

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.

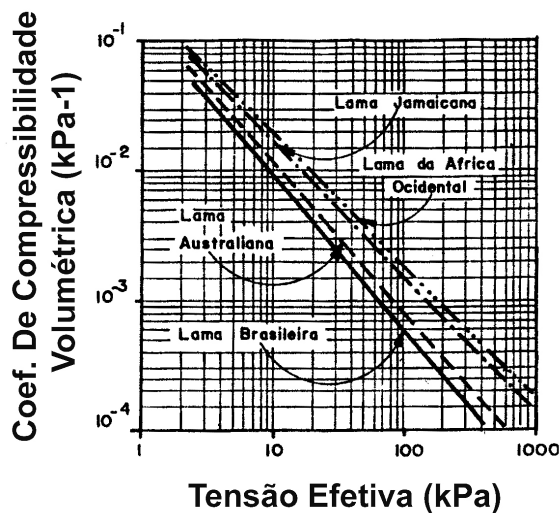


FIGURA 6.1: Comparação Entre Coeficientes de Compressibilidade Volumétrica de Lamas Vermelhas (adaptado de Stinson, 1981)

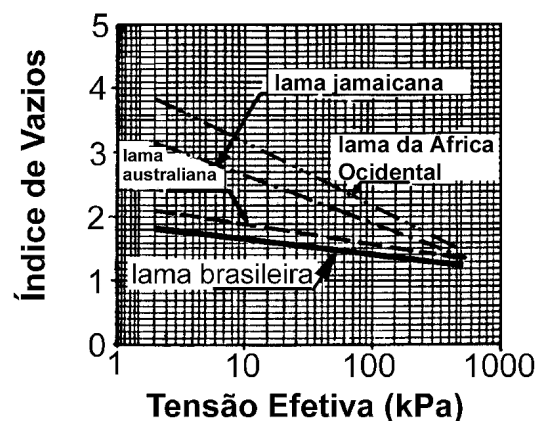


FIGURA 6.2: Comparação Entre a Compressibilidade de Lamas Vermelhas (adaptado de Stinson, 1981)

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).

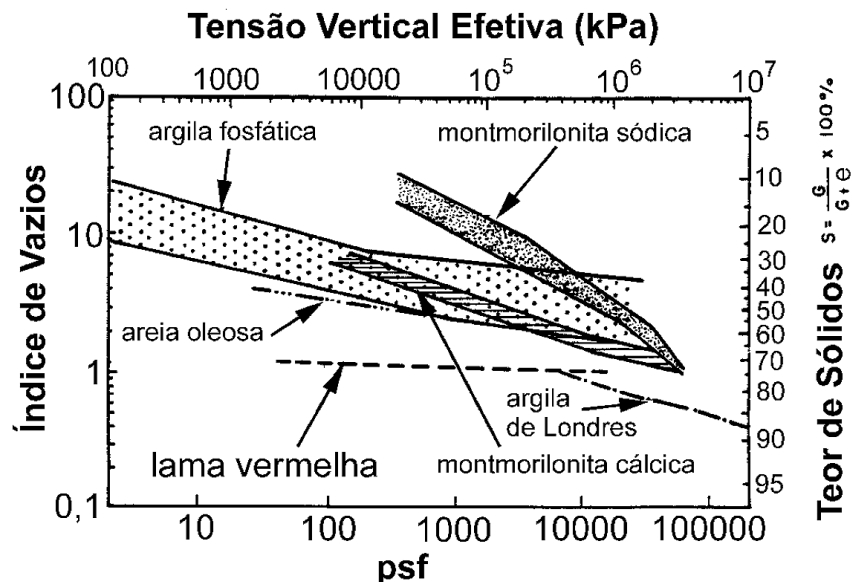


FIGURA 6.3: Compressibilidade de Resíduos Industriais, de Mineração e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1995*).

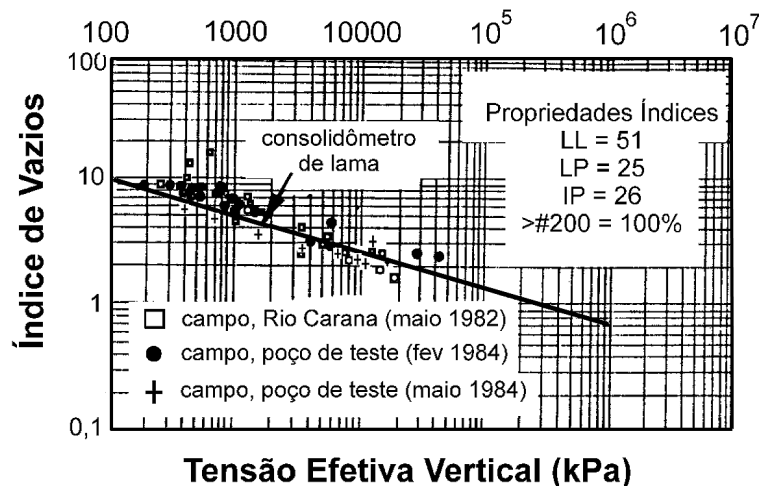


FIGURA 6.4: Compressibilidade de Resíduos Industriais, de Mineração e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1995*).

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.

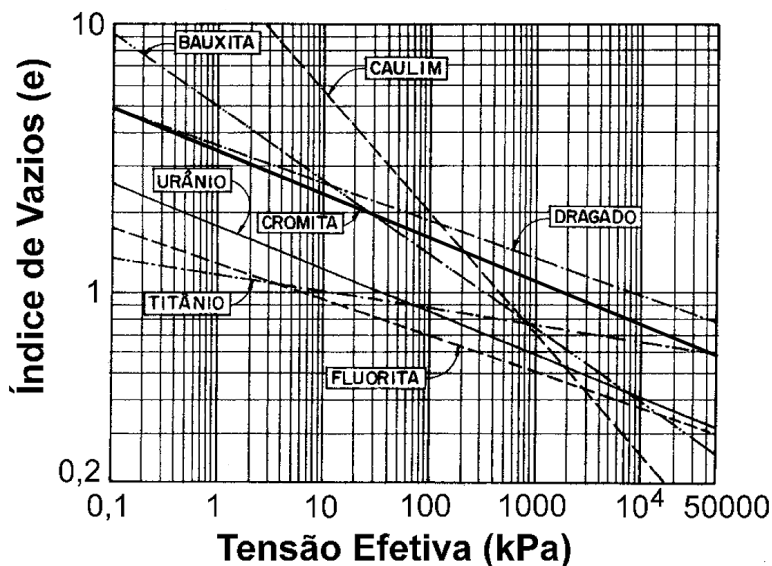


FIGURA 6.5: Comparação entre a Compressibilidade de Diferentes Resíduos Industriais e de Mineração de Mineração (*adaptado de Mello e Silveira, 1991*).

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

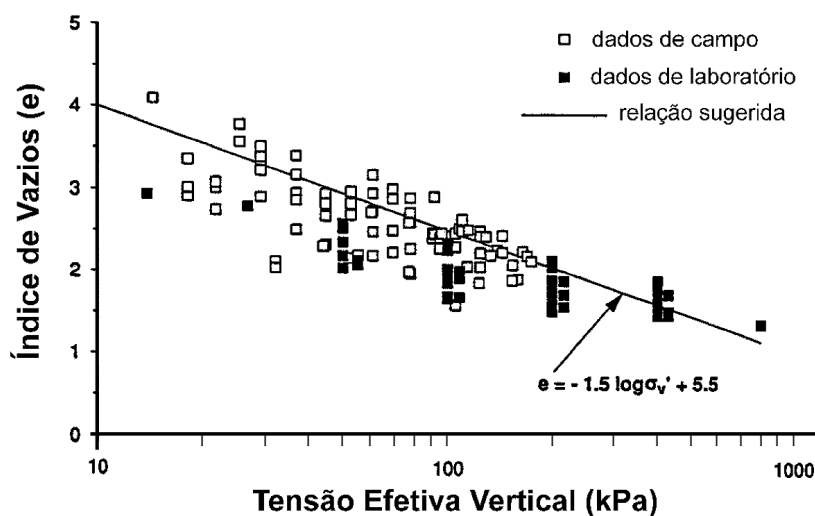


FIGURA 6.6: Compressibilidade de Lamas Vermelhas Australianas (*adaptado de Elias, 1995*).

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.

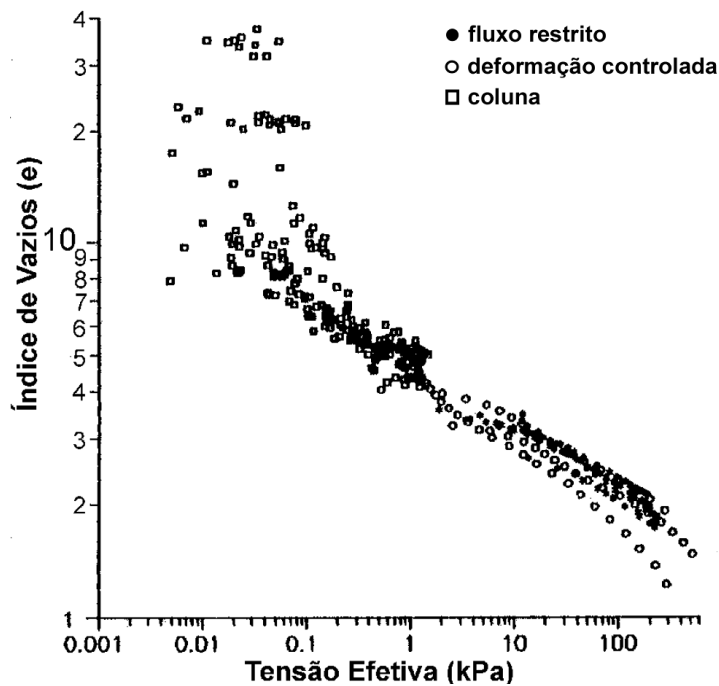


FIGURA 6.7: Compressibilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada. (adaptado de Alves, 1992).

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.

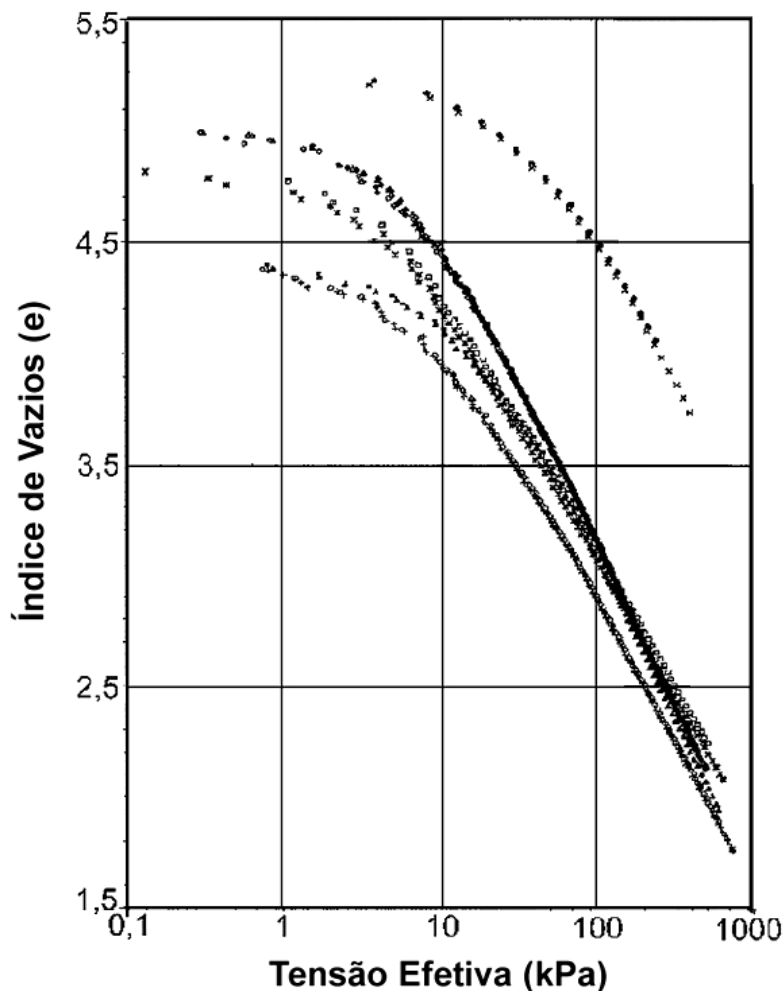


FIGURA 6.8: Resultados de Ensaio do Tipo CRD na Lama Vermelha OP Neutralizada. (adaptado de Santos, 2000).

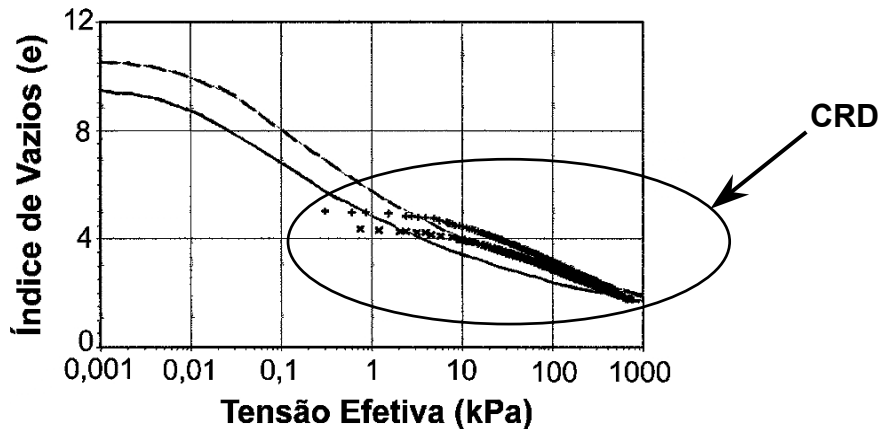


FIGURA 6.9: Comparação Entre Resultados de Ensaio do Tipo CRD e HCT na Lama Vermelha OP Neutralizada (*adaptado de Santos, 2000*).

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.

