

**ССТ-УФРБ**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
AVENIDA APRIGIO VELOSO, 882 - Cx. POSTAL 518  
CAMPINA GRANDE - PB  
BRASIL

DIGITALIZAÇÃO:  
SISTEMOTECA - UFCG

Aos meus pais e à minha esposa  
pelo incentivo que me deram,  
tornando possível a realização  
deste trabalho.

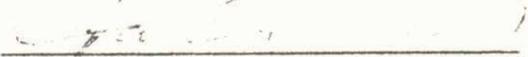
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT

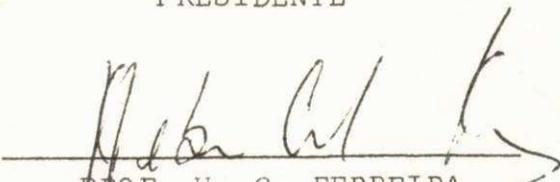
INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PERCOLAÇÃO E DA ACIDEZ DA ÁGUA NAS  
CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PER  
MEABILIDADE DE UM SOLO VERMELHO DO ESTADO DA PARAÍBA

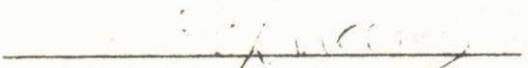
ADEMILSON MONTES FERREIRA  
ENGENHEIRO CIVIL

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLO  
GIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISI  
TOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
(M.Sc.).

APROVADO POR:

  
PROF. J. G. CABRERA  
PRESIDENTE

  
PROF. H. C. FERREIRA  
EXAMINADOR

  
PROF. F. B. DE LUCENA  
EXAMINADOR

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL  
MAIO - 1976

## Lista de Símbolos Utilizados

$\sigma'$	tensão efetiva
$\sigma_1$	tensão principal maior
$\sigma_3$	tensão principal menor
$u$	pressão neutra
$\gamma_s$	peso específico aparente seco
$W$	teor de umidade
$\epsilon$	deformação axial
$C'$	parâmetro coesão efetiva
$C_{cu}$	parâmetro coesão em tensões totais
$\phi'$	ângulo de atrito em tensões efetivas
$\phi_{cu}$	ângulo de atrito em tensões totais
$q$	carga de ruptura
ASTM	American Society for Testing and Materials

THE INFLUENCE OF SEEPAGE TIME AND ACIDITY OF  
WATER ON THE PERMEABILITY AND SHEAR STRENGTH BEHAVIOUR  
OF A RED SOIL FROM THE STATE OF PARAIBA, BRASIL

M.Sc. Thesis

by

Ademilson Montes Ferreira

A B S T R A C T

This laboratory investigation deals with the influence of seepage time and level of acidity of water on the permeability and strength behaviour of a red soil from the State of Paraiba.

Specimens statically compacted were subjected to water percolation for varying times (24, 48, 72 and 96 hours), their permeabilities measured at intervals of 12 hours and their triaxial strength parameters at the end of the various percolation times. Three levels of acidity of the seepage water were used, i.e, 3.25, 7.3 and 12.4.

Equipment consisting of molds and a multipermeameter of constant head were designed and constructed for the study, and a novel technique for saturation of specimens employed.

It is shown that the equipment used provides statistically acceptable results and that its use has the advantage of shortening the time of testing.

The coefficient of permeability was found to vary inversely with the pH of the seepage water. Time of seepage by unidirectional flow caused a decrease of permeability for any of the acidity levels investigated.

The strength parameters in terms of total and effective cohesion and angle of internal friction are noticeably affected by the acidity of the seepage water. The values of  $C'$  and  $\phi'$  decrease slightly when the pH is lowered

from 7.3 to 3.25. Increasing the pH to 12.4 causes a further decrease in the values of  $C'$  and  $\phi'$ . A qualitative interpretation of this phenomena is offered.

A limited pilot study of the effects of controlled drying on the shear strength of the Sapé-Mari soil showed that drying 6 hours at 60°C increases the values of  $C'$  and decrease  $\phi'$  for all the conditions of time of seepage and pH level.

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PERCOLAÇÃO E DA ACIDEZ DA ÁGUA NAS  
CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PER  
MEABILIDADE DE UM SOLO VERMELHO DO ESTADO DA PARAÍBA

Tese de Mestrado

de

Ademilson Montes Ferreira

S U M Á R I O

Esta pesquisa de laboratório trata da influência do tempo de percolação e do nível de acidez da água nas características de permeabilidade e resistência de um solo vermelho do Estado da Paraíba.

Amostras estaticamente compactadas foram submetidas a percolação de água por diversos tempos (24,48,72 e 96 horas), suas permeabilidades medidas a intervalos de 12 horas e seus parâmetros de resistência triaxial no fim dos vários tempos de percolação. Três níveis de acidez da água de percolação foram usados, 3,25, 7,3 e 12,4.

Equipamento constituído de moldes e um multipermeâmetro de nível constante foi projetado e construído para o estudo, e uma nova técnica para saturação das amostras utilizadas.

O equipamento usado mostrou resultados estatisticamente aceitáveis e seu uso tem a vantagem de diminuir o tempo de ensaio.

O coeficiente de permeabilidade variou inversamente com o pH da água de percolação. Tempo de percolação por fluxo unidirecional causou uma diminuição de permeabilidade para qualquer dos níveis de acidez investigado.

Os parâmetros de resistência em termos de coesão total e efetiva e ângulo de atrito são afetados pela acidez da água de percolação. Os valores de  $C'$  e  $\phi'$  diminuem quando o pH é diminuído de 7,3 para 3,25. Aumentando o pH para 12,4 ocorre um decréscimo adicional nos valores de  $C'$  e  $\phi'$ . É feita uma interpretação qualitativa deste fenômeno.

Um estudo piloto limitado dos efeitos da se  
cagem na resistência ao cisalhamento do solo Sapé-Mari mostrou  
que a secagem por 6 horas a 60°C aumenta os valores de  $C'$  e di  
minui  $\phi'$  para todas as condições de tempo de percolação e ní  
vel de pH.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	Introdução	3
	Definição	3
	Origem e Formação	5
	Classificação	11
	Problemas de engenharia nas estruturas de terra construídas com solo tropical vermelho	15
CAPÍTULO III	OBJETIVO DA PESQUISA	19
CAPÍTULO IV	MATERIAIS	20
	Coleta de amostras	23
	Propriedades do solo estudado	23
CAPÍTULO V	MÉTODOS E EXECUÇÃO DE ENSAIOS	27
	Introdução	27
	Ensaio de granulometria	27
	Determinação dos limites de Atterberg	29
	Ensaio de compactação	29
	Preparação dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial	29
CAPÍTULO VI	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	43
	Introdução	43
	Características de compactação do solo estudado	43
	Resultados dos ensaios de permeabilidade	43
	Ensaio consolidado não drenado	44
CAPÍTULO VII	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
	Introdução	55

	Propriedades físicas e químicas e características de compactação	55
	Coefficiente de permeabilidade dos solos estudado	56
	Resistência ao cisalhamento do solo estudado	58
CAPÍTULO VIII	CONCLUSÕES	67
CAPÍTULO IX	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	AGRADECIMENTOS	74
APÊNDICE A	ALGUNS GRÁFICOS	75
APÊNDICE B	RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	77
APÊNDICE C	TABELAS DOS RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS TRIAXIAIS CON SOLIDADOS NÃO DRENADOS	81

## CAPÍTULO I

### Introdução

A complexibilidade e magnitude das estruturas de engenharia de terra tais como estruturas de rodovias, barragens e aterros, tem aumentado muito rapidamente nos países em desenvolvimento das regiões tropicais visando um crescimento econômico e industrial mais rápido. Como resultado, engenheiros civis e cientistas especializados utilizam cada vez mais solos disponíveis nos locais de construção, mas cujas propriedades e comportamento na engenharia têm ainda de ser investigado. O maior exemplo desta situação é o uso de solos vermelhos produzidos pelo processo de laterização, estes são mais conhecidos como solos lateríticos e lateritas.

