

DESENVOLVIMENTO E ENSAIOS INICIAIS EM CONSOLIDÔMETRO DE LAMA EM CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA.

Prof. Assist. Luiz Guilherme F. S. de Mello - Escola Politécnica da USP
Eng. Ney Rosário Amorim - Escola de Engenharia de São Carlos
Eng. Frederico Carlos Meller - Engesolos Eng. de Solos e Fundações
Eng. Artur Rodrigues Quaresma Filho - Engesolos Eng. de Solos e Fundações

RESUMO

São produzidos anualmente, em todo o mundo, milhões de toneladas de rejeitos de granulometria fina. Estes rejeitos são oriundos de operações de dragagem de vias navegáveis e/ou da exploração e processamento de materiais e minérios em usinas de beneficiamento (Bromwell & Carrier III, 1979).

Para uma perfeita harmonia entre o meio ambiente e a fonte que produz o rejeito, é necessário que estes sejam apropriadamente estocados. Esta preocupação (estocagem dos rejeitos de forma econômica e com mínima agressão ao meio ambiente) tem pressionado cada vez mais o desenvolvimento do conhecimento das características geotécnicas dos mesmos.

Com a finalidade de se estudar e simular em laboratório os fenômenos que condicionam seu comportamento de campo, foi desenvolvido o consolidômetro de lama, onde pode ser simulado o adensamento de materiais finos e a obtenção das leis governantes deste processo, as quais são:

$e = f(\bar{\sigma})$	Variação do índice de vazios com o nível de tensão efetiva
$k = f(e)$	Variação da permeabilidade com o índice de vazios

O presente trabalho apresenta o aparelho desenvolvido e os resultados iniciais coletados em testes de adensamento de rejeitos do processamento de minério aurífero.

1. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

O fenômeno da sedimentação de suspensões sólidas e o adensamento dos sedimentos sob peso próprio são comuns na formação de solos sedimentares e numa variedade de operações industriais tais como: espessamento de lamas, disposição dos rejeitos de beneficiamento de minérios, operações de dragagem, etc. Monte e Krizek (1976), estudando o processo de formação de solos sedimentares finos, observaram que existe uma condição ou estado em que as partículas em suspensão começam a interagir uma sobre as outras e este estado foi definido como limite fluido do solo. Neste estado, a tensão de cisalhamento é nula, porém em todo o estado subsequente, a estrutura seria capaz de resistir a estas diminutas tensões. O limite fluido representa o estado em que o solo está livre de tensões e pode ser definido como teor de umidade da suspensão no seu estado inicial de formação. O índice de vazios no limite fluido é definido como índice de vazios inicial, que representa o estado inicial da formação do solo.

Para se estudar as alternativas de disposição de materiais finos depositados hidraulicamente, é fundamental que se determine a vida útil de reservatórios de estocagem ou que se otimize o seu enchimento em função do investimento necessário para o alteamento ou construção de novos reservatórios. Outra informação de extrema importância é a da vazão de água continuamente liberada pelo adensamento dos materiais depositados, que pode ser incorporada ao balanço hídrico do empreendimento. Para tanto é necessário a previsão da compressão do material por adensamento. Estes materiais apresentam, normalmente, elevados índices de vazios e teor de umidade inicial, o que resulta em grandes deformações.

Carrier III et alli (1983) observam que a teoria clássica de Terzaghi não é adequada para a previsão do comportamento de solos altamente compressíveis ou materiais que se adensam pelo peso próprio, nos quais são esperadas grandes deformações em relação a espessura inicial da camada em análise. Ao invés desta, é essencial que a teoria do adensamento unidimensional não linear para grandes deformações seja usada.

As hipóteses principais da teoria de Terzaghi são:

- relação linear entre índice de vazios e tensão;
- coeficiente de permeabilidade constante;
- deformações assumidas como infinitesimais.

Estas hipóteses são extremamente restritivas uma vez que foram criadas para prever o comportamento de materiais onde apenas pequenas deformações eram toleradas, como é o caso de fundações de edifícios.

As mais importantes condições consideradas na teoria das deformações finitas são:

- não há restrições quanto às deformações do material durante o adensamento;
- o coeficiente de permeabilidade é variável durante o adensamento;
- a relação entre índice de vazios e tensão efetiva pode ser linear ou não linear

Gibson et alli (1967) formularam a equação geral da teoria da deformação finita com hipóteses mais gerais e capaz de prever satisfatoriamente o comportamento do adensamento de materiais finos. Estas equações podem ser resolvidas por um método numérico apropriado, tendo em mãos as condições iniciais de contorno e as propriedades dos materiais (leis de compressibilidade e permeabilidade).