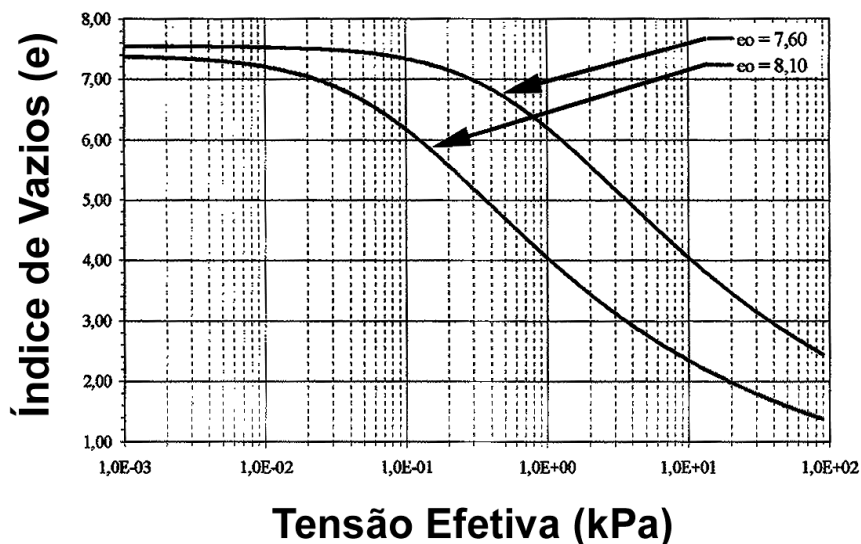


FIGURA 6.10: Resultados de Ensaio do Tipo HCT na Lama Vermelha OP Neutralizada (adaptado de Botelho, 2001).

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.

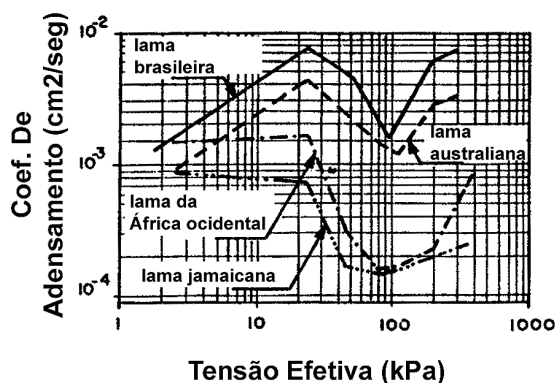


FIGURA 6.11: Coef. de Adensamento de Lamas Vermelhas Obtidos de Ensaio Convencionais (apud de Stinson, 1981).

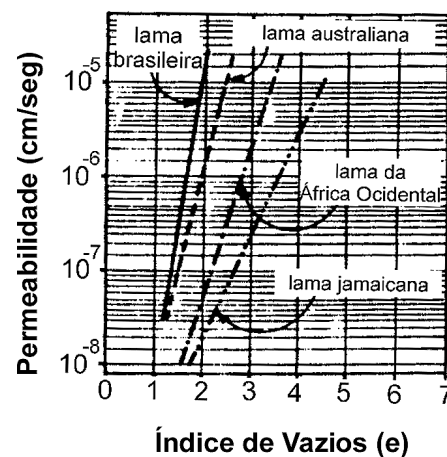


FIGURA 6.12: Permeabilidade de Lamas Vermelhas Obtidas de Ensaio Com Tensão Controlada (adaptado de Stinson, 1981).

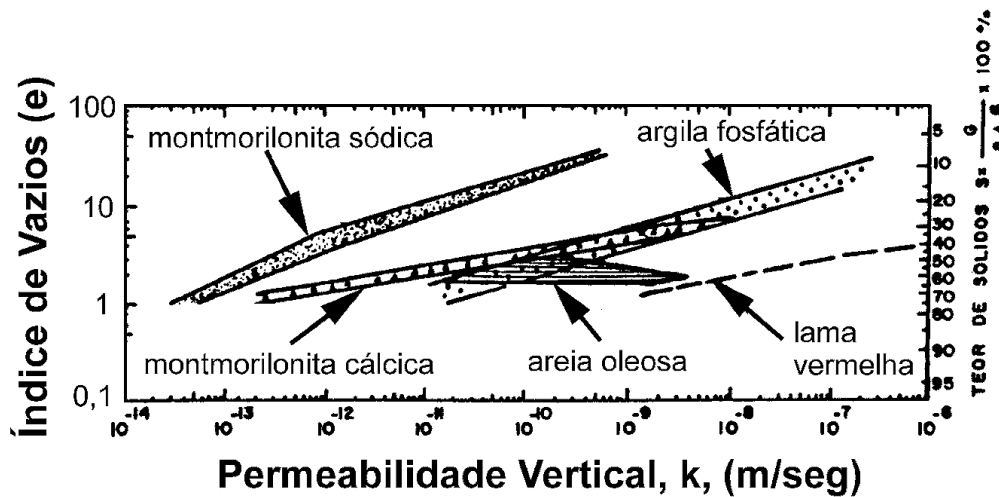


FIGURA 6.13: Comparação Entre Permeabilidades de Rejeitos e Argilas Remoldadas (adaptado de Mello, 1985).

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.

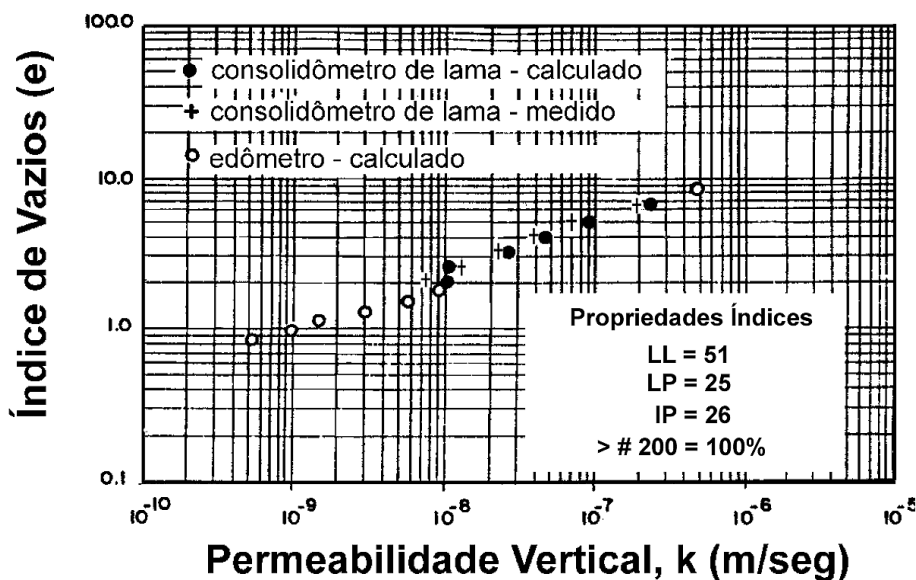


FIGURA 6.14: Permeabilidade de Rejeitos de Lavagem de Bauxita (adaptado de Lapa & Cardoso, 1988).

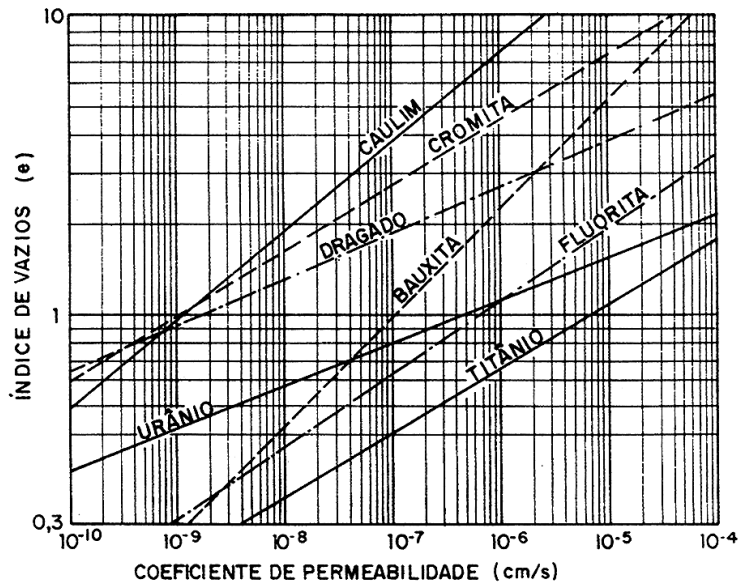


FIGURA 6.15: Comparação entre a Permeabilidade de Diferentes Resíduos Industriais e De Mineração (adaptado de Mello & Silveira, 1991).

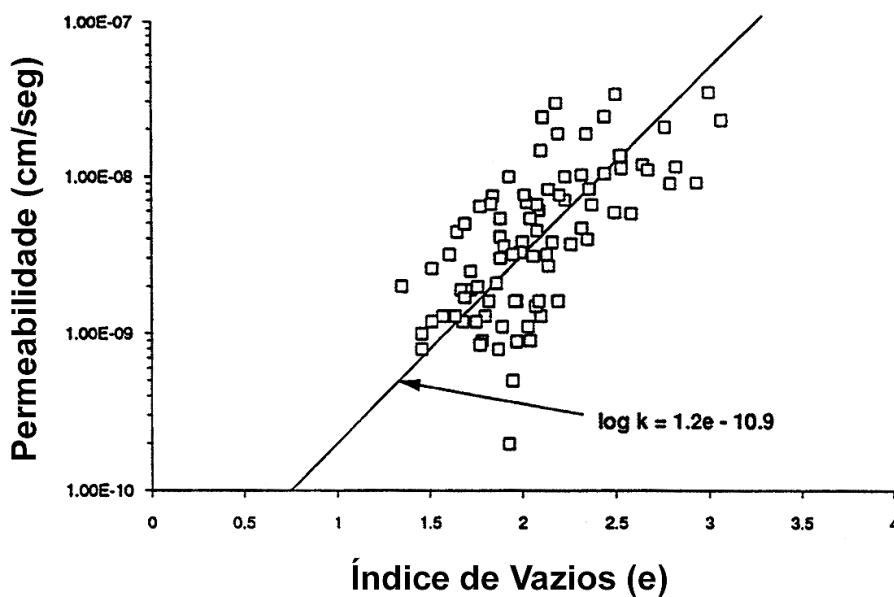


FIGURA 6.16: Permeabilidade de Lamas Vermelhas Australianas (apud de Elias, 1995)

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.

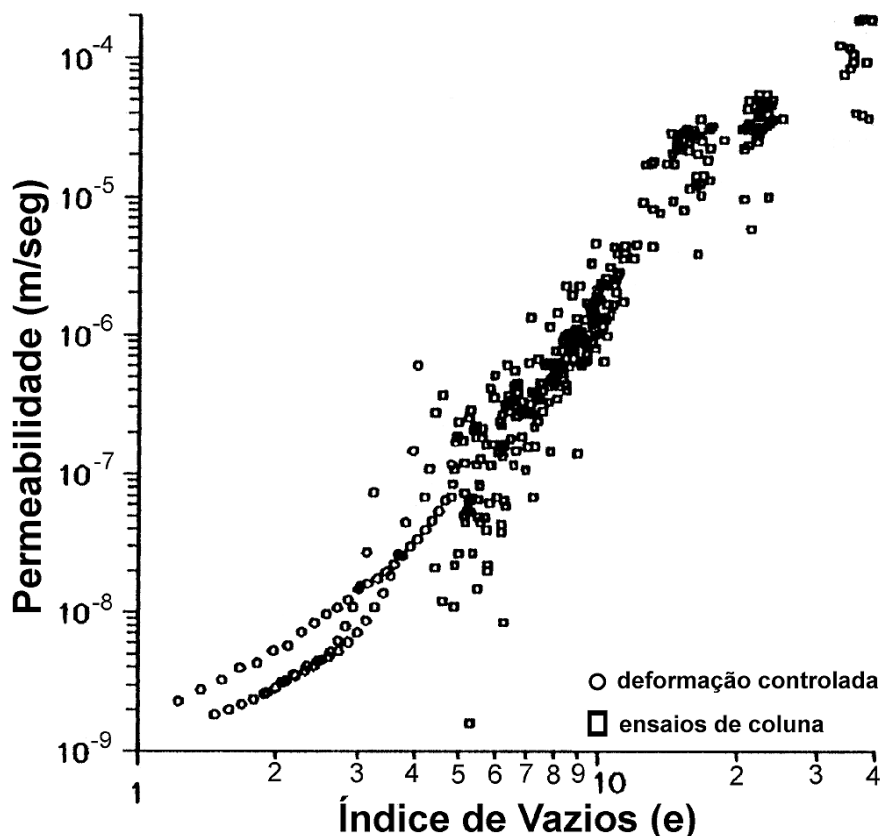


FIGURA 6.17: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida Por Ensaios de Coluna E Deformação Controlada (*adaptado de Alves, 1992*).

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.

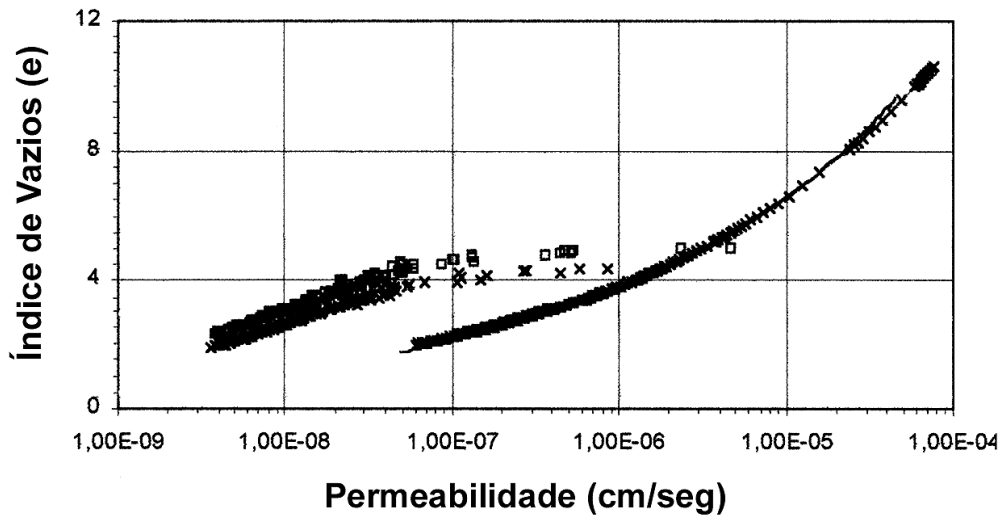


FIGURA 6.18: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaios do Tipo HCT e CRD Análise Rigorosa (*adaptado de Santos, 2000*).

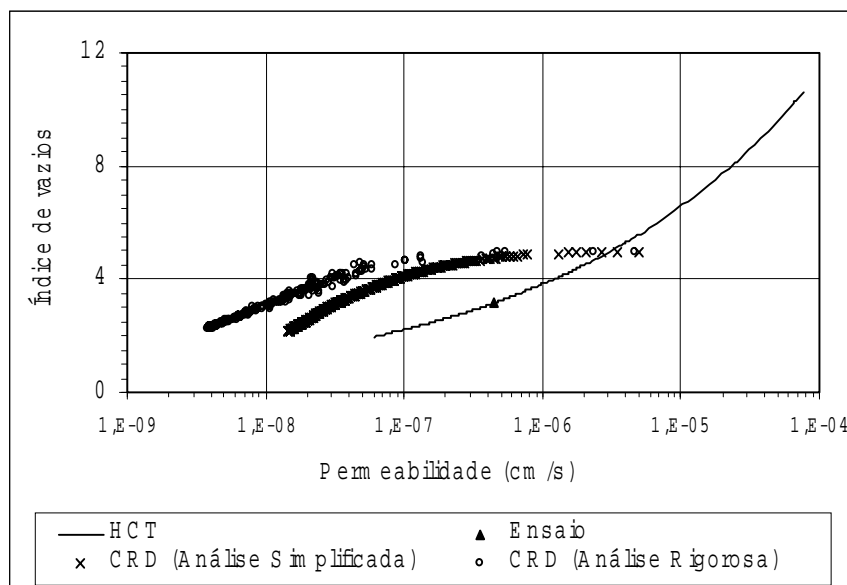


FIGURA 6.19: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaios do Tipo HCT e CRD – Análise Simplificada e Rigorosa (*Santos, 2000*).