É bem conhecido o fato de que as propriedades intrínsecas de um solo têm influência fundamental em seu comportamento na engenharia. A relação entre a performance na engenharia e as propriedades intrínsecas é razoavelmente bem conhecida para solos desenvolvidos sob condições climática temperadas e a ciência empírica de Mecânica dos Solos tem avançado bastante com o desenvolvimento destas relações. Contudo, quando o engenheiro e cientista especializado tem de tratar com solos tropicais produzidos principalmente como um resultado de intemperismo químico em temperaturas razoavelmente altas por um processo conhecido como laterização (remoção de bases e álcalis com relativa ou absoluta acumulação de óxidos de ferro e alumínio), o uso dos princípios ortodoxos da Mecânica dos Solos tem grande número de limitações, pois a influência das propriedades intrínsecas destes solos vermelhos no seu comportamento na engenharia não está ainda definida.

Um dos mais interessantes e menos conhecidos aspectos do comportamento de solos lateríticos é relacionado com as alterações no comportamento de engenharia e desempenho que podem ser provocadas pelo fluxo de água através de uma estrutura como uma barragem, talude ou um aterro. Se as condições de acidez da água que percola através da estrutura variam, e o fluxo torna-se irregular ou cessa completamente de

rações na composição do solo laterítico. Os princípios teóricos da geoquímica dessas mudanças são bem conhecidas, contudo não existe praticamente nenhuma informação sobre investigações no campo ou em laboratório que correlacionam mudanças de composição e estrutura com seu desempenho na engenharia (1).

O desenvolvimento industrial do Brasil na última década tem sido espetacular existindo ainda clara indicação de que o crescimento industrial será mantido, levando os engenheiros locais por exemplo, a elaboração de vastos programas de irrigação os quais exigem a construção de barragens de todos os tamanhos; grande número destas barragens tem sido construído com solos lateríticos locais, ou foram planejados para sê-lo. Desde que os efeitos a longo prazo de percolação e esvaziamento não são bem conhecidos, parece de suma importância que estudos no campo e laboratório sejam realizados para assegurar que as estruturas de solos lateríticos estão projetadas e construídas baseadas em um sadio critério de engenharia.

## C A P Í T U L O    I I

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### Introdução

Apesar da realização de inúmeras pesquisas sobre os solos vermelhos existentes nos países tropicais, divergências entre diversos pesquisadores dificultam bastante a aceitação universal de uma definição para este tipo de solo.

Esta revisão bibliográfica trata brevemente os seguintes aspectos de interesse para o estudo de solos lateríticos: Definição, Origem e Formação, Classificação e Problemas de Engenharia nas estruturas de terra.

#### Definição

O termo laterita foi proposto por Buchanan para designar um material encontrado por ele em Malabar, Índia, em 1807, e que apresentava a particularidade de endurecer quando de sua exposição ao sol, sendo por isso talhado em forma de tijolo (em latim later) e utilizado como tal pelos nativos em suas construções. Deve-se ressaltar que esse material apresentava a cor vermelha e continha grande quantidade de ferro (minério), em veios e camadas, mas foi ao material em si, e não ao ferro, que foi dada, por Buchanan, a denominação de Laterita (2).

A partir de Buchanan, muitos pesquisadores passaram a utilizar o termo Laterita para a designação de solos das regiões tropicais, mas em virtude da enorme variação nas características destes solos, muitos outros termos foram propostos resultando em uma grande divergência de conceitos que dificulta a adoção de uma definição universal (3).

Segundo Lucena (3), Fermor em 1911, definiu laterita como sendo resultante da decomposição superficial experimentada por determinadas rochas com remoção em solução da combinação sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio, e com acumulação residual assistida sem dúvida pela ação capilar.

substituição e troca de uma mistura hidratada de óxidos de ferro, alumínio e titânio, raramente com magnésio, sendo esses óxidos denominados de constituintes lateríticos.

Diversos autores passaram então a apresentar definições baseadas na composição química dos solos tropicais, surgindo segundo Novais Ferreira (4) a proposição de Harrassowitz, em 1926, baseada na relação molecular sílica/alumina. Utilizando essa relação Martin e Doyne (5) classificaram como laterita os solos que apresentavam a relação molecular sílica/alumina menor que 1,33.

Em virtude da acentuada presença de óxido de ferro nos solos tropicais vermelhos, a proposição de Harrassowitz foi criticada, surgindo a definição apresentada por Winterkorn (6) baseada na relação sílica/sesquióxidos (óxido de ferro e alumínio) da fração menor que  $2\mu$ .

Alexander e Cady, segundo Lucena (3), definem laterita como um material rico em óxidos secundários de ferro e alumínio ou ambos, quase isentos de bases e silicatos primários, mas podendo conter grandes quantidades de quartzo e caulinita. Esta definição é apresentada também por Vallerga e Van Til (7).

Grant (8) define laterita como um material que apresenta uma acentuada acumulação e frequente segregação de óxidos secundários de ferro (também se encontram invariavelmente presentes alguns óxidos de alumínio), sendo capaz de endurecer para formar "ferricrete" sob oxidação e/ou desidratação.

Little, citado por Lucena (3), define laterita como sendo: rochas ígneas tropicais desgastadas "in situ", as quais estão decompostas parcialmente ou totalmente, com uma concentração de sesquióxidos de ferro ou alumínio, havendo dispêndio de sílica.

No Brasil, a definição aceita é a formulada pelo DNER (9), baseada na relação sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio proposta por Winterkorn: "solo laterítico, solo cuja fração coloidal (abaixo de  $2\mu$ ) apresenta relação sílica/

dades: presença apreciável de sesquióxidos de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e fraco teor de matéria orgânica".

Do ponto de vista do engenheiro civil, uma definição exata não é necessária nem possível, desde que o que mais interessa a este são as propriedades de engenharia. Por isso o autor deste trabalho concorda com Lucena (3) na definição generalizada que ele propõe: Solos Vermelhos são aqueles produzidos por um processo de laterização.

#### Origem e Formação

As divergências existentes quanto à definição do termo laterita existem, da mesma maneira, quanto à origem e formação desses solos vermelhos. Em um ponto, contudo, há aceitação geral: esses solos são característicos de regiões tropicais que apresentam uma estação seca bem definida, antecedida de uma estação chuvosa (10), e normalmente são formados "in situ", existindo dessa maneira, uma relação de afinidade com as formações rochosas subjacentes (11).