As leis de compressibilidade e permeabilidade podem ser obtidas da seguinte forma:

- relações empíricas baseadas no conhecimento anterior do comportamento de inúmeros rejeitos;
- através de dados coletados em instrumentação de campo;
- em ensaios de laboratório com utilização de consolidômetro de lama, a deformação ou tensão controlada, em aparelhos de consolidação em fluxo restrito ou em centrífugas.

2. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

CONSOLIDÔMETRO DE LAMA

O consolidômetro destinado à determinação das leis de compressibilidade e de permeabilidade de materiais de granulometria fina, no estado de lama, naturais ou artificiais, foi especialmente desenvolvido a partir da experiência anterior dos autores.

O aparelho é apresentado esquematicamente na figura 1 abaixo:

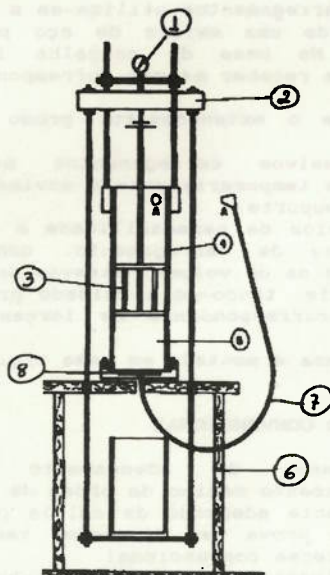


FIGURA 1 - CONSOLIDÔMETRO

- | | |
|-----------------|------------------|
| 1. EXTENSÔMETRO | 5. AMOSTRA |
| 2. CANGALHA | 6. MESA |
| 3. PISTÃO | 7. DRENO DA BASE |
| 4. CILINDRO | 8. PEDRA POROSA |

O cilindro é de acrílico sem costura, onde se processa a sedimentação e o adensamento do material depositado na forma de lama. Na fase inicial do ensaio, as deformações são lidas ao longo de uma escala milimétrica (não representada no desenho) colada ao longo de uma geratriz externa do cilindro, uma vez que as tensões aplicadas são diminutas e, portanto, ainda não se instalou o extensômetro acoplado à cangalha.

O cilindro é fixado à base através de quatro parafusos diametralmente opostos. A base é sede da pedra porosa. A vedação entre o cilindro e a base é feita com um anel de borracha. No centro apresenta um furo, saída para o dreno da base.

Para a aplicação de cargas no material em teste de provas, utiliza-se o pistão também confeccionado em acrílico, com dois tampos, que garantem sua estabilidade e deslocamento vertical. Os tampos são perfurados para permitir a passagem da fase líquida liberada durante o adensamento da lama. O tampo inferior que fica em contato com a lama recebe um disco de papel de filtro para impedir a passagem de sólidos. O cilindro foi fabricado com secção rigorosamente igual ao longo de toda sua altura, garantindo um perfeito deslizamento do pistão, sem deixar lama subir na sua superfície interna.

A haste do pistão nos últimos cinco centímetros tem diâmetro reduzido, criando-se assim uma base para apoio de aplicação de cargas pequenas (fase inicial do ensaio).

Para a aplicação de carregamentos utiliza-se a cangalha que se apoia no pistão através de uma esfera de aço para garantir a verticalidade da carga. Na base da cangalha foi montado um recipiente de plástico para receber massas correspondentes às fases sucessivas de carregamento.

Nesta fase instala-se o extensômetro, preso ao suporte no quadro do cilindro.

Para que os sucessivos carregamentos sejam aplicados instantaneamente, impede-se temporariamente o movimento da cangalha com travas, uma para cada suporte.

Para se realizar ensaios de permeabilidade a carga constante da amostra, em cada grau de carregamento, conduz-se a água percolada ao sistema de medida de volume, através do dreno acoplado à descarga da base da célula, tendo-se o cuidado prévio de reduzir o carregamento do valor correspondente às forças de percolação aplicadas.

O consolidômetro de lama é montado em mesa rígida e de elevada inércia.

PRENSA DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL

Completado o processo de adensamento de lama no consolidômetro, com carregamento máximo da ordem de 18 KPa, extrai-se o material já parcialmente adensado da célula para prosseguir, após moldagem do corpo de prova nas dimensões requeridas, com o ensaio de adensamento em prensa convencional.

