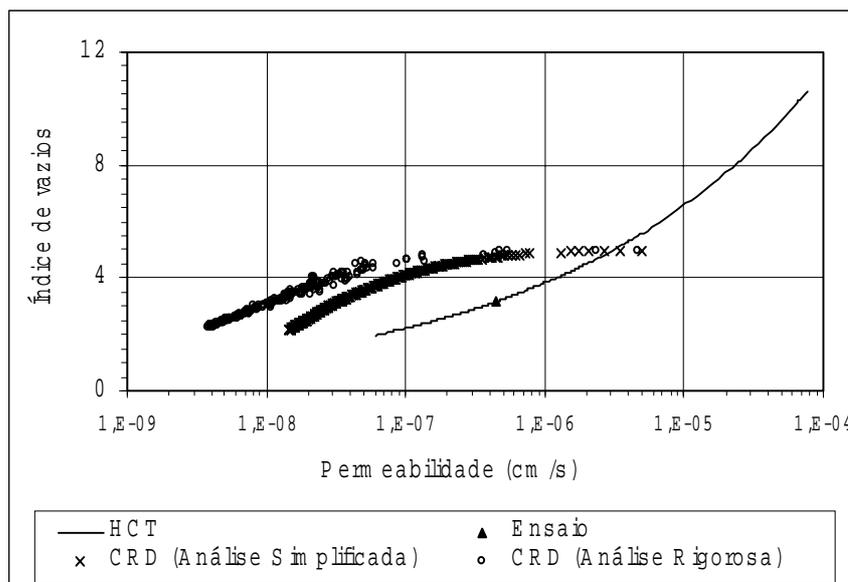


FIGURA 6.19: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaio do Tipo HCT e CRD – Análise Simplificada e Rigorosa (*Santos, 2000*).

Para que pudesse ser feita uma comparação direta, mesmo que um tanto grosseira, entre todos os resultados obtidos para a lama vermelha OP neutralizada, os dados foram resumidos em um único gráfico. O de compressibilidade está na Figura 6.21. Os dados referentes a Alves (1992) foram tomados como uma reta média entre os valores de ensaio de fluxo restrito e os do tipo CRD. Pode se perceber uma concordância bem razoável, ainda mais se for levado em conta

algumas diferenças físicas entre as amostras utilizadas, como a densidade relativa dos grãos por exemplo. Todas as curvas tiveram sua inclinação muito semelhante uma em relação às outras, indicando a proximidade do coeficiente de compressão fornecida por elas.