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.

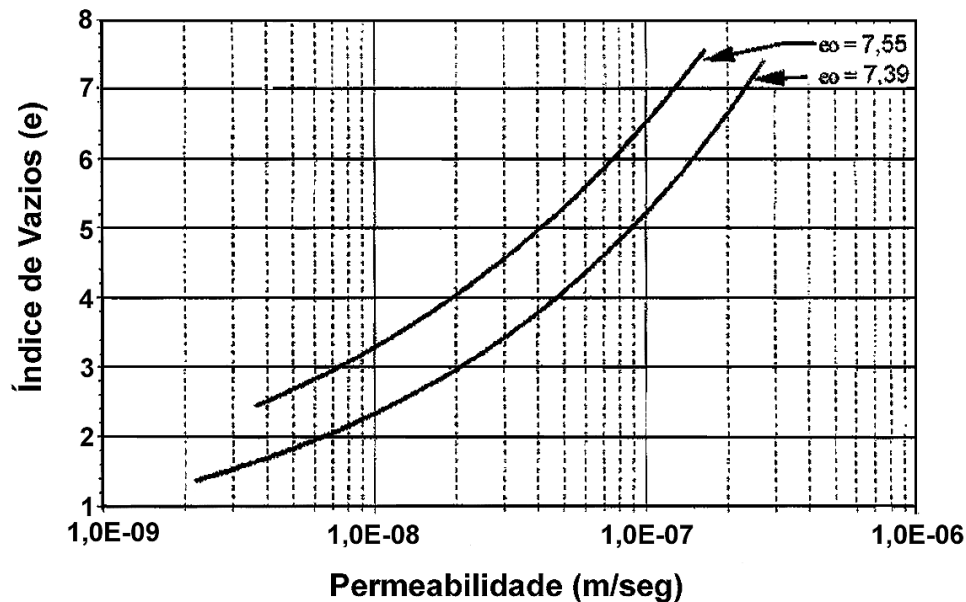


FIGURA 6.20: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada obtida por Ensaios do Tipo HCT (adaptado de Botelho, 2001).

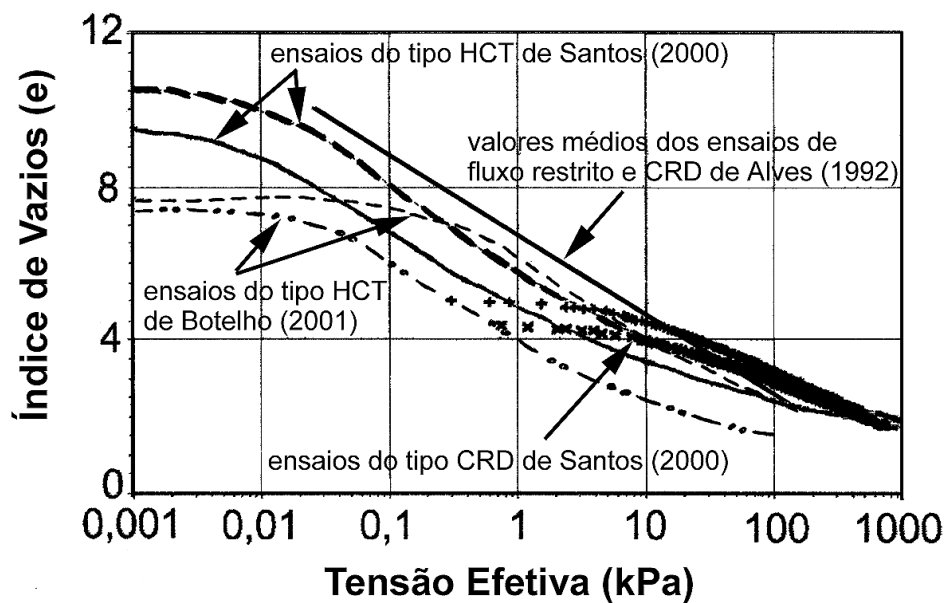


FIGURA 6.21: Curvas de Compressibilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada: Comparação Entre Resultados de Diferentes Ensaios.

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.

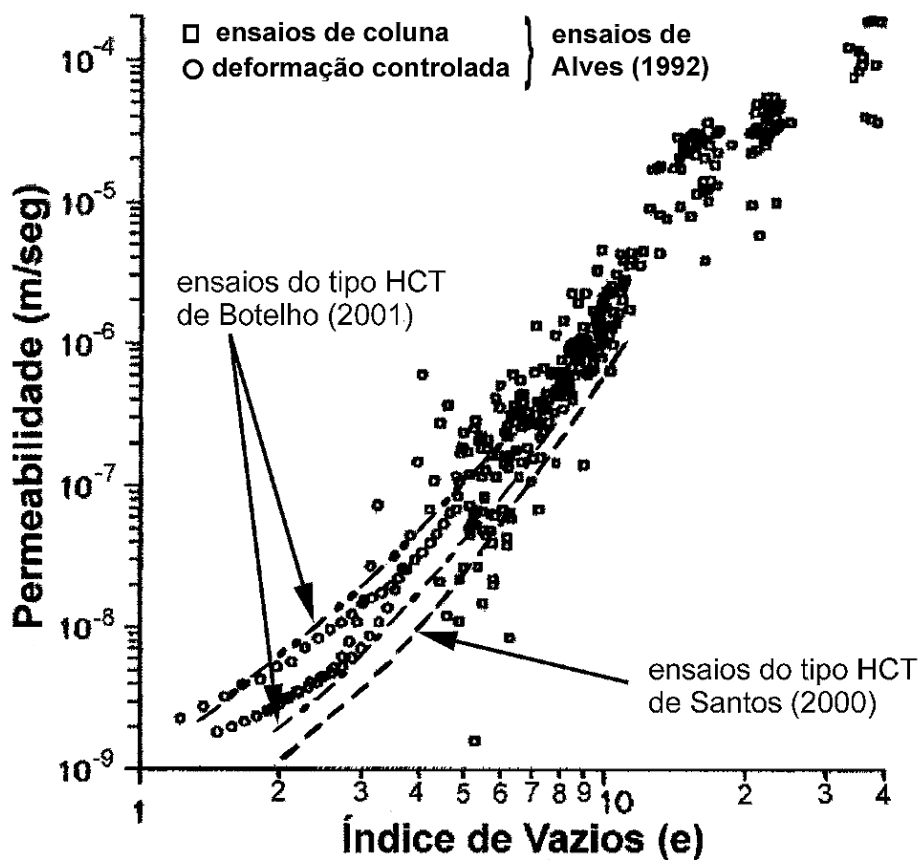


FIGURA 6.22: Permeabilidade da Lama Vermelha OP Neutralizada: Comparação Entre Resultados de Diferentes Ensaio.

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.

Nas análises feitas por Lima (1996), ensaiando resíduos de mineração de ferro, ela verificou que quanto maior a velocidade do ensaio, maiores as poropressões geradas, o que era de se esperar. Achou que as curvas de compressibilidade e permeabilidade não se mostraram muito sensíveis à variação da velocidade aplicada (de 0.0756mm/min; 0.301mm/min e 0.751mm/min), a não ser para o conjunto de ensaios com menor teor de umidade inicial, onde se notava um crescimento da permeabilidade com a diminuição do índice de vazios no final dos testes, comportamento que era mais evidenciado para ensaios com menores velocidades. Isto pode ser devido a algum problema na medição dos valores de poropressão gerados nestes ensaios, que não foram realizados de forma automatizada.

Nos ensaios de Lima (1996), a altura da amostra teve influência na relação $\Delta u/\sigma_{total}$, que aumentou para amostras mais espessas. O teor de umidade também influenciou nesta relação no mesmo sentido. Foi identificado um comportamento diferente do material em um menor teor de umidade em relação aos com maiores umidades, contrariando a teoria que afirma que curvas de compressibilidade e permeabilidade seriam únicas para um dado material, independente do teor de umidade inicial. A altura da amostra, porém, não influenciou estas relações. Sheahan & Watters (1997) também verificaram que o comportamento de solos não cimentados tem uma fraca dependência da taxa de velocidade do ensaio. Além disso, afirmam ter conseguido bons resultados de ensaio CRS mesmo com excessos de poropressão na base acima de 70% maiores que a tensão total.

6.3.2

Metodologia Empregada

A célula de adensamento utilizada foi a de um equipamento descrito por Guimarães (1990), e que está esquematizado na Figura 6.23. O ensaio CRD usa amostras cilíndricas com cerca de 20 cm de diâmetro e 6,0 cm de altura, e são conduzidos até um nível de tensão total entre 300 e 400 kPa. A preparação destas amostras segue uma técnica mais ou menos comum, que consiste na homogeneização do material vindo do campo, que era então deixado sedimentar

por um período mínimo de 24 horas. Depois retirava-se o líquido sobrenadante manualmente e verificava-se o teor de sólidos da lama por determinação do teor de umidade. Este teor de sólidos era ajustado, se necessário, até se chegar a uma condição inicial desejada. Se este ajuste ocorria, a amostra era novamente homogeneizada e deixada sedimentar, sendo mais tarde transferida para a célula edométrica com o auxílio de uma concha.

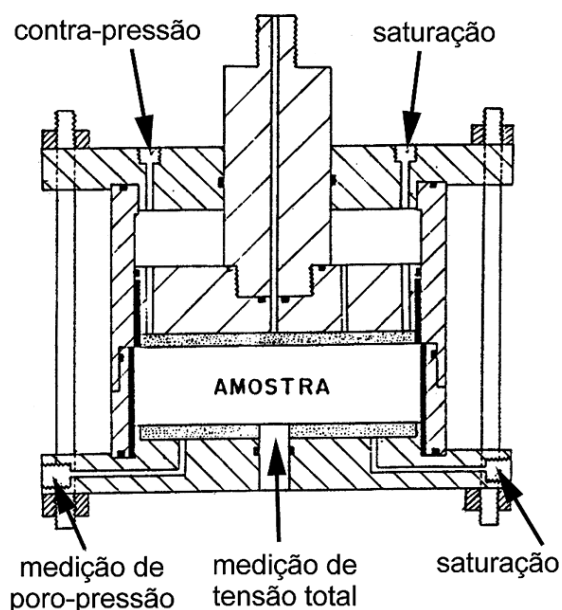


FIGURA 6.23: Corte Transversal do Edômetro Tipo CRD (*apud Guimarães, 1990*)

Isto feito, fechava-se o equipamento e aproximava-se o pistão de carregamento, até que o mesmo se encostasse no topo da amostra. Durante o ensaio, as poro pressões são medidas com um transdutor instalado na face não drenada, mantendo-se a drenada conectada à atmosfera. Os deslocamentos do topo da amostra são medidos com um transdutor de deslocamentos, enquanto as tensões totais, o são por meio de um transdutor de pressão total instalado na base do equipamento. Utilizou-se de um sistema de aquisição de dados de alta resolução para monitoramento automático dos ensaios.

A Figura 6.24 mostra o equipamento aberto e com uma amostra com elevado teor de sólidos, pronta para ser ensaiada. A consistência da amostra pode ser percebida e foi das mais elevadas dentro dos diferentes teores de sólidos

ensaiados. Sobre esta amostra, era colocado um papel filtro, previamente umedecido. Pode ser notado o transdutor de pressão da base e o LVDT, usado para checar a velocidade da prensa, que é automaticamente definida no painel lateral. A Figura 6.25 mostra o consolidômetro pronto para iniciar o ensaio, com o transdutor de poropressão envolto por uma proteção de isopor para não ser afetado por variações de temperatura. Foram realizados ensaios com duração de quatro dias e outros com apenas duas horas no mesmo material, para efeito de verificar a influência da taxa de carregamento no comportamento do resíduo.

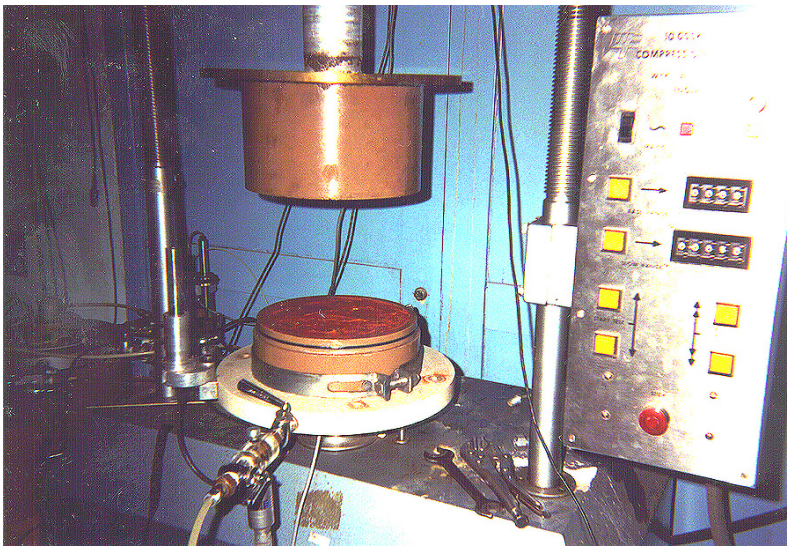


FIGURA 6.24: Edômetro Tipo CRD Sendo Preparado Para Ensaio

Também foi utilizado um consolidômetro de menores dimensões, mais fácil de manusear e necessitando de menor volume de amostra. Procurou-se, com isto, verificar o efeito escala no ensaio e permitir moldagem de amostras com uma maior variação de características iniciais. Além disso, este equipamento menor permite a aplicação de um maior nível de tensão (até 2500kPa). Para efeito de diferenciação, ele foi chamado neste trabalho de CRS. Tudo foi montado à partir de uma adaptação de uma célula de adensamento convencional, instalada em prensa de ensaios triaxiais (*Ribeiro, 1992*) e esquematizado na Figura 6.26. No projeto original, a altura da amostra no CRS era de 20mm por 50mm de diâmetro. Porém, foi verificado que devido a geometria de algumas peças, como por exemplo, a ponta biselada do anel de adensamento onde a amostra ficava

confinada, não se atingia 100% de saturação dos canais de drenagem do aparelho em função de ar aprisionado em vazios causados pela forma das peças. A suspeita disto era pelo fato de não se conseguir geração contínua de poropressão, mesmo em amostras muito moles, saturadas, e a elevadas taxas de deformação. Isto foi sanado com o preenchimento destes contatos com borracha de silicone.