Em se tratando de equipamento sobejamente conhecido, dispensa-se seu detalhamento.

Todavia, é importante salientar que caso no ensaio de adensamento deva ser conhecido o coeficiente de permeabilidade ao final de cada estágio de carregamento, usa-se o anel de adensamento fixo.

3. MATERIAL ENSAIADO

O material objeto deste estudo foi um rejeito de beneficiamento de minério aurífero originário das seguintes operações básicas de beneficiamento:

- britagem
- moagem
- ciclonagem
- moagem do "underflow"
- flotação
- espessamento da lama

Preliminarmente, foram realizados ensaios rotineiros de caracterização da mecânica dos solos e também alguns específicos para o estudo dos rejeitos.

O quadro abaixo resume os principais destes resultados:

MATERIAL QUE PASSA NA # 40	MATERIAL QUE PASSA NA # 200
LL = 34 %	LL = 38 %
LP = 22 %	LP = 25 %
IP = 12 %	IP = 14 %
$\rho_1 = 2.79$ CLASSIFICAÇÃO ABNT: Silte Arenoso TEOR DE SÓLIDOS INICIAL: $S_i = 50 \%$	

O teor de sólidos inicial foi obtido a partir do resultado de ensaios de sedimentação em 24 horas, em tubos de ensaio para garantir a atuação de tensões efetivas diminutas. Seu valor é compatível com a experiência existente.

4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

A execução do ensaio em consolidômetro de lama, abrange as seguintes etapas:

- determinação do teor de sólidos inicial;
- preparação da lama;
- preparação do equipamento;
- lançamento da lama;
- adensamento sob peso próprio, leituras;
- adensamento sob cargas aplicadas, leituras;
- medida de permeabilidade, leituras;
- amostragem para adensamento convencional;
- adensamento convencional.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS INICIAL

Considera-se que a lama a ser submetida a ensaio em consolidômetro, apresente um teor de sólidos tal que já tenha concluído a fase de sedimentação, pronta para iniciar a transferência de tensões, em fenômeno de adensamento. Para se determinar experimentalmente este teor de sólidos inicial, prepara-se alguns tubos de ensaio com lama a teores de umidade entre 7 e 10 LL. Deixa-se os tubos de ensaio em repouso por 24 horas, drena-se a água sobrenadante e determina-se o teor de umidade e o correspondente teor de sólidos.

PREPARAÇÃO DA LAMA

Uma vez definido o teor de sólidos inicial para o ensaio, prepara-se a lama de modo que seja satisfeita a condição discutida. Devem ser preparados cerca de 4.000 cm³ de lama, para que, no final do adensamento, se tenha amostra com altura suficiente para talhagem de corpos de prova a serem submetidos ao adensamento convencional.

A lama é homogeneizada mecânica ou manualmente, por um período aproximado de 30 minutos.

A amostra é recolhida para a determinação do teor de umidade inicial.

PREPARAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Coloca-se o consolidômetro numa mesa, que deverá estar perfeitamente nivelada.

Certifica-se que o sistema de drenagem esteja totalmente saturado.

Instala-se, próximo ao equipamento, um recipiente elevado, cheio d'água sobrenadante do próprio rejeito, que será utilizada para encher o cilindro.

LANÇAMENTO DA LAMA

A lama deverá ser cuidadosamente colocada a partir do centro do cilindro, de forma contínua e rápida, procurando-se garantir a homogeneidade da amostra, sem que a célula seja respingada pelo rejeito.

ADENSAMENTO SOB PESO PRÓPRIO

Logo após o lançamento da lama no cilindro, faz-se a leitura da altura inicial da amostra, pois tem início o processo do adensamento sob peso próprio, com drenagem simples (dreno de base tamponado).

As leituras da variação de altura em cm. são feitas ao longo da escala milimétrica aplicada ao cilindro. As leituras são tomadas em tempos progressivos até a ocorrência de estabilização.

Constroem-se curvas recalque \times log de tempo em cada estágio de carregamento. Admite-se a estabilização do adensamento, quando a curva indicar um comportamento assintótico à escala de log de tempo, e/ou a diferença entre as duas últimas leituras do recalque, for menor que 5 % da variação do recalque total do estágio.

ADENSAMENTO SOB CARGAS APLICADAS

Após a estabilização pelo peso próprio, observados os critérios acima descritos, inicia-se a fase de carregamento semelhante ao adotado nos ensaios de adensamento convencional.