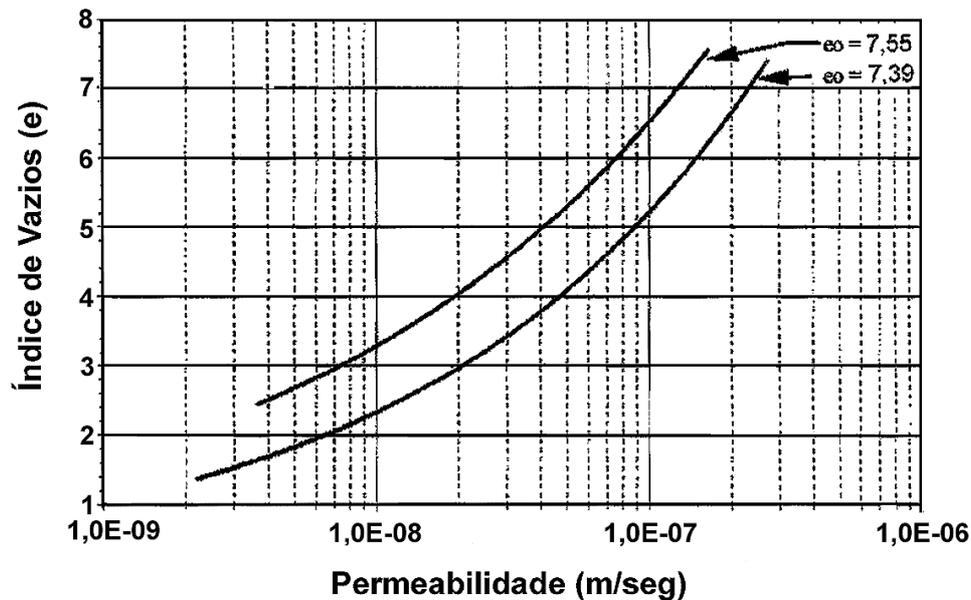


FIGURA 6.20: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaio do Tipo HCT (adaptado de Botelho, 2001).

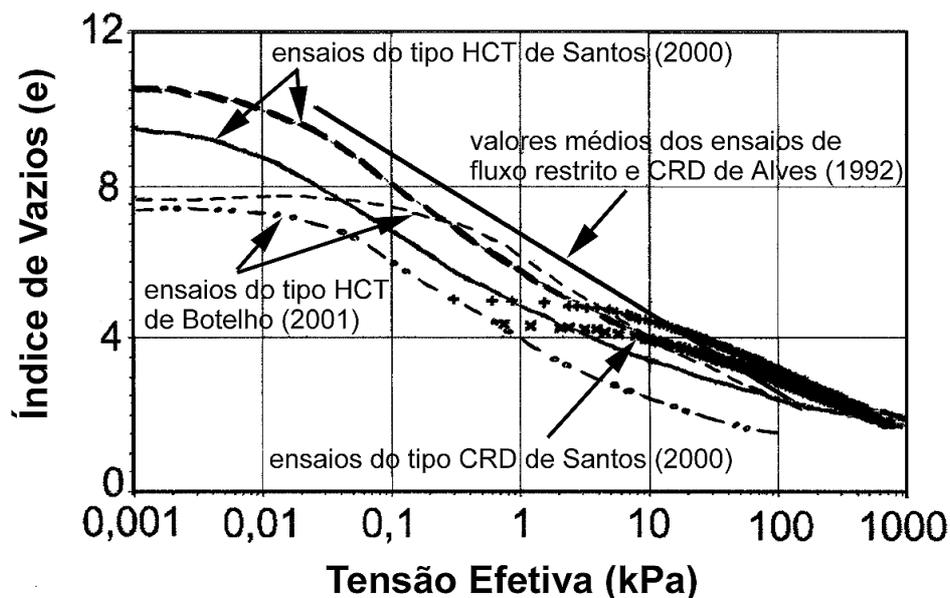


FIGURA 6.21: Curvas de Compressibilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada: Comparação Entre Resultados de Diferentes Ensaio.

Para a permeabilidade, a comparação está na Figura 6.22, entre os valores medidos por Alves (1992) e os resultados do ensaio HCT de Santos (2000) e Botelho (2001). A concordância entre eles é igualmente muito razoável, sendo que neste caso, até os valores obtidos pelos ensaios do tipo CRD, interpretados pelo método simplificado proposto por Martinez et al. (1987) se ajustando muito bem aos do HCT. Os resultados dos ensaios CRD de Santos (2000) calculados pela análise rigorosa proposta por Znidarcic et al. (1986) estariam em uma região inferior do gráfico (menores permeabilidades), fora da escala apresentada.