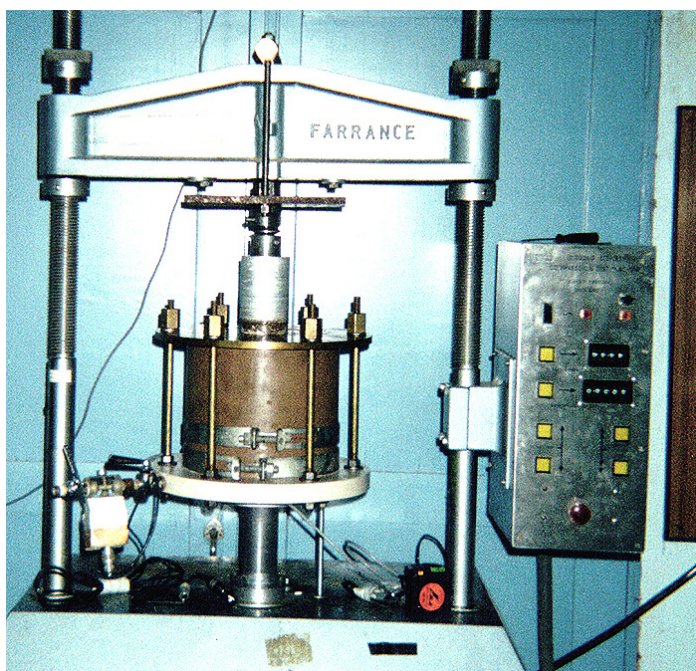


FIGURA 6.25: Edômetro Tipo CRD pronto Para Início de Ensaio.

Mesmo com este problema sanado, optou-se por modificar todo o aparelho. Foi adotado um anel de adensamento maior, com 40mm de altura e 100mm de diâmetro, com mais canais de saturação. A transmissão de carga é feita por uma célula de carga mantida fixa às hastes da prensa, com um quepe acoplado à sua extremidade, semelhantemente ao ensaio triaxial. Este quepe possuía um anel de borracha do tipo O'Ring para impedir a saída de lama pela sua lateral, forçando que a drenagem fosse toda pela pedra porosa. O atrito quepe/anel foi medido e descontado nas análises do ensaio. Um medidor de poropressão na base e um LSCT completam a instrumentação. A Figura 6.27 mostra uma câmara de adensamento desmontada e outra, montada. Pode-se perceber o anel sobre uma base com a pedra porosa coberta por papel filtro e duas válvulas de drenagem, uma para acoplar o transdutor e outra para saturação. Há uma peça de alumínio

que fixa o anel à base, vedando-o com anéis de borracha, e o quepe, com parafuso no topo para ser rosqueado à célula de carga. Na Figura 6.28, é visto o equipamento com uma amostra pronta para ser ensaiada e na Figura 6.29, o teste em andamento.

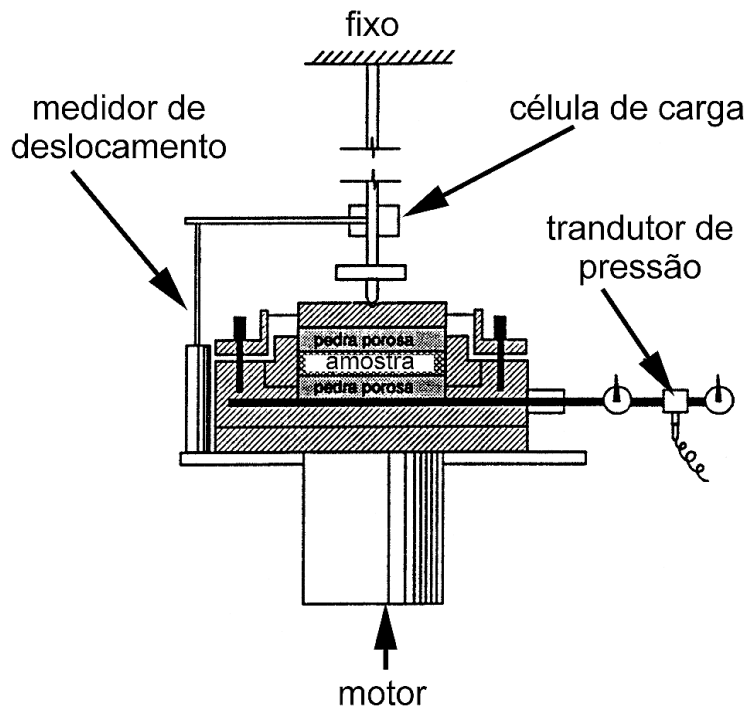


FIGURA 6.26: Corte Transversal do Edômetro Tipo CRS (Ribeiro, 1992)

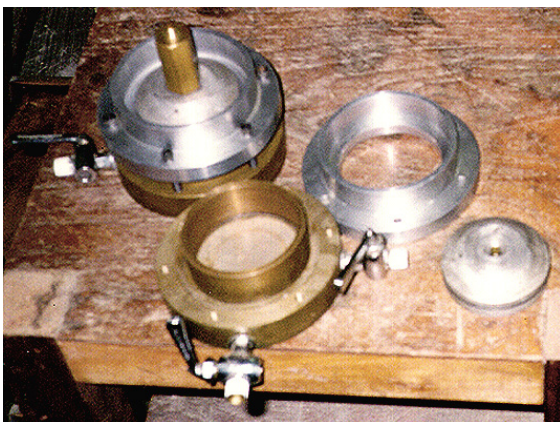


FIGURA 6.27: Edômetro Tipo CRS Desmontado.

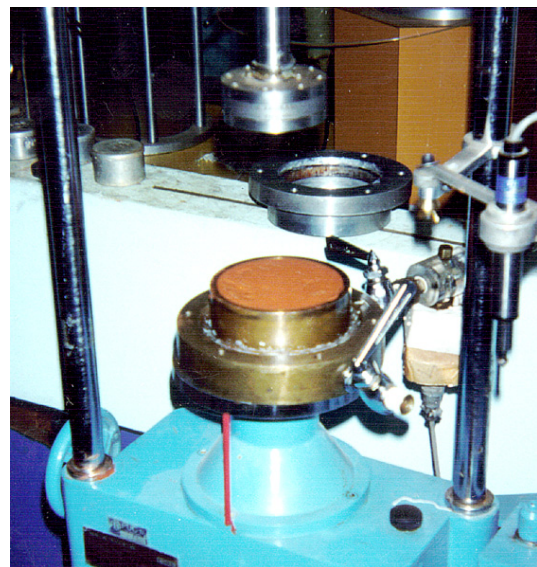


FIGURA 6.28: Edômetro Tipo CRS Sendo Preparado Para Início de Ensaio.



FIGURA 6.29: Ensaio em Andamento no Edômetro Tipo CRS

A moldagem das amostras usadas no CRS foi feita de acordo com o mesmo procedimento usado no ensaio tipo CRD. As condições iniciais foram variadas. Algumas vezes, retirou-se material ensaiado no CRD, conduzindo-o logo em seguida ao CRS. Em outras, deixou-se o material sedimentar após homogeneização e secar ao ar, até atingir uma consistência que permitisse a moldagem. O mesmo foi feito com material seco em estufa por períodos diversos de tempo. Outras vezes ainda, o mesmo material era colocado simultaneamente no CRD e CRS e ensaiados à mesma velocidade, para verificação direta do efeito de escala no resultado.

As velocidades de ensaio nos dois tipos de equipamento eram determinadas experimentalmente, de acordo com os resultados obtidos, fazendo-se a pesquisa da razão entre as poropressões geradas na base e as tensões verticais. Estes resultados foram analisados de acordo com o método sugerido por Martinez e outros (1987), que conduz a respostas quase idênticas aos do método de Wissa e outros (1971) e também o método de Znidarcic e outros (1986), mais rigoroso, ao menos com relação à compressibilidade, conforme comprovado por Barbosa e

outros (1996). Foram obtidas desta maneira, as curvas de variação do índice de vazios com a tensão efetiva e a permeabilidade.

6.3.3

Resultados de Alguns Ensaio

A Figura 6.30 mostra um resultado típico de um ensaio obtido pelo equipamento CRD/CRS. Para este caso, pode ser percebido que quase até a metade do ensaio, não houve tensão efetiva, sendo toda a tensão suportada pelo fluido. Somente após uma certa deformação e aproximação maior dos grãos, é que a amostra passou a apresentar tensão total diferente da poropressão. Serão apresentados resultados de ensaios executados na lama de lavagem de bauxita, na lama vermelha SL e lama vermelha PC.

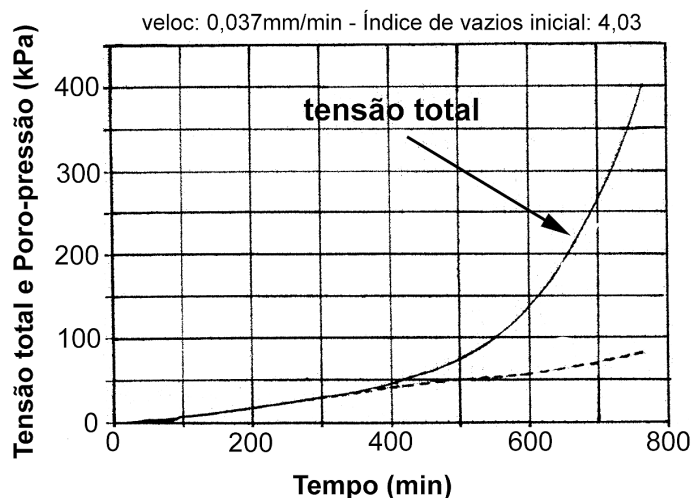


FIGURA 6.30: Resultado Típico de Ensaio CRD

A Figura 6.31 mostra o resultado de treze ensaios CRS realizados na lama de lavagem de bauxita. Estão representados aí uma faixa de variação de velocidade de 0.0179mm/min a 1.017mm/min, com as condições iniciais das amostras as mais variadas, desde de não saturada até completamente amolgadas. O índice de vazios inicial variou de 1.28 a 2.87, o grau de saturação, 35% a 100%. O

objetivo de plotar todos juntos foi para definir uma faixa de variação esperada para os resultados.

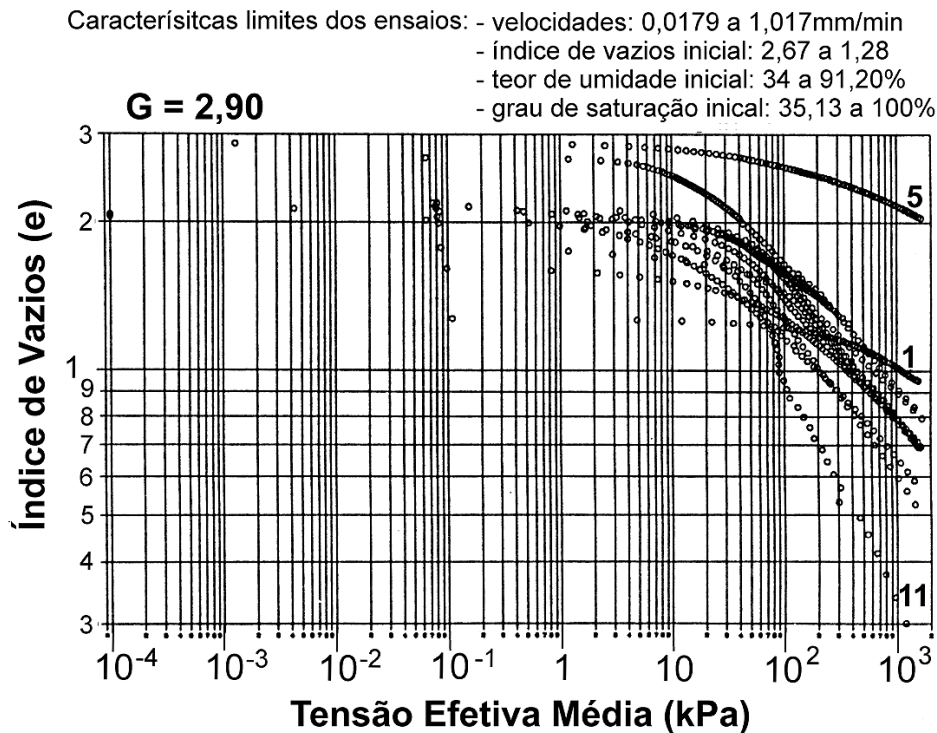


FIGURA 6.31: Resultados de Ensaio CRS na Lama De Lavagem De Bauxita: Relação Índice de Vazios contra Tensão Efetiva

Todas as curvas tem um formato semelhante, sendo cada uma constituída de duas inclinações. Uma, mais suave, para maiores índices de vazios, correspondente a um estado da lama onde provavelmente há pouco contato entre as partículas. O outro, mais acentuado, já é um estágio onde se pode afirmar haver um “solo” realmente. Estão demarcados três ensaios, o ensaio 01, o 05 e o 11, cujas curvas se diferenciaram das demais. Pode-se notar que, exceto estas, todas as outras tem inclinações semelhantes e não estão muito dispersas. Nos ensaios com respostas mais semelhantes entre si, só se variou as condições iniciais, tipo índice de vazios e se houve ou não inundação ao longo do ensaio, a título de verificar se ocorria alguma mudança de comportamento. Nos testes assinalados, porém, condições especiais foram criadas, que serão descritas logo à seguir.

O ensaio 01 foi executado em uma amostra saturada, pré adensada a 300kPa. É possível notar como é menor a inclinação de sua curva em relação aos

outros ensaios. O ensaio 05 foi executado em uma amostra não saturada, seca em estufa por um período de tempo até que atingisse o grau de saturação de aproximadamente 35%. Interessante notar que o ressecamento faz com a curva de compressibilidade fique aparentemente paralela ao do solo pré adensado (ensaio 1), indicando um comportamento similar, como já havia sido percebido nos ensaios de secagem. E o ensaio 11 foi executado em uma amostra saturada, com a qual não se teve cuidado nenhum em prepará-la, amolgando-a deliberadamente, além de ter sido executado na maior taxa de carregamento (1,017mm/min). É ela que apresenta a maior compressibilidade, não só apresentando um maior volume de vazios, mas também com um índice de compressão distinto das demais curvas, especialmente em níveis de tensão até 100kPa.

Para melhorara a visualização destes resultados, foi feita uma normalização em relação ao índice de vazios inicial, apresentada na Figura 6.32. Estas curvas passam a indicar, agora, a relação entre o volume de vazios no instante t em relação ao volume de vazios inicial. Pode ser notado que o ensaio pré adensado se torna o limite superior da figura, o que apresenta a menor variação de volume, seguido pelo ensaio não saturado. O ensaio em amostra amolgada é o mais variou de volume. Os outros ensaios apresentam maior variação em função do seu índice de vazios inicial.