Antes da aplicação das cargas deve-se decidir se o ensaio será executado com simples drenagem (dreno da base fechado) ou dupla drenagem (dreno da base aberto). A maioria das amostras são ensaiadas com dupla drenagem, pois a velocidade de adensamento é maior. No presente trabalho executou-se o ensaio com dupla drenagem.

A primeira carga a ser aplicada é equivalente ao peso do pistão que é introduzido na célula, posicionado cuidadosamente sobre a superfície livre da lama, onde é mantido imobilizado, enquanto se enche o cilindro com água sobrenadante do próprio rejeito, até a descarga de topo.

Com o cilindro cheio d'água e o pistão livre, tira-se o tampão do dreno da base conectando-o à descarga de topo no cilindro.

Procede-se à leituras altura da amostra \times tempo, até a estabilização.

Prossegue-se carregando o pistão, dobrando-se a carga do estágio anterior, até à metade da carga da cangalha. A aplicação das cargas deve ser total e instantânea. Como até o presente estágio, o extensômetro ainda não fora instalado, foram lidas deformações através da altura de rejeito \times tempo.

Chegado o momento do incremento de carga corresponder ao peso da cangalha, monta-se a travessa superior. A cangalha é posicionada e mantida imobilizada através da aplicação da travessa, sem ainda transmitir carga ao pistão.

O extensômetro é montado e zerado.

Substituem-se as cargas presentes no topo da haste do pistão, por outras com valores que permitam avaliar o carregamento, da grandeza da força de percolação, quando da realização de ensaio da permeabilidade, após a estabilização dos recalques, no respectivo estágio de carregamento. Ver item Medida de Permeabilidade.

Passa-se ao carregamento com a cangalha, tirando-se as travas, apoiando-a na esfera de aço, colocada no topo do pistão.

As leituras das deformações passam a ser feitas no extensômetro versus tempo.

A cada novo estágio de pressão, imobiliza-se a cangalha com as travas.

Os estágios de pressão são repetidos até que se consiga uma amostra de consistência tal, que permita a sua retirada em condição indeformada do cilindro, para se talhar corpos de prova destinados ao ensaio de adensamento convencional, ou até à capacidade de carregamento do equipamento; em geral são oito a doze os estágios de pressão.

MEDIDAS DE PERMEABILIDADE

Um ensaio de permeabilidade é feito a partir do terceiro estágio de pressão, carregamento com a cangalha, e após a estabilização dos recalques. O ensaio é de carga hidráulica constante.

A carga piezométrica que gera o fluxo para medida de permeabilidade, é criada pelo desnível entre a superfície livre da água sobrenadante e a conexão para o elemento coletor.

Cuidados especiais são tomados para evitar o adensamento da lama gerado pelas forças de percolação.

O ensaio de permeabilidade é normalmente executado com duas ou tres cargas piezométricas.

Terminado o ensaio de permeabilidade, desconecta-se o dreno de base do tubo de ensaio, para recolocá-lo na descarga de topo do cilindro. Outrossim, recoloca-se a carga removida da haste do pistão no início do ensaio de permeabilidade, e somente então, passa-se para o estágio de pressão seguinte.

AMOSTRAGEM

Alcançado o último estágio de carregamento programado, leva-se a amostra à prensa edométrica capaz de aplicar tensões maiores.

Para isto, proceder como segue:

- remover todas as cargas aplicadas;
- sifonar toda a água sobrenadante;
- soltar os parafusos de fixação do cilindro à base;
- remover lentamente o cilindro mantendo o pistão repousando sobre a amostra;
- remover o pistão;
- talhar tres corpos de prova da amostra, para ensaios de adensamento convencional;
- anotar a posição de cada corpo de prova talhado, no bloco;

- coletar aparas de material talhado para determinação do teor de umidade e ensaio de granulometria com sedimentação.

ADENSAMENTO CONVENCIONAL

Para complementar os dados sobre compressibilidade-permeabilidade, obtidos em primeira fase no consolidômetro de lama, prossegue-se com o ensaio em prensa edométrica, com a qual podem ser atingidos elevados estágios de tensões.

O equipamento e a metodologia do ensaio, dispensam ser pormenorizados, já que há muito tempo são de uso corrente.

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Inicialmente executou-se um ensaio de adensamento teste com a finalidade de aferir o equipamento. Utilizou-se uma lama preparada e homogeneizada com características semelhantes àquelas do rejeito a ser posteriormente ensaiado.

Este procedimento permitiu uma maior interação com o mecanismo do ensaio, além da calibração e ajustes do equipamento.