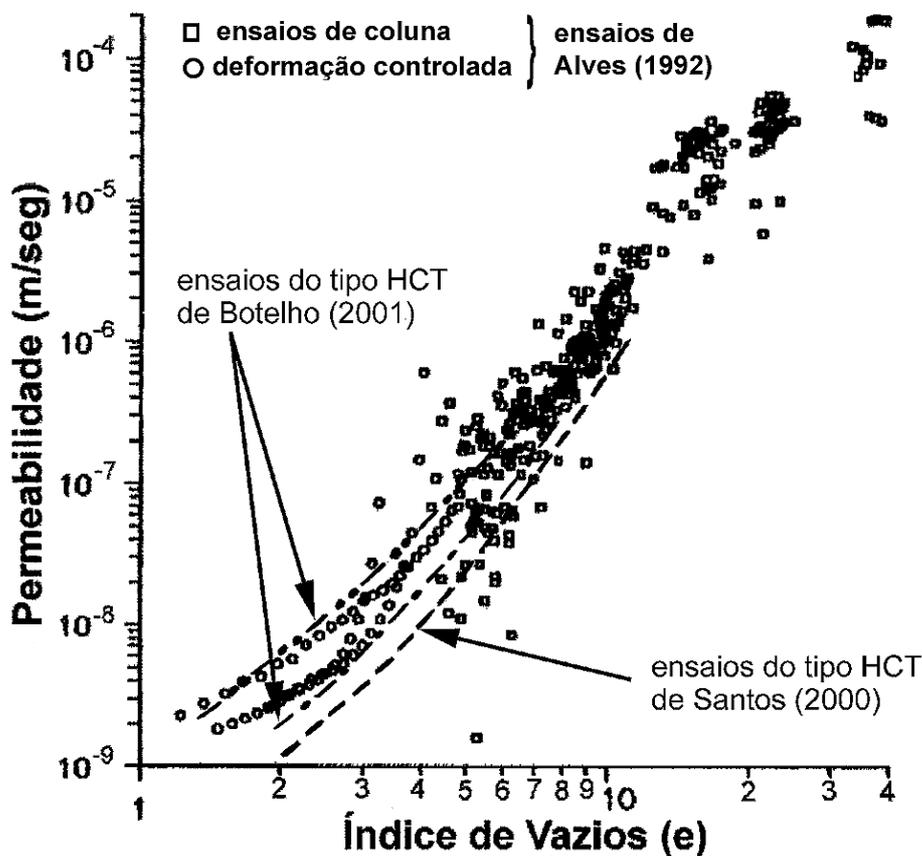


FIGURA 6.22: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada: Comparação Entre Resultados de Diferentes Ensaio.

Devido a esta ótima concordância entre os resultados apresentados, foi decidido não se acrescentar aqui outros resultados obtidos em ensaios especialmente realizados para esta pesquisa na lama vermelha OP neutralizada, já que em uma primeira análise, eles também estão se ajustando bem com os anteriormente

apresentados. O mesmo se diz à respeito da lama vermelha OP não neutralizada, especialmente com relação à compressibilidade. Com relação à permeabilidade, foram poucos os ensaios executados na lama vermelha OP não neutralizada que já foram analisados. Mas até agora, há uma forte indicação de também apresentam tendência similar à das relações já mostradas. Assim, nesta análise inicial, é tido como satisfatório para uma primeira aproximação considerar as curvas de compressibilidade e permeabilidade saturada das lamas neutralizada e cáustica da região de Ouro Preto como únicas e representadas pelas Figuras 6.21 e 6.22.

À seguir, serão apresentados apenas os ensaios realizados considerados necessários para a definição das leis de compressibilidade e permeabilidade saturada dos outros resíduos de mineração e processamento de bauxita aqui estudados, ou seja, a lama de lavagem, a lama vermelha SL e a lama vermelha PC.

6.3

Descrição de Alguns dos Ensaios de Adensamento Realizados

Como já mencionado anteriormente, basicamente só foi feito uso do ensaio de adensamento por deformação controlada ao longo deste trabalho. Alguns poucos ensaios de adensamento convencional foram executados com o objetivo de se atingir níveis maiores de tensão e para verificar a compressão secundária da lama vermelha OP neutralizada, mas também não serão apresentados nesta primeira análise.