Rochas quando expostas, ou próximas à superfície, encontram-se em um meio químico e físico frequentemente bastante diferente daquele no qual foram originalmente formadas. Os minerais que constituem as rochas podem reagir quimicamente com a água da chuva, água subterrânea, sólidos dissolvidos e gases do meio próximo à superfície, para formar novos minerais que estão em equilíbrio com as condições superficiais. Alguns materiais podem ser carreados em solução na água subterrânea. O resultado dessas variações na rocha é um material de características de solo e com propriedades físicas, químicas e mineralógicas completamente diferentes das da rocha original.

As variações que ocorrem na rocha por estes processos são conhecidas em geologia por intemperismo, o qual pode ser físico (inclui os efeitos de processos mecânicos como abrasão, expansão e contração), e químico (inclui os processos de hidratação, hidrólise, oxidação, solução e carbonata

O intemperismo físico produz materiais cujos constituintes minerais são aqueles da rocha original, enquanto que reações químicas dos minerais primários das rochas com a água, oxigênio, dióxido de carbono e óxidos orgânicos derivados de vegetação, resultam na decomposição da rocha e formação de novos minerais (10).

Entre as diversas teorias de laterização encontram-se as citadas por Gidigasú e Bhatia (12) ao estudar os solos de Ghana. A primeira proposta por Cooper em 1936, sugere que o processo de laterização envolve a remoção (lixiviação) em solução de sílica e bases com a acumulação de sesquióxidos. A segunda formulada por Hamilton em 1964, atribui a formação de laterita ao movimento para cima da água freática com sesquióxidos, dando origem às chamadas lateritas de alta superfície, e ao movimento lateral de sesquióxidos para formar "lateritas de baixa superfície". Segundo Gidigasú e Bhatia, os perfis encontrados em Ghana confirmam ambas as teorias.

Infanti e Kanji (1) consideram a laterização como um fenômeno de predominância química, se desenvolvendo vigorosamente na zona intertropical úmida. Atividade química, desintegração física e ação microbiológica combinam seus efeitos produzindo hidrólise, dissolução, transformação e formação de novos minerais dentro da zona intemperizadas. Os detalhes destes processos podem ser caracterizados por: lixiviação de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, diminuição no conteúdo de sílica e acumulação de óxidos hidratados de ferro e alumínio. Os principais minerais presentes nos solos lateríticos são: Goetita, Gibsita e Caulinita.

Segundo Lucena (3), as teorias principais de alteração foram sintetizadas por D'Hoore em 1954 e mostram que dois processos podem ser assinalados:

- 1) Acumulação relativa: concentração de sesquióxidos pela remoção de sílica e bases.
- 2) Acumulação absoluta: concentração de sesquióxidos pela acumulação através do perfil ou entre perfis.

As teorias relacionadas com a acumulação relativa referem-se à remoção de materiais relativamente solúveis provenientes de rocha primária originariamente rica em constituintes de ferro e alumínio. A decomposição química dos silicatos com a remoção de álcalis, terras alcalinas e sílica em solução deixa um material mais concentrado em ferro e alumínio. Esta concentração dá aos terrenos uma coloração de tijolo e, em geral, um concrecionamento das respectivas partículas cuja intensidade e distribuição são muito variáveis. Existe então uma concentração aluminosa e uma concentração ferruginosa, envolvendo essa última o enriquecimento do solo em ferro pela lavagem de sílica e bases combinadas bem como de outros materiais relativamente móveis dentro do solo. Deve ser considerado ainda, que nem todas as formas de ferro nos solos são propícias à sua mobilização.

- a) O íon férrico é quase insolúvel no pH do solo.
- b) O íon ferroso é relativamente solúvel, mas estável somente no meio redutor.
- c) O ferro em sua forma coloidal pode ser deslocado pois é muito sensível à eletrólise.
- d) O ferro se agrega rigorosamente à argila e pode ser lavado com ela devido à sua mudança eletrolítica.
- e) Os íons férrico e ferroso são capazes de se associarem com certas substâncias que passam através dos solos dando íons complexos eletronegativos que não se agregam à argila e são menos sensíveis à eletrólitos.
- f) A migração de ferro na forma de carbonatos ocorre sob certas condições.

Geralmente sob condições de baixo pH e alto Eh, a mobilização de ferro em solução é reduzida e, assim, é concentrada no perfil residual (3).

O processo de acumulação absoluta envolve a remoção do ferro em solução, migração desta solução e a subsequente fixação do ferro no solo laterítico. Para que esse processo ocorra, as condições devem ser favoráveis (3).

Norton (13), estudou a mobilidade relativa do ferro sob condições variáveis de pH, concluindo que a remoção seletiva do solo de álcalis, terras alcalinas e sílica é conseguida por uma combinação de Eh - pH onde a solubilidade de alumina, óxidos de metais polivalentes e hidróxidos, é menor que a do quartzo. Contudo, a remoção seletiva do ferro do solo com retenção de alumina, requer unicamente condições específicas de Eh e pH. pH muito baixo mobilizará alumina e a um Eh alto, o ferro residual é enriquecido.

Na teoria apresentada por Norton, são considerados importantes para a formação das lateritas os seguintes fatores:

- a) Clima, incluindo temperatura média anual, distribuição total e temporal da precipitação.
- b) Topografia.
- c) Movimento da água no solo, particularmente a rede de drenagem inclinada e nível de flutuação de água do solo.
- d) Preponderância do intemperismo químico sobre o físico.

O modelo de Norton é baseado somente nas seguintes considerações: solubilidade preferencial de um elemento sobre outro, dentro de uma faixa de pH, e disponibilidade de oxigênio na água do solo (Eh).

Dois fatores são de suma importância para a compreensão de um modelo de meteorização química, para a remoção de alumina, ferro e sílica do perfil do solo:

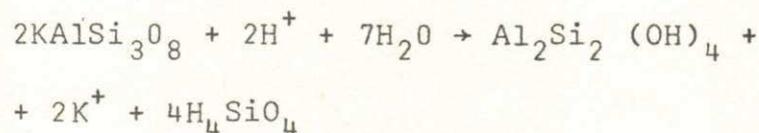
- 1) O abaixamento do pH da água da chuva, que de 5,5 a 6,5 passa para aproximadamente a 3,5 pelo contato

absorção de  $\text{CO}_2$  e ácidos. O potencial de oxidação da água da chuva é uma função do pH e do teor de oxigênio.

- 2) O tipo de reação da solução formada pela água da chuva com as rochas, que são geralmente de 4 tipos e que podem modificar o Eh e o pH.

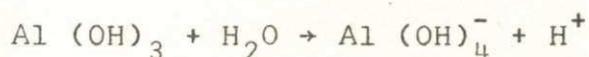
Estas equações são:

- A) Reação com liberação de cátions.



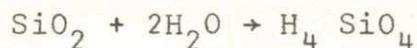
A água dissociada pela hidrólise ataca violentamente os feldspatos, com liberação do íon  $\text{K}^+$ . Isto resulta em uma elevação do pH, sendo esta função da concentração de  $\text{K}^+$  e  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  na solução anterior a reação.

- B) Reação com liberação de ânion.