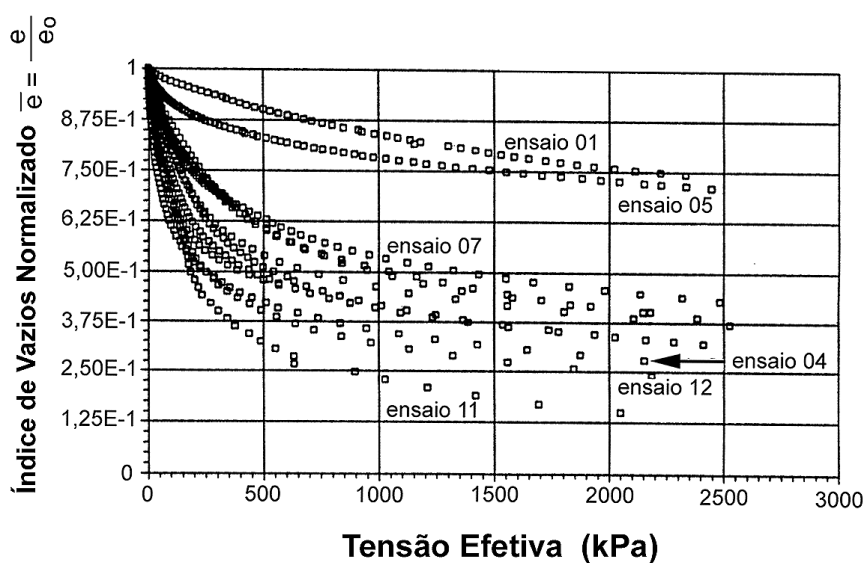


FIGURA 6.32: Resultados de Ensaio CRS na Lama De Lavagem De Bauxita: Relação Índice de vazios Normalizado Contra Tensão Efetiva.

Para a permeabilidade, pode ser vista a grande variação entre os resultados na Figura 6.33. A Figura 6.34 está normalizada em relação ao índice de vazios inicial. A diferença entre eles pode se dever principalmente à variação nas condições de geração de poropressão, ou seja, na relação entre os excessos de poropressão em relação à tensão total na base. É sabido que esta é uma relação importante de ser acompanhada e era sugerida de ser em torno de 5% por Wissa et al., 1971 e recomendada de não ultrapassar 30% (Sheahan & Watters, 1997).

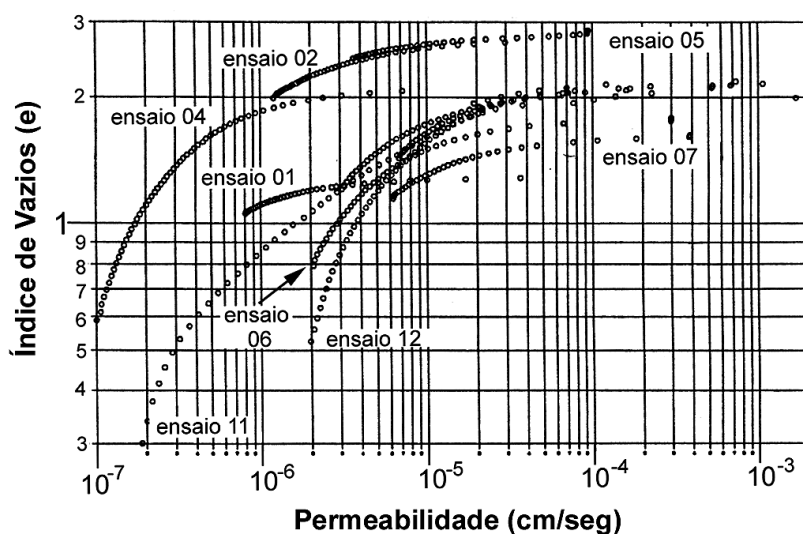


FIGURA 6.33: Resultados de Ensaio CRS na Lama De Lavagem De Bauxita: Relação entre Índice de Vazios e Permeabilidade

Os ensaios 02 e 04 estão se destacando dos demais, se aproximando dos valores obtidos para os ensaios 01 e 05 como limite inferior de permeabilidade. Eles tiveram uma diferença de quatro vezes na velocidade de ensaio, o 04 sendo executado mais rápido. O ensaio 02 apresentou uma relação entre os excessos de poropressão e a tensão total máxima de 7%. Já o ensaio 04 foi feito inundado e teve relação entre os excessos de poropressão na base para a tensão total de 50%. O modo diferenciado de geração de poropressão entre estes ensaios provavelmente deve ter proporcionado estas diferenças no cálculo da permeabilidade, mostrando que a definição correta da taxa de carregamento é bastante importante para se conseguir cálculos uniformes deste parâmetro. O ensaio 01 é o ensaio pré adensado e o ensaio 05, o não saturado, do qual não se

espera obter uma correlação adequada, uma vez que o tipo de análise que foi efetuada é para solos saturados. O restante dos ensaios, tirando o 11, em amostra amolgada, que apresentou relação entre os excessos de poropressão pela tensão na base de 88%, apresentaram uma resposta satisfatoriamente semelhante, ainda mais quando se visualiza pelo gráfico normalizado. O ensaio 12 também apresentou uma relação entre poropressão na base pela tensão total (u/σ) de 70%, o que pode explicar o fato de também estar um tanto afastado das demais curvas. A Tabela 6.3 resume alguns dados destes ensaios. Os ensaios 03, 09 e 13 não tiveram as permeabilidades calculadas por não terem gerado poropressão. O ensaio 10, mesmo com a elevada relação $\Delta u/\sigma_{\text{total}}$ apresentou resultados compatíveis com os demais.

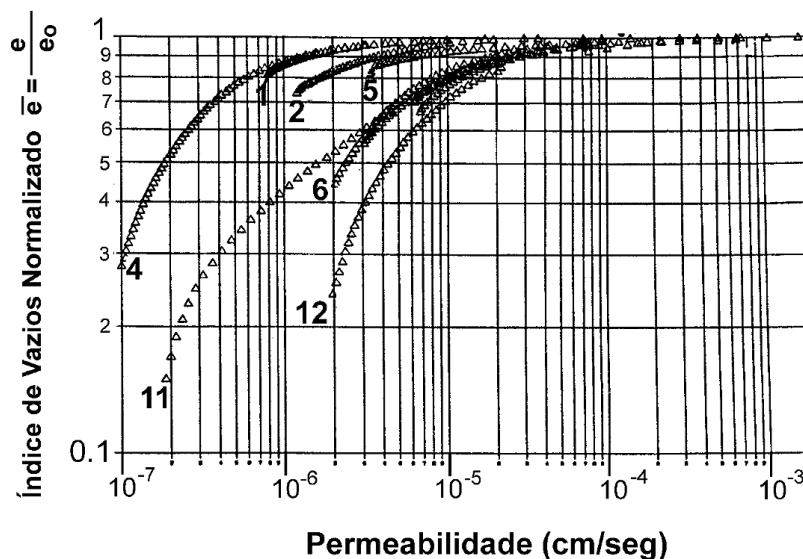


FIGURA 6.34: Ensaio CRS na Lama De Lavagem De Bauxita: Índice de Vazios Normalizado Contra a Permeabilidade.

A Figura 6.35 mostra ensaios feitos à mesma velocidade (0,035mm/min) em amostras com diferentes teores de sólidos iniciais, do tipo CRD, ou seja, com amostras de maiores dimensões. Pode ser visto que, após um certo índice de vazios, que deve ser relacionado com o nível de contato intergranular de cada lama, elas tenderiam para curvas de compressibilidade bem semelhantes. Estes mesmos resultados estão normalizados de modo a representarem a variação do

volume total no instante t em relação ao volume total inicial, como pode ser visto na Figura 6.36. Pode ser percebido aí que quanto maior o teor de sólidos, menor a variação de volume, tendendo todas as curvas a uma mesma taxa de variação após um determinado nível de tensão, que deve estar relacionado ao nível de contato intergranular, ou seja, a partir do momento que a lama se torna mesmo um solo. Por este tipo de curva, nota-se que o nível de tensão necessário para provocar uma certa variação de volume é muito menor nos ensaios com menor teor de sólidos inicial, o que era de se esperar. A diferença observada entre os dois ensaios com teor de sólidos a 40% deve ser devido à diferença entre os índices de vazios inicial e também, a uma pequena diferença no valor da densidade dos grãos das duas amostras (2,87 e 2,94). Os valores de $\Delta u/\sigma_{total}$ nestes ensaios variaram de 5,6% a 22%.

TABELA 6.2: Características dos ensaios CRS realizados na lama de lavagem de bauxita comparados nas Figuras 6.31 a 6.34.

ENSAIO	VELOC. (mm/min)	e_0	$W_{inicial}$ (%)	S (%)	Relação Máxima entre $\Delta u/\sigma_{total}$	OBS.
01	0.0219	1.28	44.51	100	2%	pré-adensada 300kPa. Ensaio inundado
02	0.0179	2.69	91.21	100	7%	Sem inundação
03	0.0427	2.05	71.5	100	Sem poropressão	Sem inundação
04	0.0862	2.1	76.3	100	50%	Ensaio inundado
05	0.0565	2.87	34	35.13	2,3%	Seco em estufa antes do ensaio.
06	0.1802	1.78	60	100	10%	Ensaio inundado
07	0.0233	1.62	58.25	100	15%	Ensaio inundado, amostra pouco amolgada
08	0.318	2.13	73.56	100	45%	Ensaio não inundado
09	0.4137	2.14	73.9	100	Sem poropressão	Sem inundação
10	0.644	2.15	73.63	100	125%	Sem inundação
11	1.0170	1.99	69.46	100	88%	Sem inundação, amostra muito amolgada
12	0.4386	2.18	72.78	100	70%	Sem inundação
13	0.9117	2.08	71.98	100	Sem poropressão	Ensaio inundado

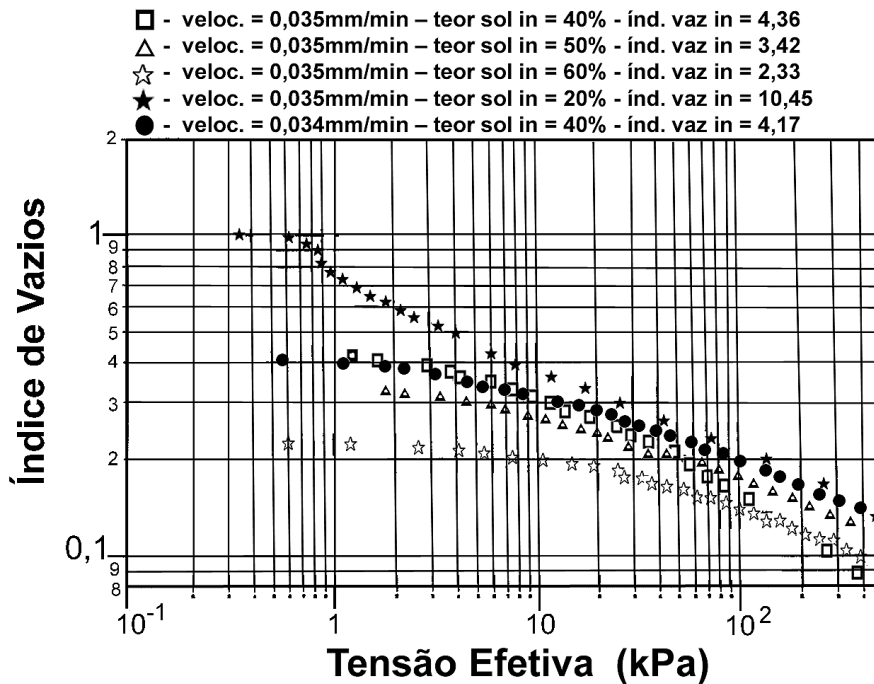


FIGURA 6.35: Resultados de Ensaio CRD na Lama De Lavagem De Bauxita: Compressibilidade.

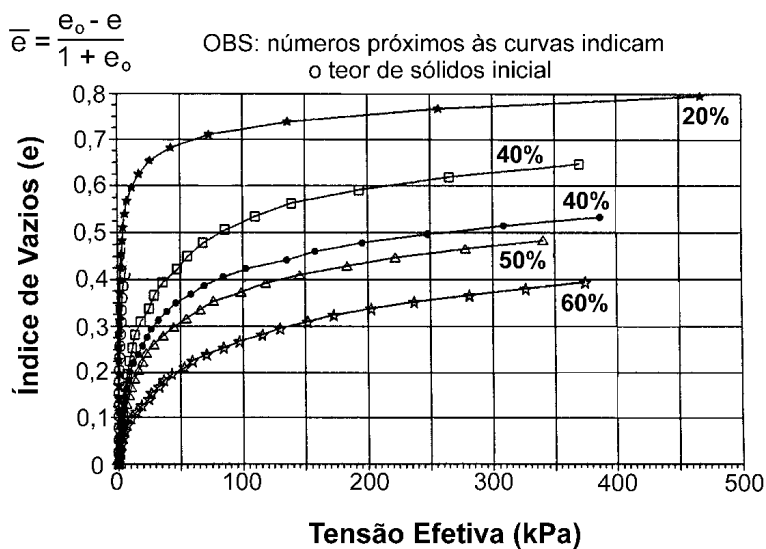


FIGURA 6.36: Resultados de Ensaio CRD na Lama De Lavagem De Bauxita: Compressibilidade - Curvas Normalizadas

Os resultados de permeabilidade estão na Figura 6.37, mostrando que há uma tendência para uma mesma relação, ou seja os resultados foram menos dispersos, provavelmente por não terem apresentado entre si, diferenças

significativas na relação $\Delta u/\sigma_{total}$. A Figura 6.38 apresenta resultados de edômetro convencional juntamente com ensaios de tensão controlada obtidas por outros pesquisadores (Lapa & Cardoso, 1988) e os do CRD. Não foi informada as condições da amostra no ensaio convencional. Também pode ser admitida um relação de compressibilidade próxima fornecida pelas diferentes técnicas, ainda mais se for considerado que se tratam de amostras de diferentes reservatórios, ou seja, diferentes entre si. Os resultados foram muito mais influenciados pelas suas condições iniciais. Nesta figura também está plotado um ensaio CRD com velocidade ligeiramente superior aos demais. Ele apresentou como resposta uma inclinação diferenciada, podendo ser uma influência da taxa de deformação na relação $\Delta u/\sigma_{total}$.