Mesmo com seu uso bastante disseminado, o ensaio do tipo CRD não dispõe ainda de um critério bem definido para o cálculo das velocidades, ou seja as taxas de carregamento que podem ser usadas ao longo do experimento. Pela Figura 6.8, que mostra resultados deste ensaio realizado com diferentes velocidades na lama vermelha OP neutralizada, pode se ter uma noção como a influência deste fator pode ser significativa. Discussões sobre o assunto podem ser encontradas em Martins et al. (1990); Carvalho et al. (1993) e Leroueil (1996), por exemplo. Segundo Sheahan & Watters (1997), algumas outras questões com relação ao

ensaio CRD ainda permanecem sem respostas, como por exemplo, a natureza da distribuição do excesso de poropressão da amostra e sobre as correlações entre o comportamento de adensamento de campo e os ensaios CRD, executados geralmente em taxas muito mais elevadas que as encontradas “in situ”.

Para determinação da velocidade de ensaio, em geral é proposto um controle da relação entre poropressão na base e a tensão total aplicada, variando de 2 a 5% (Wissa et al., 1971) a 50% (Smith & Wahls, 1969). Para Sheahan & Watters (1997) esta relação não deve ultrapassar 30%. Os métodos de análise, em geral, admitem deformações infinitesimais, como as de Smith & Wahls (1969) e Wissa et al. (1971), mas há aquelas que consideram grandes deformações, como as de Umehara & Zen (1980) e Lee (1981), que tem, por sua vez, a limitação de supor constante o coeficiente de adensamento ao longo do ensaio. Znidarcic et al. (1986) e Mikasa & Takada (1986) desenvolveram uma proposta de análise que admite grandes deformações e coeficiente de adensamento variável. Estas hipóteses são importantes quando se pretende analisar materiais muito moles, como os aqui estudados. De acordo com Tan et al. (1988), o método de Znidarcic et al. (1986) tem o inconveniente de exigir a linearização incremental da teoria de deformações finitas não linear, por negligenciar o peso próprio e adotar a hipótese de trechos de propriedades lineares durante o processo de adensamento, que seriam determinadas por um processo iterativo.

6.3.1

Análise do Ensaio

Barbosa et al. (1996), ao apresentaram as principais características de um edômetro desenvolvido para o ensaio de adensamento em solos muito moles, com taxa de deslocamento constante, fazem a descrição das propostas de análise feita por Znidarcic et al. (1986) e a de Lima (1996), que é baseada em uma abordagem simplificada feita por Martinez et al. (1987). Também Santos (2000) e Botelho (2001) apresentam uma descrição detalhada sobre os métodos de análise deste ensaio.

A análise dita rigorosa (a de Znidarcic et al., 1986) parte da equação unidimensional de Gibson et al. (1967). Ela despreza o termo correspondente ao peso próprio e , admitindo uma função do índice de vazios constante em trechos do ensaio e igual a um valor médio, tem-se como condições do ensaio:

$$g(e(z, t)) = g_{\text{médio}} \quad (6.1)$$

$$g_{\text{médio}} \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad 0 \leq z \leq h \text{ e } t > 0 \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{v}{g_{\text{médio}}} \quad z = 0 \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad z = h_z \quad (6.4)$$

condição inicial: $e(z, 0) = e_0$

$$g_{\text{médio}} = \frac{k(e_{\text{médio}})}{\gamma_w (1 + e_{\text{médio}}) \frac{\partial \sigma}{\partial e}} \quad (6.5)$$

onde v é a velocidade do ensaio; h_z é a altura de sólidos da amostra

A solução da equação 6.2 foi apresentada por Özisik (1968). Barbosa et al. (1996) apontam que a análise rigorosa usa o artifício de dividir o tempo total de ensaio em vários intervalos de tempo Δt , como se estivesse executando vários ensaios CRD de curta duração. Com isto, não se teria um grande erro na análise em se considerar $g(e)$ constante e igual ao $g_{\text{médio}}$. Esta aproximação, porém, dependeria da magnitude do índice de vazios no interior da amostra durante cada intervalo Δt , que tem de ser suficientemente pequeno para se conseguir pequenas variações de índices de vazios em função da variação da velocidade do ensaio.