A lama foi preparada em laboratório com teor de sólidos inicial $S_i = 50\%$, o qual foi adotado como sendo o ponto de partida do adensamento da lama, conforme descrito anteriormente no item 4. Considerou-se que naquele instante a sedimentação já havia ocorrido e assim determinado o índice de vazios inicial, $e_i = 2.82$.

Observa-se também que, na prática, o valor de e_i não tem uma grande influência na previsão da capacidade (vida útil) dos reservatórios em estudo, uma vez que grandes variações de compressibilidade ocorrem logo com o início de atuação das tensões efetivas.

Executou-se todo o carregamento do material no consolidômetro em nove estágios de carga. Partiu-se do peso próprio da lama, calculado no plano médio da amostra até a tensão de 20 KPa. A partir do material adensado a este nível de tensões, moldou-se uma amostra indeformada e prosseguiu-se o ensaio de adensamento na prensa edométrica, com carregamentos incrementáveis até a tensão de 1600 KPa.

6. ANÁLISE DOS ENSAIOS

Os gráficos que relacionam e , $\bar{\sigma}$, K , podem ser observados a seguir, nas figuras 2 e 3.

Segundo Carrier III et alli 1983, a lei de compressibilidade para um determinado material pode ser aproximada a uma relação exponencial:

$$e = A \bar{\sigma}^B$$

onde A e B são coeficientes característicos do material.

Para este material, em particular, a relação obtida em laboratório foi:

$$e = 1.6119 \bar{\sigma}^{-0.0689} \quad (\bar{\sigma} \text{ em KPa})$$

É comum utilizar-se de fórmulas empíricas nas etapas iniciais de estudos da disposição de um rejeito:

$$e = A \cdot \sigma^B$$

$$K = E \cdot e^F$$

Fórmula 1
(Carrier III et alli, 1983)

$$\left. \begin{aligned} e &= \alpha \left(\frac{\sigma}{P_{atm}} \right)^{\beta} + \epsilon \\ k &= \mu \frac{(e - \epsilon)^{\delta}}{1 + e} \end{aligned} \right\}$$

Fórmula 2
(Carrier III & Beckman, 1984)

onde A, B, E, F, α , β , μ , δ e ϵ são parâmetros dependentes das características geotécnicas do material, obtidas do ajuste das curvas que geraram as fórmulas empíricas.

A título de verificação da correlação entre os resultados obtidos das fórmulas e os resultados de laboratório, plotou-se as três curvas mostradas nas figuras 2 e 3.

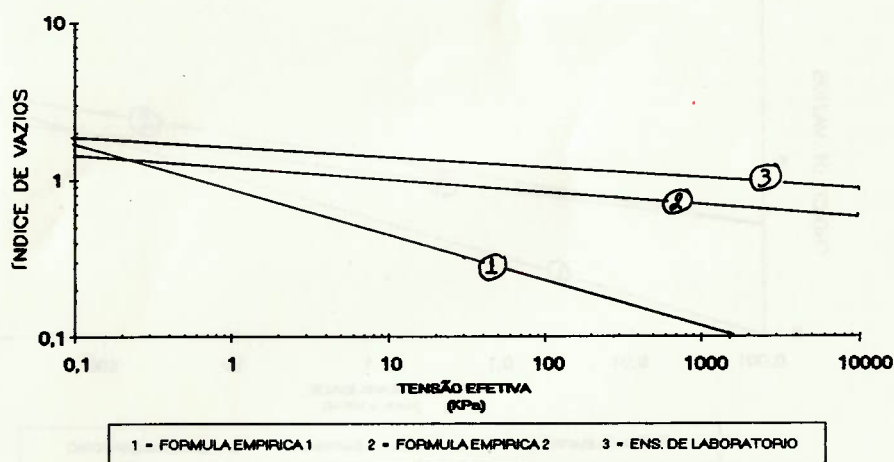


FIGURA 2 - ÍNDICE DE VAZIOS X TENSÃO EFETIVA

Observando as curvas da fig. 2, nota-se que houve uma boa aproximação entre as curvas 2 e 3, o mesmo não acontecendo para a curva 1.

σ (KPa)	e		
	CURVA 1	CURVA 2	CURVA 3
1.0	0.90	1.10	1.60
10	0.48	1.00	1.40
100	0.24	0.86	1.20

Do quadro acima nota-se que para tensões próximas a 1.0 KPa há uma maior compatibilidade entre as curvas. Observa-se também que o índice de vazios para a curva 1 decresce muito mais rapidamente com o acréscimo das tensões efetivas que para as outras curvas.