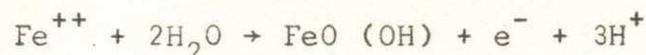
Com a liberação do íon  $\text{H}^+$ , há um abaixamento do pH, sendo isso de relevância na determinação da mobilidade do alumínio.

- C) Reação com liberação de espécies aquosas neutras.



Esta equação assume importância para a completa dissilificação da rocha de quartzo, e pode influenciar no valor do pH.

- D) Reações com oxidação e redução.



Esta reação é influenciada pelo Eh (poten

Grant (8) estudando solos vermelhos na Austrália, formula a seguinte teoria a respeito da formação de laterita: sob condições convenientes, óxido de ferro, óxido de alumínio e sílica são mobilizados em solução aquosa, podendo ser transportados em solução e reprecipitados sob condições favoráveis.

O ferro é mobilizado em solução no estado ferroso do material ferruginoso original, e move-se como tal até que encontre condições de oxidação. Sob estas condições, o ferro ferroso se oxida para o estado férrico o qual é insolúvel na água. Se a oxidação for rápida, todo o ferro é imediatamente transformado para o estado férrico. O ferro então se precipita como um gel de óxido férrico hidratado. Na desidratação, o gel forma o lepidocrocite hidratado indefinido, que numa desidratação posterior muda para o hidrato cristalino indefinido, que é a goetita. Com a desidratação completa, é formada a hematita cristalina. O processo é irreversível, a menos que haja uma mudança nas condições de oxidação. Se a oxidação for lenta pode ser formado algum óxido ferroso-férrico como magnetita cristalina. O material que ainda inclui ferro ferroso móvel ou gel óxido-férrico hidratada terá propriedades que permitirá seu endurecimento e é laterita. Material no qual todo ferro está no estado férrico e foi cristalizado para goetita, hematita, ou material no qual o ferro está imobilizado na forma de magnetita, não tem condições de ligação, e se cimentado é ferricrete e se não cimentado por óxido de ferro é simplesmente solo vermelho.

Alumínio, assim como o ferro, pode também ser lixiviado sob condições ácidas (ferro  $\text{pH} < 8$ ; alumínio  $\text{pH} < 5$ ). Consequentemente lateritas e "ferricretes" frequentemente contêm óxido de alumínio hidratado e bauxitas algum óxido de ferro hidratado ou hematita (8).

Os estudos de Grant na Austrália indicam que o transporte de ferro ou alumínio ocorre verticalmente, sendo então a laterização um fenômeno essencialmente local. Esse autor afirma ainda que "sob corretas condições, ferro pode ser lixiviado de uma laterita ou ferricrete (ou bauxita) já formada para ser depositado em outro local".

Geralmente, o solo resultante do processo de laterização apresenta uma estrutura granular, devido ao efeito aglomerante dos sesquióxidos que envolvem as partículas naturais do solo (14,15). Os sesquióxidos são absorvidos na superfície dos argilo-minerais, sendo os mais frequentes do tipo 1:1, com caulinita ocorrendo na quase totalidade dos solos estudados, por meio da interação entre as partículas de argila carregadas negativamente e os sesquióxidos de carga positiva, dependendo esta absorção das características de superfície dos componentes ferro e alumínio, da carga característica do argilo mineral, e pH do meio ambiente (14).

O maior ou menor envolvimento efetuado pelos sesquióxidos, é um fator dos mais importantes para o estabelecimento das diferenças físicas ou físico-químicas entre solos lateríticos e solos temperados (14). Townsend e Reed (15), concluíram que o envolvimento dos argilo-minerais pelos sesquióxidos, tem influência acentuada no comportamento dos solos, e que sua remoção provoca um acréscimo da quantidade de partículas de argila e diminuição nas partículas siltosas e arenosas.

Segundo Mc Intyre, mencionada na referência 15, a influência dos sesquióxidos na formação da estrutura granular, é devido a uma ou a todas as causas seguintes:

- 1) Aglomeração devido a precipitação de um gel hidratado de ferro ou alumínio e uma subsequente desidratação irreversível desses materiais.
- 2) Presença de ferro em solução, o que evita a defloculação.
- 3) Formação de componentes minerais orgânicos de ácido húmico com sesquióxidos livres.

#### Classificação

Um sistema de classificação tem por objetivo prever as propriedades e características de um solo de

nhecido, comparando algumas de suas propriedades conhecidas às de outro solo que se julgam semelhantes (16).

Como o comportamento dos solos lateríticos, depende fundamentalmente da sua história geológica, gênese, características morfológicas, tipo de mineralogia da argila, natureza dos íons trocáveis, e reais condições de umidade, os sistemas de classificação baseados unicamente nas características de granulometria e plasticidade do solo, não apresentam bons resultados (17).

Muitos sistemas de classificação para solos lateríticos têm surgido nos diversos países onde pesquisas sobre esses solos têm sido realizadas, no entanto esses sistemas geralmente são baseados em fatores mineralógicas, ou de agricultura, não sendo assim sistema de classificação de engenharia, daí não serem apropriados para fins de engenharia (7).

Vallerga e Van Til (7) consideram o Sistema de Classificação Unificada como o que mais se adapta aos solos lateríticos, desde que sejam nele incluídos símbolos para definir as características de durabilidade das partículas de pedregulho e areia, e a plasticidade dos materiais finos encontrados nas areias e pedregulhos lateríticos. Estes autores propõem a adição dos símbolos L, I, H, para materiais com mais de 12% passando na peneira nº 200, a fim de caracterizá-los como baixa ( $LL < 35$ ), média ( $LL = 35$  a  $50$ ) e alta plasticidade ( $LL > 50$ ), e 1, 2 e 3 para designar alta, média e baixa durabilidade, sendo esse parâmetro definido pelos ensaios "California Coarse (Dc) e Fine Durability" (Df), com os seguintes critérios:

Símbolo	Faixa de valores de Dc e Df
(1)	$> 35$
(2)	$20 - 35$
(3)	$< 20$

Considerando a composição química, Martin e Doyne (5) classificam as lateritas segundo a relação molecular sílica/alumina (Ki), proposta por Harrassowitz em 1926:

$K_i < 1,33$  solo de laterita  
 $1,33 < K_i < 2$  solo laterítico  
 $K_i > 2$  solo não laterítico

Esta classificação sofreu fortes críticas por levar em consideração somente os sesquióxidos de alumínio, sem levar em conta a importância dos sesquióxidos de ferro e outros (3).

Winterkorn (6), baseado na relação sílica/sesquióxidos usa a mesma classificação proposta por Martin e Doyme, para distinguir os solos de laterita, solos lateríticos e solos não lateríticos.