A interpretação do ensaio parte de valores de tensões totais e poropressões medidas, o que permite o cálculo das tensões efetivas. À partir daí, inicia-se um

processo iterativo, no qual se arbitra uma relação inicial entre o índice de vazios e tensões efetivas, que permite o cálculo do índice de vazios no topo e na base para cada intervalo de tempo. Quando a diferença entre a função arbitrada e a calculada estiver dentro de uma tolerância estipulada, considera-se encerrado o processo iterativo e se calcula a relação permeabilidade contra o índice de vazios à partir de valores de $g_{\text{médio}}$ e $e_{\text{médio}}$ na equação 6.5, para cada intervalo de tempo.

A análise simplificada proposta por Martinez et al. (1987) é, de acordo com eles, baseada em princípios básicos da Mecânica dos Solos e usa valores médios de diferentes variáveis com a profundidade. O índice de vazios da amostra no tempo “t” é obtido da altura “h” da amostra no mesmo intervalo de tempo, da altura inicial “ h_0 ” e do índice de vazios inicial, “ e_0 ”:

$$e(t) = \frac{h(1 + e_0)}{h_0} - 1 \quad (6.6)$$

A tensão efetiva média é obtida de valores de tensão efetiva nas localizações dos transdutores de poropressão, sendo obtida da área da curva σ' contra a profundidade z. Eles utilizavam um consolidômetro com vários transdutores de pressão:

$$\sigma' = \frac{(\text{área sob } \sigma'_{xz})}{h} \quad (6.7)$$

Eles recomendam ter pequenos gradientes hidráulicos através da amostra, para manter a hipótese de uniformidade da mesma, o que seria conseguido com baixas velocidades de deformação.

O coeficiente de permeabilidade é obtido à partir da lei de Darcy-Gersevanov. Porém, como não se conhece a velocidade real dos sólidos ao longo da amostra, admitem que ela varie de zero, na base, até a velocidade do pistão, no topo. Trabalham, então, com um valor médio (velocidade do pistão/2), o que levaria à definição da permeabilidade como:

$$k = \frac{\Delta h}{2\Delta t} \times \frac{h\gamma_w}{\Delta u} \quad (6.8)$$

A modificação usada por Lima (1996) foi supor que a poropressão tem uma distribuição parabólica ao longo da amostra, ou seja, uma equação do segundo grau com os coeficientes obtidos pelas condições de contorno. Com isto, chega-se à distribuição de poropressões com a profundidade:

$$u(x) = \frac{2u_{base}}{L}x - \frac{u_{base}}{L^2}x^2 \quad (6.9)$$

onde L é a altura da amostra no tempo t.

À partir daí, a tensão efetiva média seria:

$$\sigma'_{médio}(t) = \sigma_{base} - \frac{2}{3}u_{base} \quad (6.10)$$

e a permeabilidade:

$$k_{médio}(t) = \frac{vh(t)\gamma_w}{2u_{base}(t)} \quad (6.11)$$

Barbosa e outros (1996) fizeram uma comparação entre as análises de Znidarcic et al. (1986) e a aproximação de Martinez et al. (1987) como sugerida em Lima (1996). Eles concluíram que as curvas de compressibilidade obtidas com as duas análises eram praticamente idênticas, mas as curvas de permeabilidade, não, principalmente para menores índices de vazios. Porém, nos ensaios realizados por Lima (1996) e que serviram de base para a comparação, foi observada uma queda de poropressões no final do teste e isso deve ser a causa principal na diferença notada entre as duas análises, já que elas se distanciavam justamente ao final do ensaio, ou seja, a menores índices de vazios. Nos ensaios realizados para esta pesquisa, foi verificada que a queda de poropressões ao final do ensaio estava ligada a uma saturação inadequada do sistema de ligação com os transdutores de poropressão ou ainda, a pequenos vazamentos, e que levaram a imprecisões significativas na análise, confirmadas com uma repetição dos testes em amostras idênticas, após sanado os problemas.