Comentando-se também a figura 3 com base no quadro abaixo, nota-se que:

e (KPa)	K (cm/s x 10 ⁻⁶)		
	CURVA 1	CURVA 2	CURVA 3
2.0	300	90	700
1.0	20	0.55	1.60
0.5	1.0	0.0025	0.003

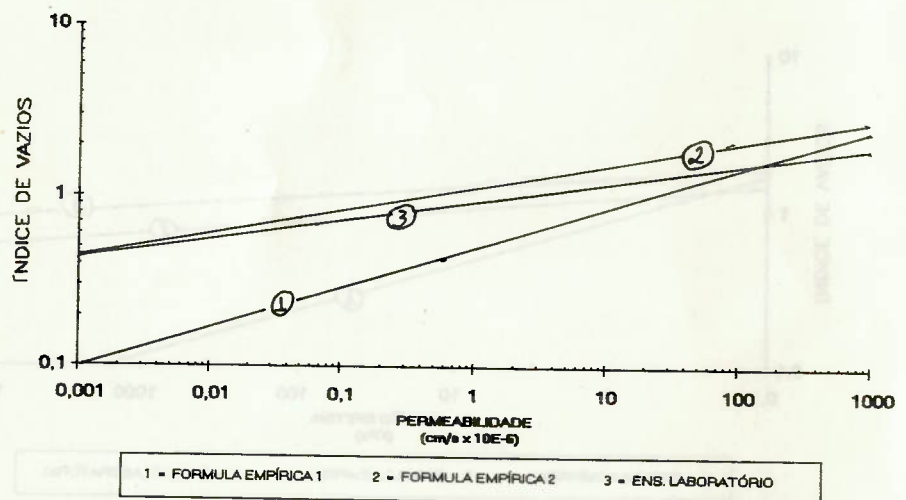


FIGURA 3 - ÍNDICE DE VAZIOS X PERMEABILIDADE

A curva 3 apresenta um comportamento intermediário entre as curvas 1 e 2 em quase todo o seu domínio. Para o índice de vazios igual a 2, a curva 1 está próxima das demais. Esta distância, no entanto, aumenta à medida que o índice de vazios diminui.

Observando as figuras 2 e 3 simultaneamente, nota-se que a equação empírica 2 representa melhor o comportamento do rejeito estudado quando estimado a partir do resultado de ensaios de caracterização voltado a rejeitos.

A melhor compatibilidade entre as leis de comportamento geradas a partir das correlações empíricas propostas por Carrier III & Beckman, 1984 em relação àquelas propostas por Carrier III et alli, 1983 é razoável na medida em que a primeira série de parâmetros empíricos além de se apoiar nos limites de Atterberg também inclui a atividade dos argilo-minerais presentes nos rejeitos. As correlações empíricas constantes do trabalho de Carrier III et alli, 1983 se apoiam somente nos limites de Atterberg, não levando em consideração a atividade da fração argilosa presente.

7. CONCLUSÃO

O equipamento desenvolvido permite a determinação das leis de comportamento (compressibilidade e permeabilidade) de materiais finos desde elevados índices de vazios. Estas leis de comportamento por sua vez permitem o estudo aprimorado e a otimização de planos de deposição de rejeitos, otimizando o capital investido e minimizando a agressão ao meio ambiente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROMWELL, L. G. & CARRIER III, W. D. (1979) Consolidation of Fine Grained Mining Wastes, in: Proceedings of the Sixty Panamerican Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lima, Peru, vol. 1, pg. 293 - 304.

CARRIER, W. D. III; BROMWELL, L. G. & SOMOGYI, F. (1983): Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds, in: J. Geotechnique Engineering, ASCE, 109, nº 5, pg 699 - 716.

CARRIER, W. D., III & BECKMAN, J. F. (1984): Correlations Between Index Tests and the Properties of Remoulded Clays, in: Geotechnique 34, nº 2, pg 211-228.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L. & HUSSEY, M. J. L. (1967): The Theory of one-dimensional Consolidation of Saturated Clays: I. Finite Nonlinear Consolidation of this Homogeneous Layers, in: Geotechnique 17, nº 3 pg 261-273.

MONTE, J. L. & KRIZEK, R. J. (1976): One-Dimensional Mathematical Model for Large-Strain Consolidation, in: Geotechnique, 26, pg 495-510.