Segundo Lucena (3), a classificação de solos lateríticos que, no momento, parece de maior utilidade potencial no campo de engenharia, é a classificação da USAID, desenvolvido pelo Lyons Associates (10) durante o estudo das propriedades dos solos da África. Esta classificação utiliza uma simplificação da classificação de D'Hoore, e tenta correlações estatísticas de propriedades de engenharia em grupos da classificação de D'Hoore. Esses grupos e suas propriedades são descritos a seguir:

Solos tropicais ferruginosos: Os solos tropicais ferruginosos têm, de um modo geral, perfis A, B e C. Observa-se uma marcante separação de óxidos de ferro livre, que pode ser devido à lixiviação no perfil ou precipitação dentro do perfil na forma de manchas ou concreções. As reservas de minerais intemperizadas são frequentemente apreciáveis. A relação silte/argila ( $20\mu/2\mu$ ) determinada por dispersão repetida, sedimentação e separação do fluente em suspensão, é geralmente acima de 0,15. O argilo-mineral predominante é, na sua maioria, caulinita, mas frequentemente contém pequenas quantidades de argila do tipo 1:2, sendo que a gibsita geralmente não é encontrada. A relação  $SiO_2/Al_2O_3$  se situa próximo de 2 ou um pouco maior, enquanto que a relação  $SiO_2/R_2O_3$  é sempre menor que 2. Estes solos têm uma baixa plasticidade e as densidades de compactação correspondentes ao AASHO modificado são altas, com elevados valores de CBR, maiores do que os outros dois grupos.

Solos ferralíticos: Os solos ferralíticos

são frequentemente profundos e seus horizontes são apenas ligeiramente diferenciados. A relação silte/argila determinada por dispersão repetida, sedimentação e separação do fluante em suspensão, é geralmente menor do que 0.25 nos horizontes B e C. Os argilo-minerais são predominantemente do tipo 1:1, e são na sua maioria associados com minerais hidratados de alumina; gibsita, que é uma das suas formas cristalinas, não é um constituinte essencial, ainda que esteja frequentemente presente. A relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  se encontra, algumas vezes, próximo a 2, sendo usualmente menor que 2. Os solos ferralíticos são semelhantes, até certo ponto, aos ferrisolos, apresentando alta plasticidade e valores de CBR mais baixos do que os solos ferruginosos.

Ferrisolos: Os ferrisolos têm um perfil que se assemelha muito ao dos solos ferralíticos, frequentemente com um horizonte estrutural B e com agregados tendo superfícies polidas. Estas superfícies não são necessariamente devidas a revestimento de argila, mas podem ser em virtude da presença de misturas gelatinosas de alumínio e sílica. A reserva de minerais intemperizados é geralmente baixa, mas pode exceder 10% das frações com 50 a 250 microns. A relação silte/argila ( $20\mu/2\mu$ ), determinada por dispersão repetida, sedimentação e separação do fluente em suspensão, é superior a 0.20 acima das rochas ígneas e metamórficas. A fração argila consiste quase inteiramente de caulinita, óxidos de ferro livres e materiais amorfos algumas vezes com pequenas quantidades de argila do tipo 2:1 e gibsita. A relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  se aproxima de 2, porém, na maioria das vezes é menor do que 2. Os ferrisolos diferem dos outros grupos de solos, porque as superfícies de erosão impedem um desenvolvimento normal do perfil e força o mesmo a se desenvolver em profundidade nos materiais matrizes menos intemperizados.

No Brasil, um estudo similar ao realizado na África, vem sendo desenvolvido pela Lyons Associates e o DNER com suporte da USAID. Os resultados ainda não estão disponíveis para exame, mas é esperado que venham ajudar a resolver o complexo problema de classificação dos solos lateríticos(3).

## Problemas de Engenharia nas Estruturas de Terra Construídas com Solo Tropical Vermelho

Com o desenvolvimento da Mecânica dos Solos, cada vez mais tem sido usado solo tropical vermelho na construção de barragens mesmo com conhecimento dos problemas que poderão advir desta prática de construção. Entre esses problemas, está o que pode surgir da mobilização de ferro bloqueando os drenos, ou alterando as características de engenharia dos locais de onde foi removido, no interior da barragem.

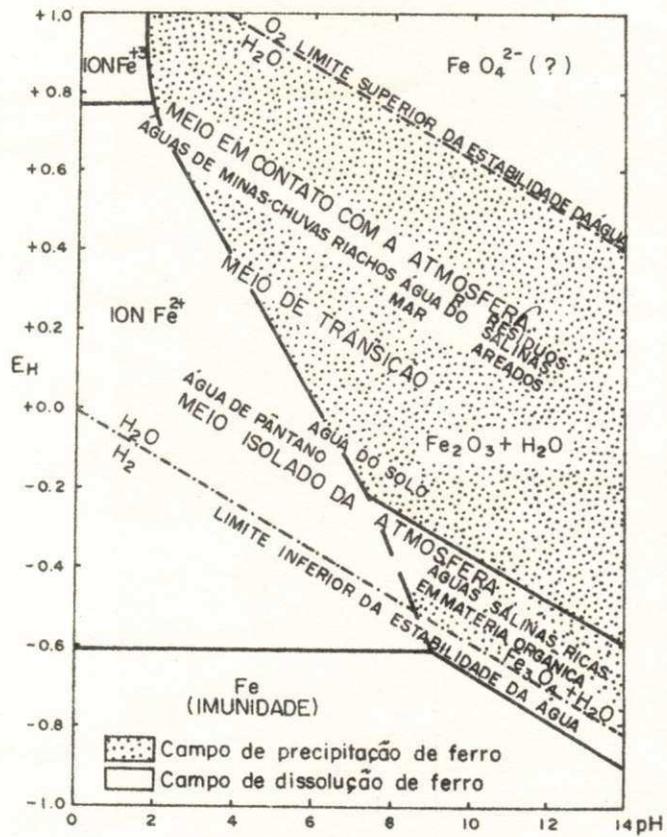
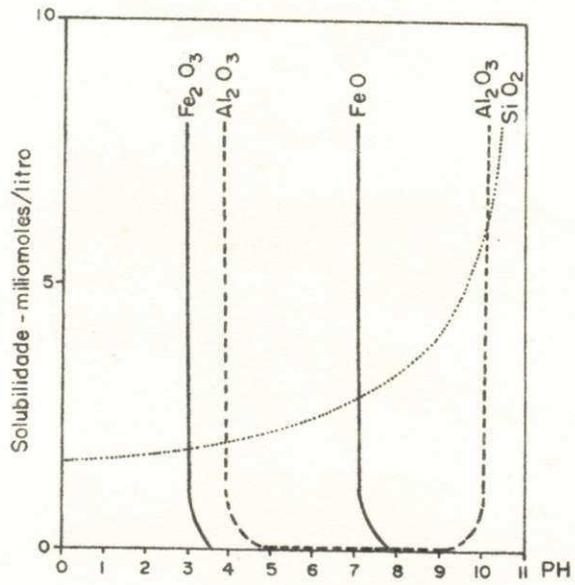
As condições geoquímicas sobre as quais óxido férrico, óxido ferroso, alumina e sílica são solúveis, são apresentadas na Fig. 2.1 (1). Pode ser visto que  $Fe^{3+}$  é solúvel em meio muito ácido (pH 2.5), o que é incomum na natureza: Contudo,  $Fe^{2+}$  pode existir em solução em um meio com um pH tão alto quanto 7.5, dependendo do potencial de oxidação deste meio. Considerando que a faixa de pH natural para regiões subtropicais varia de 5 a 7,  $Fe^{2+}$  pode ser facilmente dissolvido se o potencial de oxidação for adequado. Pode também ser notado que nesta faixa de pH sílica é de baixa solubilidade, e alumina é praticamente insolúvel. O gráfico de potencial redução e pH, mostrado na Fig. 2.2, representa o equilíbrio termodinâmico para vários componentes de ferro. Pode ser visto que  $Fe^{3+}$  requer um alto potencial, enquanto  $Fe^{2+}$  requer um moderado a baixo potencial para entrar em solubilidade. Este fato e a faixa de pH dos solos naturais, indicam que  $Fe^{2+}$  pode comumente ser encontrada em solução na natureza em certas latitudes, e que um componente  $Fe^{3+}$  pode também ser solúvel por redução a  $Fe^{2+}$  (1).