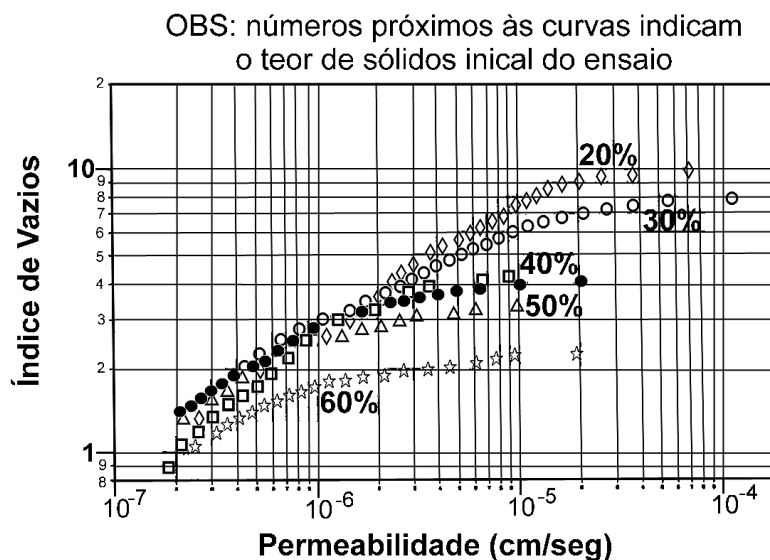


FIGURA 6.37: Resultados de Ensaio CRD na Lama De Lavagem De Bauxita – Permeabilidade.

A Figura 6.39 mostra uma comparação entre três diferentes lamas de lavagem, ensaiadas à mesma velocidade. Trata-se, na verdade, da mesma bauxita de origem, sendo que o que é chamado de bauxita nodular, nada mais que a camada que recobre a jazida de bauxita economicamente explorável, a bauxita maciça. Neste gráfico, a lei de compressibilidade foi praticamente idêntica,

indicando a pouca diferença entre estes materiais. As relações de permeabilidade estão na Figura 6.40, sendo igualmente muito parecidas entre si.

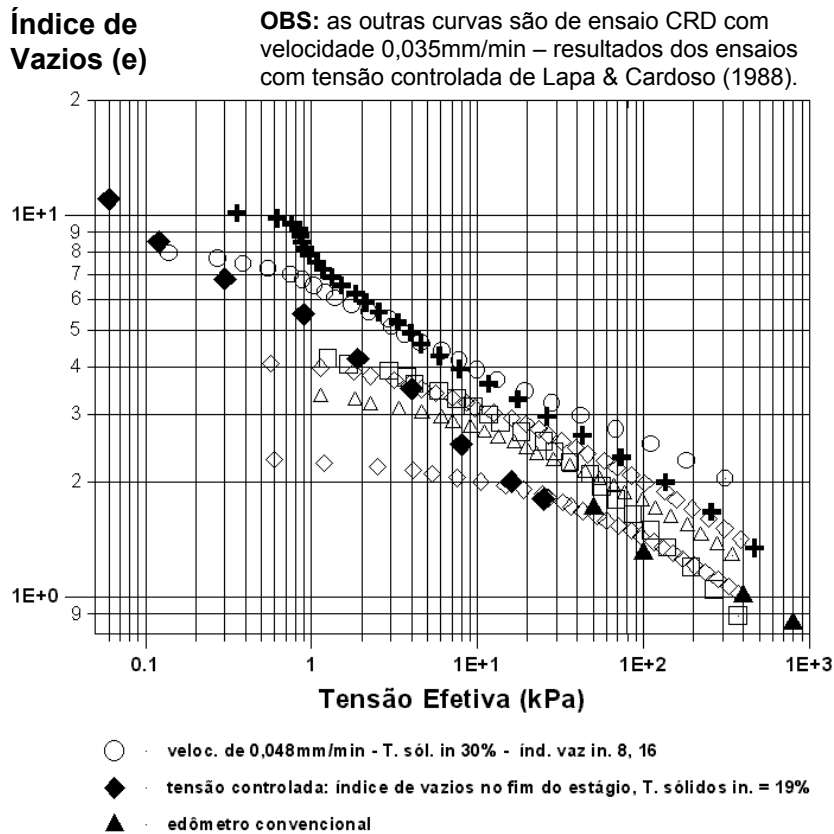


FIGURA 6.38: Comparação Entre Diferentes Ensaio na Determinação da Compressibilidade da Lama De Lavagem De Bauxita.

A Figura 6.41 permite ter uma idéia do efeito escala da amostra usada no ensaio. Estão plotados aí valores do ensaio CRS (menores dimensões) e do CRD (maiores dimensões). Os teores de sólidos iniciais são os mais diversos. No caso dos ensaios CRS, os dados iniciais são aqueles da Tabela 6.3. Os do CRD são os mesmos da Figura 6.35. Tirando os ensaios feitos em material pré adensado (01); o não saturado (05) e o amolgado (11), todos os outros parecem conduzir a uma relação muito próxima, após se atingir um certo nível de tensão ou índice de vazios. Na Figura 6.42 foram incluídos resultados da bauxita nodular, eliminados os ensaios tipo CRS número 01, 05, 11. Esta figura fica, portanto, representando preliminarmente a lei de compressibilidade da lama de lavagem de bauxita.

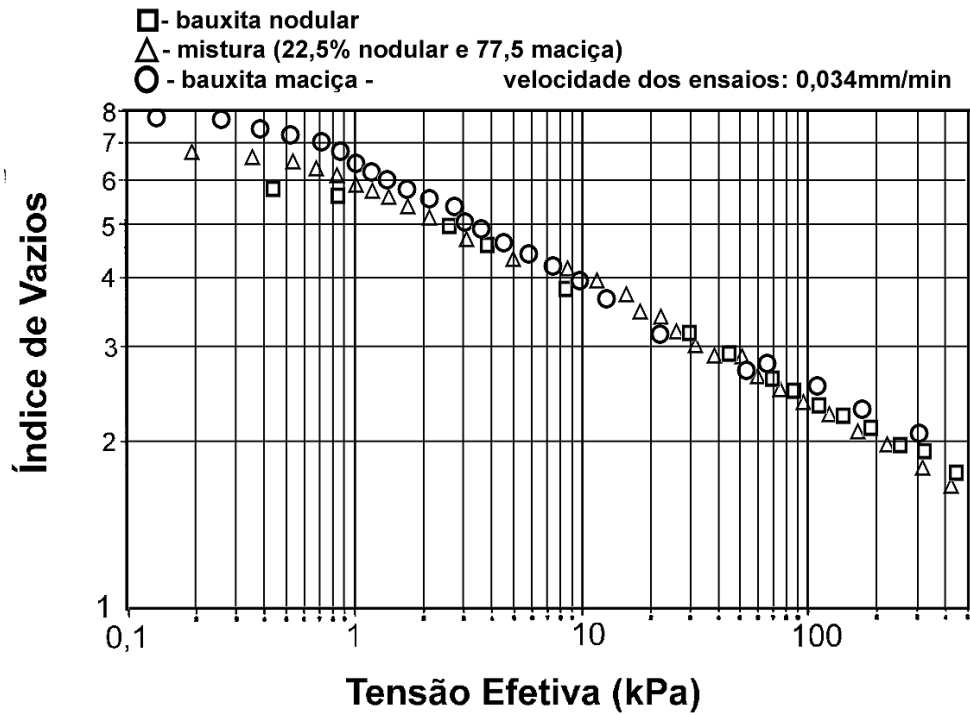


FIGURA 6.39: Resultados de Ensaio CRD em Diferentes Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curvas de Compressibilidade

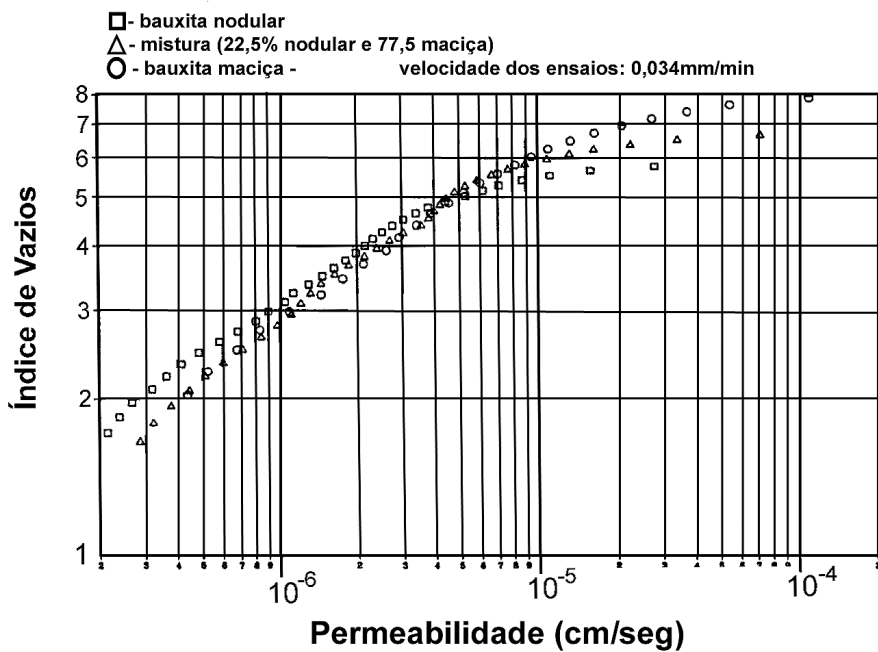


FIGURA 6.40: Resultados de Ensaio CRD em Diferentes Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curvas de Permeabilidade.

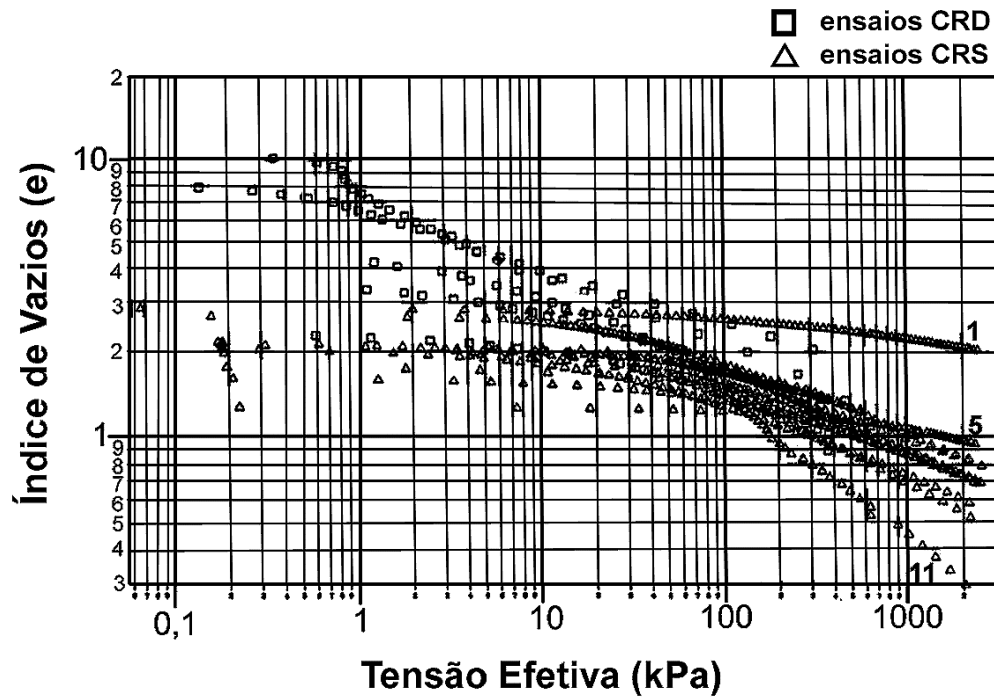


FIGURA 6.41: Comparação Entre Resultados de Ensaio CRS e CRD em Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curvas de Compressibilidade.

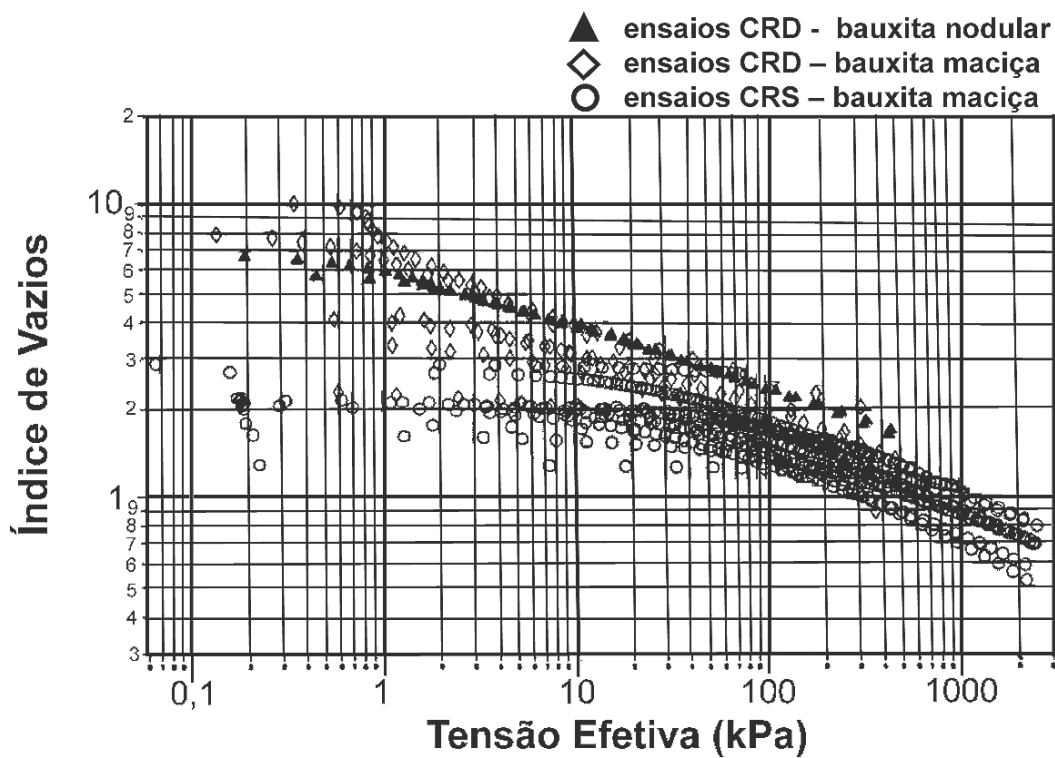


FIGURA 6.42: Comparação Entre Resultados de Ensaio CRS e CRD em Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curva de Compressibilidade Final.