Alguns fatores que concorrem para a solubilidade do ferro são:

- 1) Decréscimo do pH de água (dissolução de  $CO_2$  com produção de ácido carbônico, matéria orgânica, ácidos produzidos por atividade orgânica).
- 2) Diminuição do potencial de redução (oxidação de sulfato minerais, presença de

Figura 2.1 Solubilidade de ferro, alumina e sílica como uma função de pH (18).

Figura 2.2 Diagrama de equilíbrio do ferro (traçado a 25°C e pressão atmosférica), mostrando a posição de alguns meios ambientes naturais (19).



triais, matéria orgânica e atividade biológica).

- 3) Formação de complexos (ferro pode ser retido na estrutura de sílica coloidal formando complexos sílica  $Fe^{2+}$  ou  $Fe^{3+}$ , ou nas estruturas de componentes húmicos solúveis derivados de decomposição orgânica) (1).

A precipitação do ferro pode ocorrer causa da por uma variação no pH, no potencial de redução ou em ambos. Essa mudança pode ser causada por:

- a) Aumento no pH da água.
- b) Passagem para um meio de oxidação: com oxidação de  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  e precipitação  $Fe^{3+}$  como hidróxido férrico.
- c) Aumento na concentração de modo que seja encontrado o produto de solubilidade.
- d) Decomposição de complexos orgânicos ferrosos em meios de oxidação (1).

Como consequência de precipitação de ferro podem ocorrer diversos problemas:

Se a precipitação se der no interior da barragem, ocorrerá a cimentação do material com conseqüente de crêscimo de plasticidade do material, o que pode provocar fissuras que possibilitarão surgimento de "piping". Um exemplo é a Barragem de Shek Pik (20).

Se a precipitação ocorrer no dreno de areia, com uma cimentação parcial do material, uma redução na permeabilidade do filtro pode produzir um acrêscimo na carga piezométrica no interior da barragem, com conseqüente diminuição no fator de segurança ou elevação da "linha de saturação" que pode interceptar perigosamente o talude de jusante.

Por outro lado, se ocorre o lixiviamento mas não existe a precipitação no interior da barragem, a permeabilidade pode aumentar progressivamente, diminuindo a resistência ao cisalhamento e aumentando a perda de água.

Infanti e Kanji (1) citam alguns problemas surgidos em barragens de terra nos Estados de Rio de Janeiro e São Paulo. Em São Paulo, uma barragem de terra construída sobre rochas Precambrianas intemperizadas apresentou contaminação e cimentação dos filtros de drenagem por material ferruginoso, tendo as investigações executadas encontrado torrões fortemente cimentados no filtro de areia. No Estado do Rio de Janeiro, uma barragem construída sobre rochas Precambrianas intemperizadas em local que apresentou impregnação de hidróxidos de ferro nas paredes de um poço de investigação, vem apresentando precipitação de ferro nos filtros de areia. Dois outros casos são registrados no Estado de São Paulo, devido a atividade micro-biológica em barragens em construção, uma sobre rochas Precambrianas intemperizadas e outras sobre sedimentos mais recentes derivados de rochas Precambrianas.

Knill e Best (20) investigando o rompimento de Barragem de Shek Pik, Hong Kong, cujo núcleo foi construído com solo residual de rochas ígneas ácidas contendo uma pequena quantidade de goetita, sugerem que o rompimento desta e de outras barragens construídas com o mesmo material, podem ter ocorrido pela cimentação produzida pela goetita.

Haldane, Carter e Burton (21) em um estudo detalhado da hidrologia da Barragem de Corin, Austrália, atribuem o aumento de acidez na água à presença de rochas em pirita, tendo como consequência o possível ataque das estruturas de concreto, cortina de injeções e rochas do enrocamento da barragem por tais ácidos.

É evidente então que a mobilização dos componentes químicos de um solo tropical vermelho acarretam alterações no seu comportamento de engenharia. Alterações na permeabilidade e resistência ao cisalhamento originadas pelas variações de composição e estrutura de solos vermelhos é um aspecto que não tem sido estudado com a atenção e o detalhe necessário.

### C A P Í T U L O    I I I

#### OBJETIVO DA PESQUISA

Dados experimentais e quantitativos sobre a influência da percolação de água através de estruturas construídas com solos vermelhos tropicais são muito raros na literatura conhecida. Para o engenheiro civil, é de primordial importância avaliar as mudanças que são ocasionadas por este processo nos parâmetros relevantes de engenharia, de tal maneira que os projetos de obras levem em conta estas variações não somente do ponto de vista estrutural mas ainda do ponto de vista econômico.

Este trabalho apresenta um estudo de laboratório onde se analisa particularmente a influência da percolação de água a diferentes pHs na permeabilidade e comportamento ao cisalhamento triaxial de um solo laterítico compactado proveniente da Jazida Sapé-Mari no Estado da Paraíba.

Para o estudo foi necessário projetar e construir equipamento especial para moldagem dos corpos de prova, e um equipamento para medida de permeabilidade. Além disso utilizou-se uma técnica nova para saturação dos espécimens para ensaio.

Analisa-se as variações de permeabilidade com tempos de percolação de 24, 48, 72 e 96 horas usando água de percolação a três níveis de pH, isto é, 3,25, 7,3 e 12,4.

As variações dos parâmetros de cisalhamento triaxial são estudadas para as mesmas condições dos ensaios de permeabilidade. Além do mais, apresenta-se também um estudo piloto de influência de secagem parcial (6 horas a 60°C) no comportamento triaxial do solo Sapé-Mari.

## C A P Í T U L O    I V

### MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foi selecionado o solo que ocorre na jazida conhecida por Sapê-Mari, como continuação à pesquisa realizada por Borba (22) sobre as propriedades de resistência ao cisalhamento deste solo, dando seqüência ao plano de estudo dos solos vermelhos formados por laterização do Estado da Paraíba, desenvolvido no Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb sob a orientação do Professor J. G. Cabrera.

A jazida de Sapê-Mari está localizada à margem direita da rodovia PB-55, no trecho Mari-Guarabira, a uma distância de 8 Km da cidade de Mari. (Ver Fig. 4.1).

Fica situada em uma região da Zona Fisiográfica do Agreste e Caatinga Litorrânea, segundo a divisão do Estado da Paraíba, feita pelo Conselho Nacional de Geografia, que caracteriza-se por apresentar chuvas de outono com um período de estiagem de 5 a 6 meses, temperatura oscilando entre 34°C (média das máximas) e 16°C (média das mínimas) à sombra, precipitação média para o período de 1962-1971 de 1173 mm e altitude média de 125 m (3). Ocorre como um capeamento da formação geológica denominada Barreiras, que se estende de Belém do Pará até a cidade de Vitória do Espírito Santo, formada provavelmente no período terciário superior (plioceno), sendo uma seqüência de camadas areno-argilosas, argilo-arenosas, arenosas e argilas de coloração variegada.

A Fig. 4.2 mostra o perfil do local onde foi coletada a amostra, o qual consiste de uma camada superior formada por duras concreções ferruginosas, rica em seixos rolados de laterita endurecida, que se apoia sobre uma camada de argila rija, que vai se tornando mais mole com a profundidade e que repousa sobre camada argilo-arenosa mais mole.

A presença dos seixos rolados na camada superior desta ocorrência indica que a mesma foi formada por uma acumulação de materiais provindos de níveis mais elevados, possivelmente de uma sucessão de

Figura 4.1 Mapa do Estado da Paraíba, mostrando a Rodovia PB-55, Sapé-Guarabira, onde foi coletada a amostra.

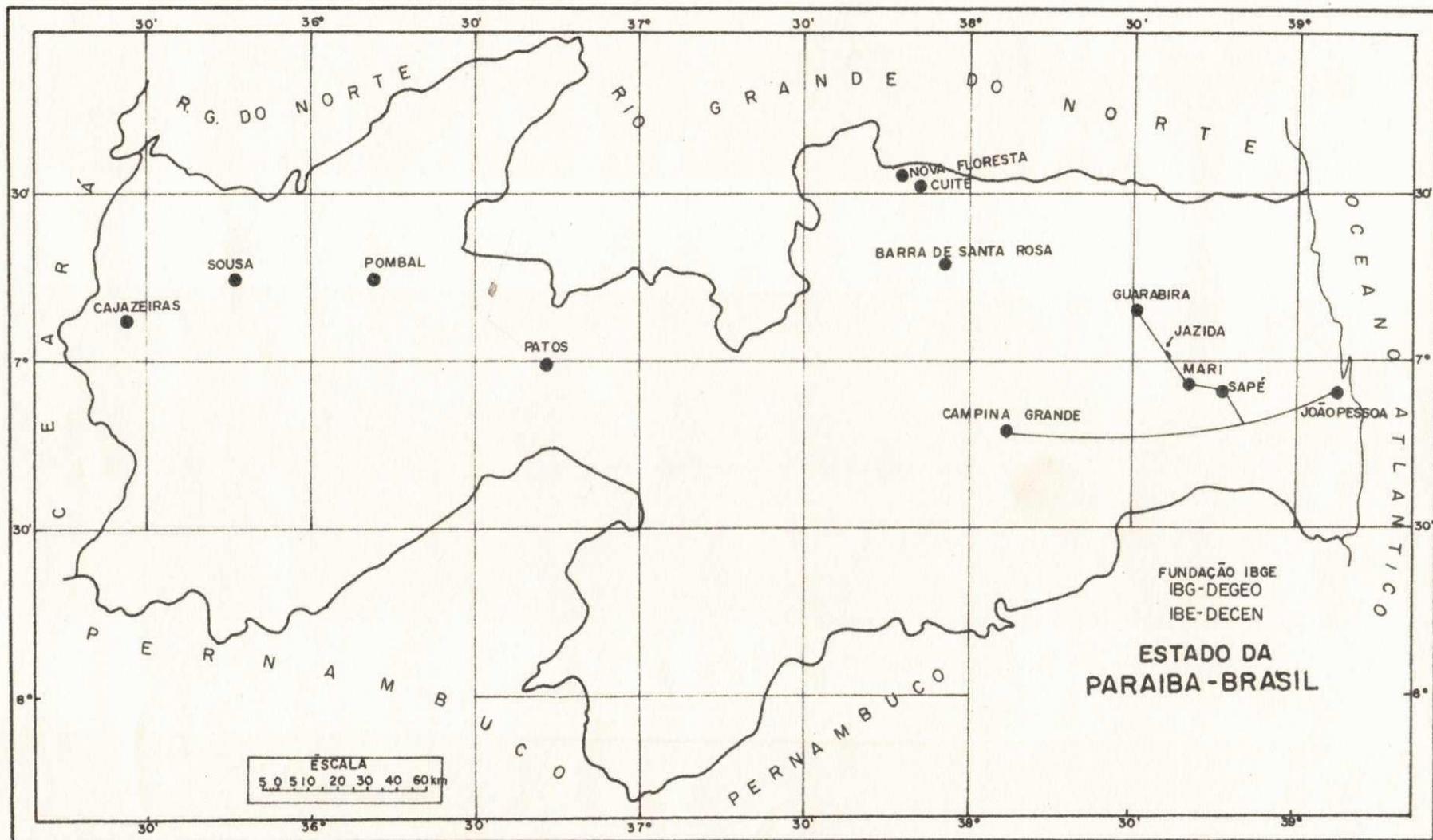
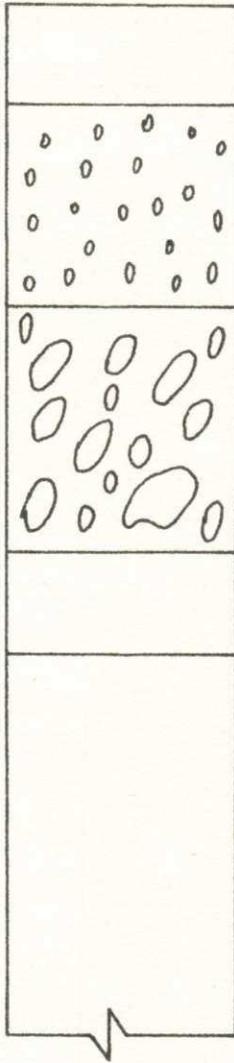


Figura 4.2 Perfil esquemático da jazida laterítica Sapê-Mari.



Solo muito fino (podsol)  
Espessura máxima de 40 cm aproximadamente

Pequenas concreções lateríticas-pisólitos  
Espessura entre 60 e 80 cm

Argila vermelha rija com concreções lateriticas duras. Espessura máxima de 1,00 m

Argila vermelha mais solta  
Espessura entre 20 e 40 cm

Argila arenosa. Espessura desconhecida,  
com aproximadamente 20 cm descoberto.

cimentação de depósito coluvionar. Além disso a presença de um material muito fino (podsol) na camada superficial, sem qualquer relação com o solo laterítico da camada subjacente, parece ser uma indicação de que esta camada (de solo laterítico), no passado geológico, esteve na superfície, o que vem confirmar a hipótese de transporte deste material pisolítico arredondado. As concreções lateríticas endurecidas da camada de argila vermelha rija, sugerem a oxidação e deposição do ferro carreado da camada superior e da couraça originária que parece ter existido nesta região. Enquanto as camadas inferiores são produtos do complexo de meteorização da rocha mãe ainda em processos de laterização. A suposição da existência da couraça laterítica acima referida, encontra apoio no fato de que, a 90 Km desta ocorrência, existem restos da mesma no município da cidade de Cuité, e mesmo em regiões mais próximas do litoral a presença de tal couraça pode ser verificada abaixo do regolito.