A Figura 6.43 apresenta a comparação entre as leis de permeabilidade obtida dos mesmos ensaios. Neste caso, a dispersão é grande, principalmente pela diferença existente nas relações entre os excessos de poropressão em relação à tensão total na base, esta por sua vez uma função da taxa de carregamento, e o método de análise tem o cálculo da permeabilidade muito vinculado a este fator. Há uma clara indicação de que os valores obtidos em equipamento de maior dimensão conduz a menores valores de permeabilidade. E como os ensaios realizados neste equipamento apresentaram uma distribuição de poropressões mais uniforme, a tendência é considerá-los como base para a definição da lei de permeabilidade. Na Figura 6.44 estão os resultados após se eliminar os ensaios do tipo CRS 01, 05 e 11, por apresentarem condições iniciais muito diferenciada dos demais, e os ensaios 04, 08, 10 e 12, por apresentarem relações de poropressão com a tensão na base muito elevadas. As curvas restantes tendem a apresentar uma taxa de variação da permeabilidade com o índice de vazios semelhante e provavelmente, os valores fornecidos pelo ensaio CRD estarão mais perto dos reais pelas razões já explicadas. O que se recomenda é a execução de ensaios do tipo HCT para que o parâmetro seja melhor definido.

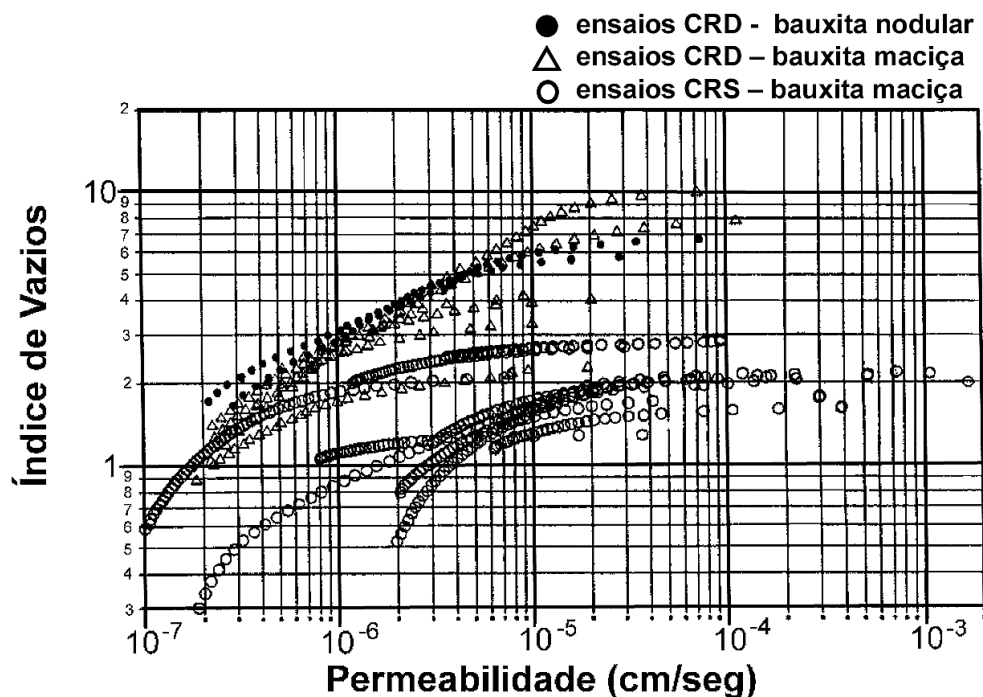


FIGURA 6.43: Resultados de Ensaio CRS e CRD em Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curva de Permeabilidade.

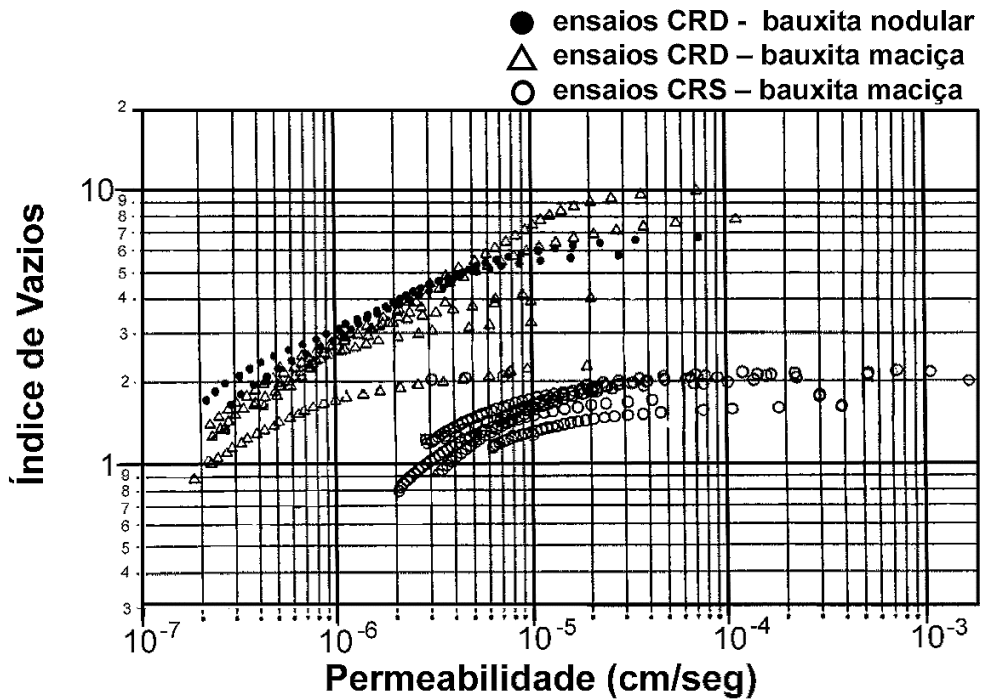


FIGURA 6.44: Resultados de Ensaio CRS e CRD em Resíduos de Lavagem de Bauxita: Curva de Permeabilidade Final.

Alguns resultados obtidos com lama vermelha SL são mostrados nas Figuras 6.45 e 6.46. Eles se apresentam dispersos, e como foram executados em amostras retiradas de diferentes profundidades do reservatório de disposição, pode haver diferenças em suas propriedades apesar de terem sido calculados como se fossem o mesmo material, o que justificaria a dispersão dos resultados. Pela Figura 6.47, o gráfico com curvas normalizadas, pode ser visto que os ensaios com o mesmo teor de sólidos inicial tenderiam para uma mesma curva de variação de volume total em relação ao inicial, o que seria de se esperar.

As Figuras 6.48 e 6.49 mostram valores obtidos de ensaios realizados na lama vermelha PC. Há uma tendência das curvas de compressibilidade apresentarem a mesma inclinação especialmente após uma tensão efetiva de 10kPa, apesar dos teores de sólidos iniciais diferentes. Acredita-se que a boa concordância se deve principalmente ao fato de ter executado todos os testes na mesma velocidade. No caso da permeabilidade, um dos ensaios teve um comportamento totalmente diferenciado dos demais, para o que não se tem explicação aparente. A Figura 6.50 mostra o gráfico normalizado, indicando que

testes com teores de sólidos iniciais próximos têm deformação volumétrica total semelhante, atingindo o mesmo índice de vazios normalizado final.

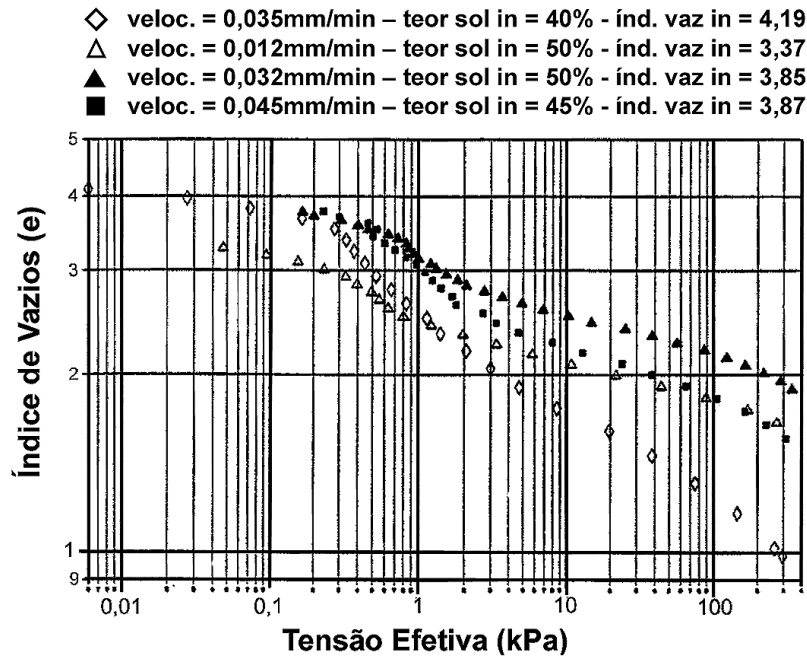


FIGURA 6.45: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA SL: Curvas de Compressibilidade.

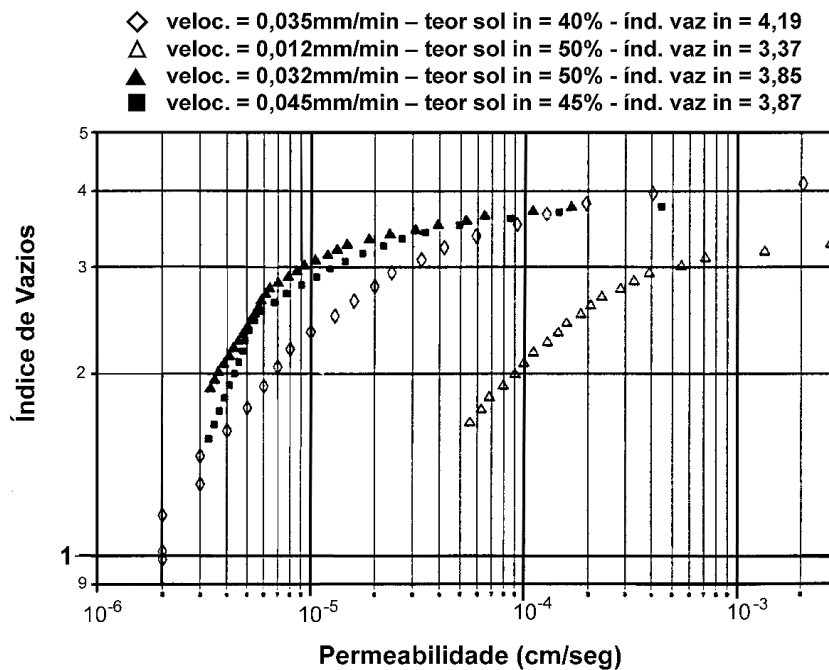


FIGURA 6.46: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA SL: Curvas de Permeabilidade

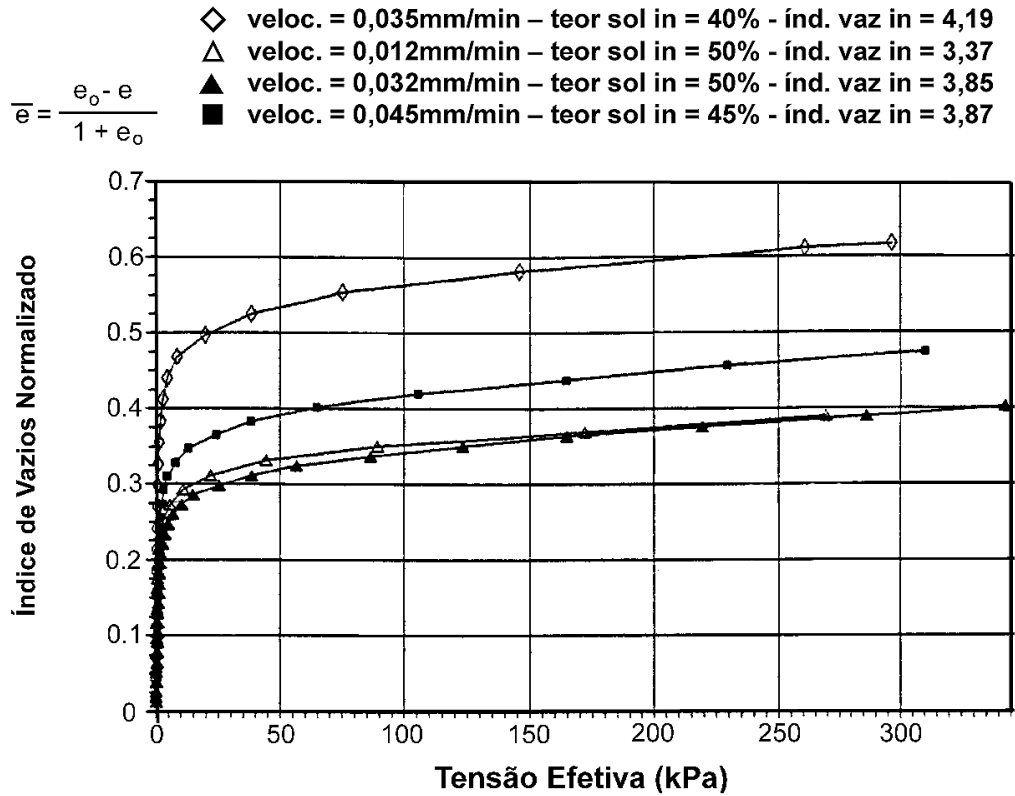


FIGURA 6.47: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA SL: Curvas de Compressibilidade Normalizadas

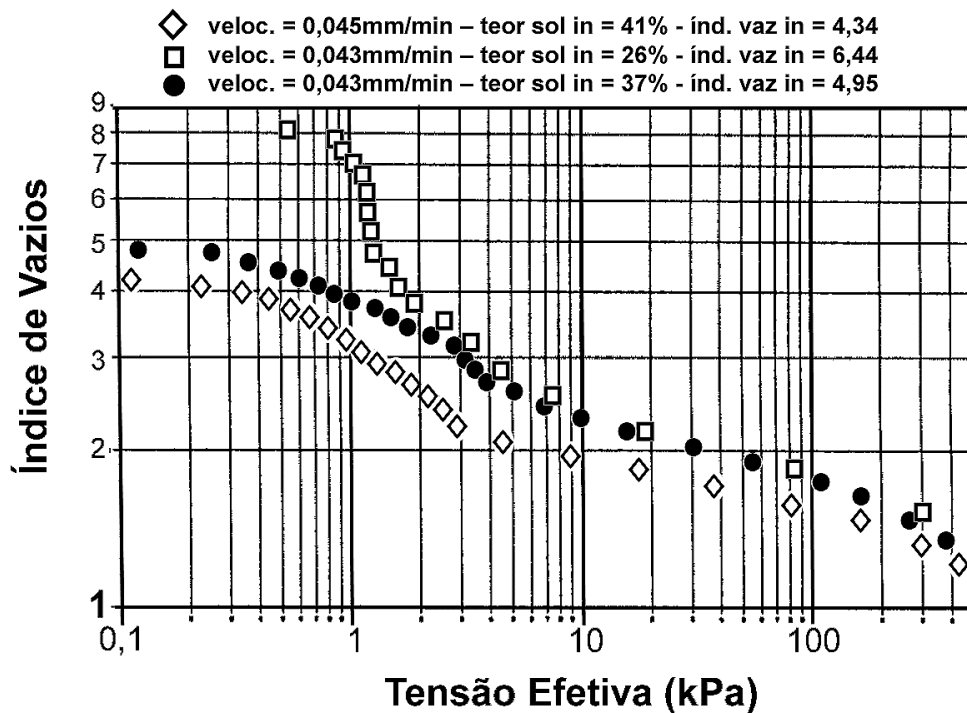


FIGURA 6.48: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA PC: Curvas de Compressibilidade.

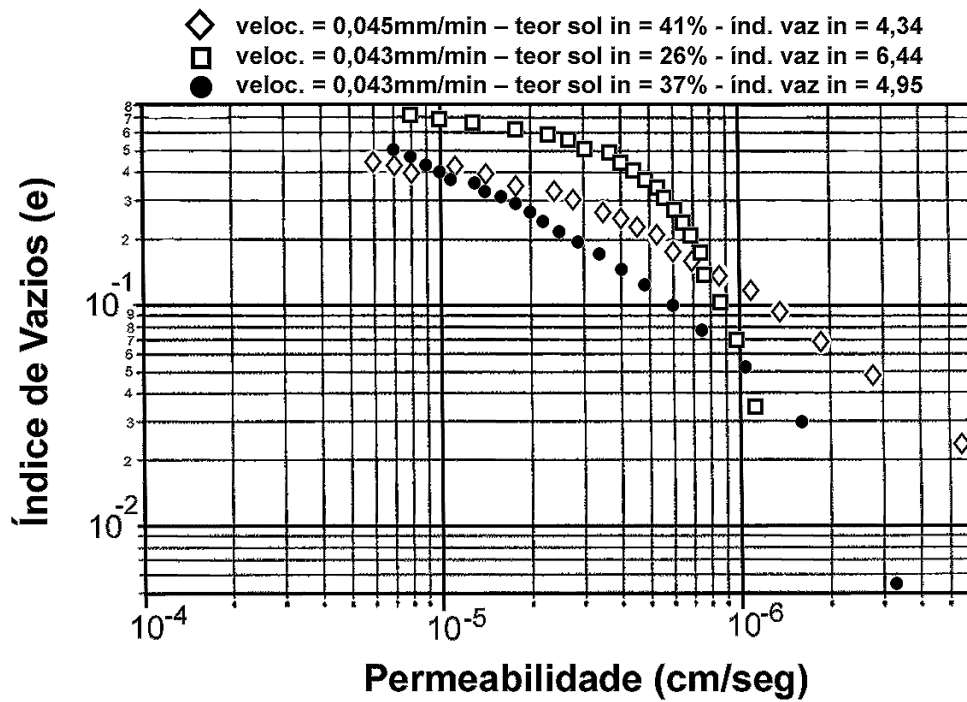


FIGURA 6.49: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA PC: Curvas de Permeabilidade.

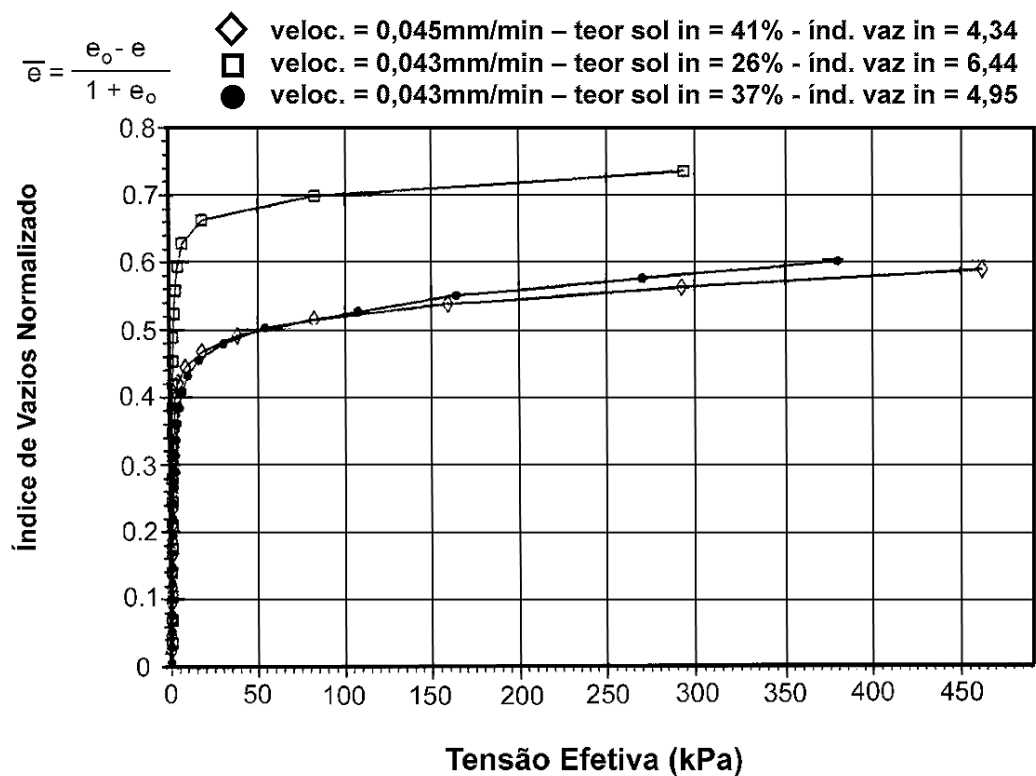


FIGURA 6.50: Resultados de Ensaio CRD na LAMA VERMELHA PC: Curva de Compressibilidade Normalizada

A Figura 6.51 mostra uma comparação entre os valores obtidos para três diferentes lamas de processamento, originadas de jazidas diversas e portanto, não possuindo exatamente as mesmas características. O intuito é só o de delimitar uma faixa de variação das curvas de compressibilidade destes materiais. Por ela, pode se ver que a inclinação da curva é bem próxima após um certo nível de tensão (em torno de 10kPa).

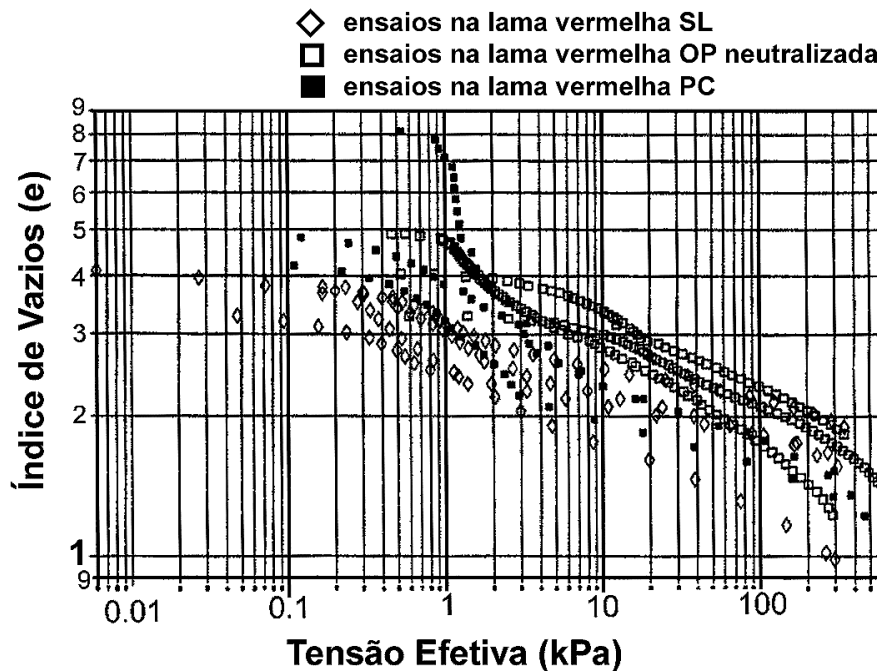


FIGURA 6.51: Comparação Entre Resultados de Ensaio CRD em Lamas de Processamento de Bauxita: Curva de Compressibilidade.

Para ampliar a faixa de comparação, todos os resultados da lama de lavagem foram plotados junto com as de processamento. Isto pode se visto nas Figuras 6.52 e 6.53. Apesar da grande diversidade de condições iniciais de ensaio e propriedades dos materiais, pode ser percebido que tanto a inclinação das curvas de compressibilidade como as de permeabilidade, salvo casos extremos como a não saturação, por exemplo, não foram tão diferentes assim, sendo possível a definição de valores médios à título de uma primeira aproximação para um anteprojeto. Para uma melhor definição especialmente da permeabilidade, são recomendados o uso de ensaios do tipo HCT, especialmente porque a definição deste parâmetro via ensaios do tipo CRD se mostrou muito sensível à taxa de carregamento utilizada.

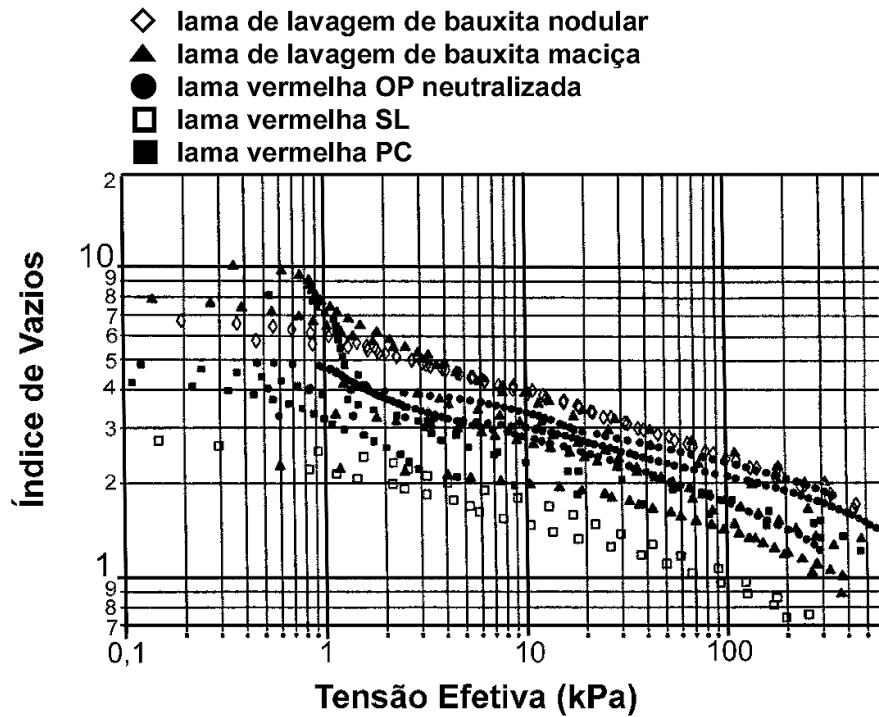


FIGURA 6.52: Resultados de Ensaio CRD Para Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita: Curva de Compressibilidade.

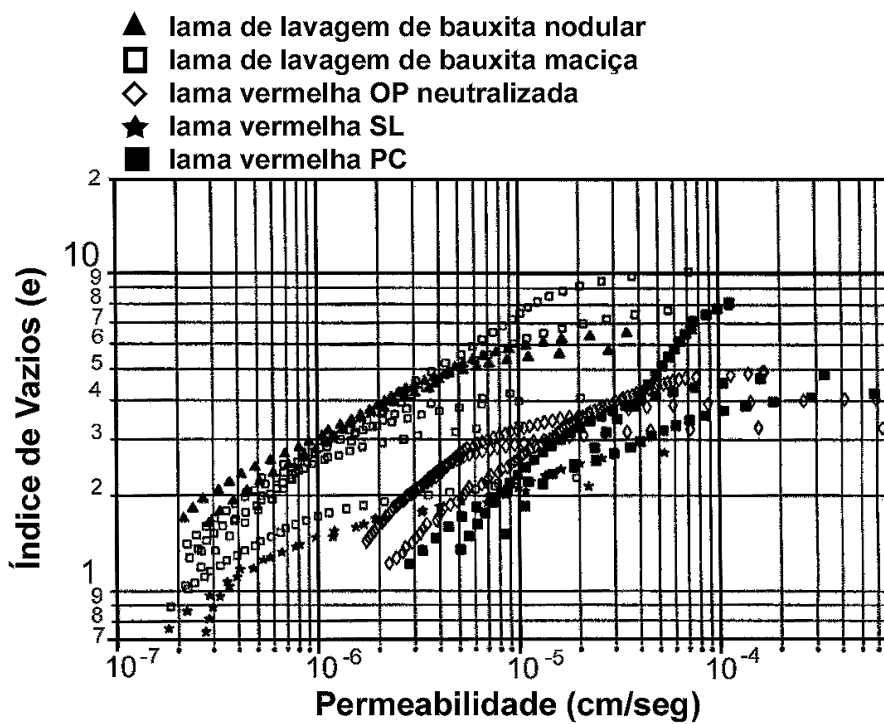


FIGURA 6.53: Resultados de Ensaio CRD Para Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita: Curvas de Permeabilidade.

6.4

Conclusões

Neste capítulo foram discutidas e apresentadas as curvas de compressibilidade e permeabilidade da fase saturada dos resíduos. A determinação destas características foi feita via ensaios de laboratório, especialmente os do tipo deformação controlada. Foram também apresentados dados da literatura sobre resultados de ensaios do tipo HCT em um dos rejeitos aqui estudados.

Como conclusão preliminar, pode ser considerada que a determinação das curvas de compressibilidade por meio do ensaio CRD foi satisfatória, tendo sido mostrado que os resultados deste tipo de ensaio se ajustam bem a outros tipos, como o HCT, o ensaio de coluna e o edométrico convencional. Porém, no tocante à permeabilidade, um estudo mais aprofundado das taxas de carregamento aplicadas deve ser realizado, já que o cálculo deste parâmetro é altamente sensível à condição de ensaio. Portanto, para a determinação das leis de permeabilidade, fica sugerido o uso de ensaios do tipo HCT, que apresentaram boa concordância mesmo entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

As relações de compressibilidade e permeabilidade da lama vermelha OP neutralizada são consideradas de estarem bem estabelecidas. Para a lama vermelha OP não neutralizada foi admitido ela possuir as mesmas características da lama neutralizada nesta primeira análise. Porém, mais estudos deverão ser realizados para confirmar este comportamento. Com relação à compressibilidade da lama de lavagem, também está sendo aceito que a sua compressibilidade está razoavelmente bem definida, faltando, contudo, maiores estudos para a permeabilidade, já que os resultados obtidos, apesar de mostrarem uma semelhança com relação à sua taxa de variação com o índice de vazios, foram muito dispersos. No caso das lama vermelha SL e PC, foram muito pouco os ensaios realizados e um estudo mais aprofundado seria necessário para se chegar a uma conclusão. Resultados preliminares foram apresentados para os dois resíduos em questão, e que já permitem uma primeira estimativa.