#### Coleta de Amostra

A amostra foi coletada a 2.0 m de profundidade em relação ao nível do terreno de um talude vertical em um corte onde havia sido retirado material para construção da rodovia, após raspagem e remoção do solo desagregado com a finalidade de evitar a ação das intempéries a que estava exposto.

Após a coleta o material foi acondicionado em sacos de lona grossa a fim de evitar a perda de material fino durante seu transporte ao laboratório.

#### Propriedades do Solo Estudado

São apresentadas na Tabela 4.1 a composição granulométrica, as propriedades físicas, as propriedades químicas, a composição mineralógica e a classificação do solo estudado. Na Tabela 4.2 apresenta-se a composição química do solo.

Os valores de composição química, composi

Procedência	Sapê-Mari
Composição	
Granulométrica, %, Pedregulho (> 2 mm)	23,00
Areia (2,00-0,06 mm)	47,00
Silte (0,06-0,002 mm)	16,00
Argila (< 0,002 mm)	14,00
Propriedades Físicas:	
Densidade real	2,85
Limite de liquidez, %	32,00
Limite de plasticidade, %	23,00
Índice de plasticidade, %	9,00
Propriedades Químicas:	
Teor de matéria orgânica, %	0,00
pH	6,35
Área específica, m <sup>2</sup> /g:	
(Concreções (< 2μ))	9,50
Solo (< 2μ)	15,31
Composição Mineralógica:	
Argilo mineral predominante	Caulinita
Outros	Quartzo Goetita
Classificações:	
Casagrande	GC-C1
HRB	A-2-4

Tabela 4.1 Propriedades e classificação dos solos.

Solo	Sapé-Mari	
	1	2
Composição		
Química, %:		
SiO <sub>2</sub>	32,00	25,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,30	31,00
FeO	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,70	21,00
TiO <sub>2</sub>	1,90	1,08
Ca	0,10	0,15
MgO	0,04	0,03
MnO	0,00	0,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10,16	5,89
Na <sub>2</sub> O	1,20	1,88
R <sub>2</sub> O	0,15	0,07
SO <sub>3</sub>	0,80	0,85
Sr	-	-
Cu	-	-
Zn	-	-
Perda a 1000°C	14,00	10,60

Tabela 4.2 Composição química das frações menores que 2 microns dos solos e das concreções.

- 1 Composição química dos solos
- 2 Composição química das concreções

trabalho de Lucena (3), onde a separação entre concreções e solos foi baseada arbitrariamente no diâmetro de 3/8" (9,5mm). Constam das Tabelas somente valores correspondentes à fração de diâmetro menor que 2 $\mu$  provenientes da desagregação mecânica das concreções e da fração de diâmetro menor que 2 $\mu$  proveniente do solo.

## CAPÍTULO V

### MÉTODOS E EXECUÇÃO DE ENSAIOS

#### Introdução

O material após chegar ao laboratório foi preparado a fim de ser submetido a uma série de ensaios conforme é mostrado no fluxograma da Fig. 5.1.

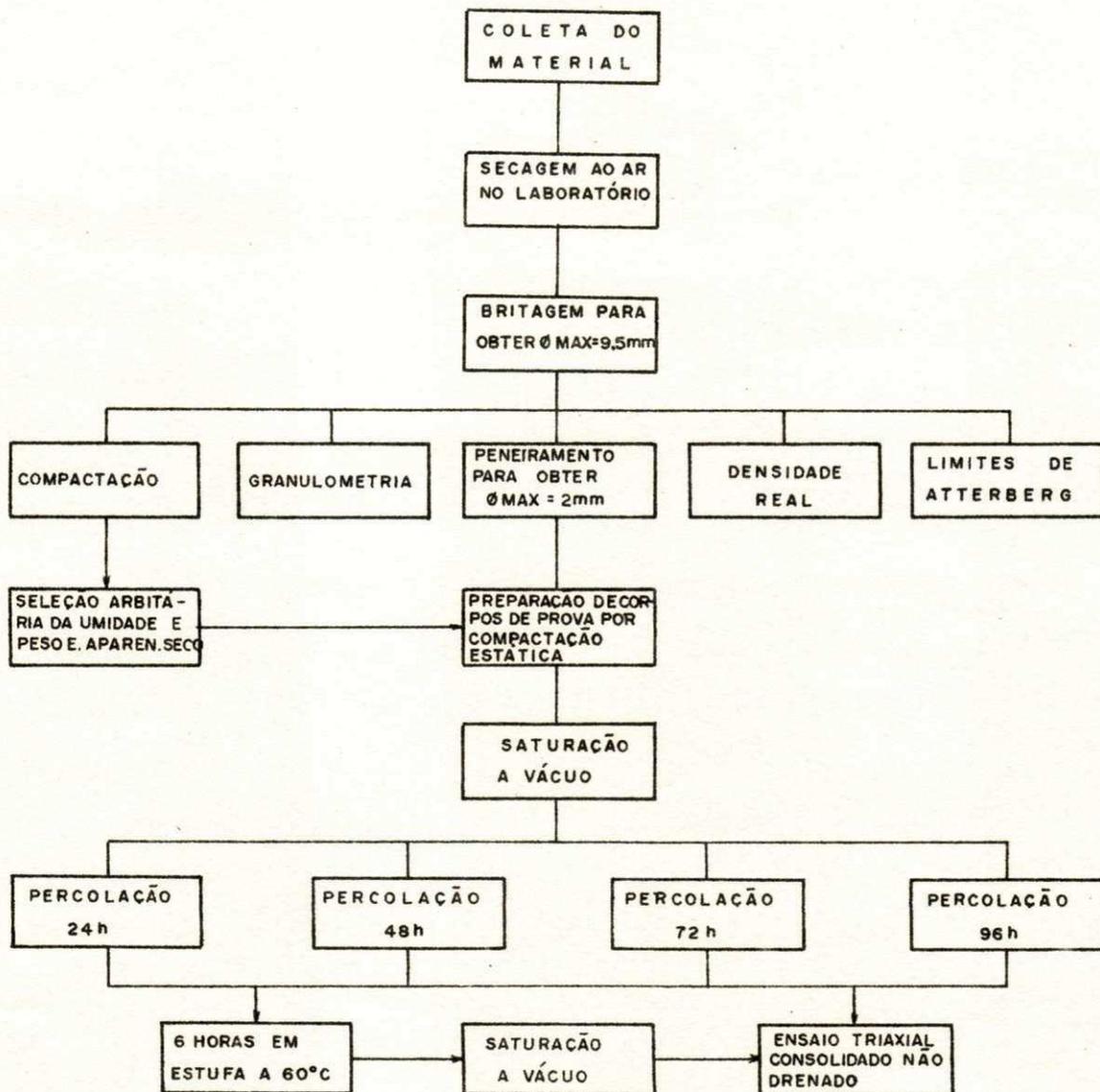
Após a secagem ao ar a amostra foi passada num britador de mandíbulas ajustado para reduzir o diâmetro máximo das partículas do solo a 9,5 mm. A amostra homogeneizada foi então peneirada através da peneira de  $\phi$  2 mm. A amostra resultante foi a utilizada para todos os ensaios. É importante ressaltar que a decisão de se utilizar o solo com tamanho máximo de 2 mm se deve a geometria dos moldes projetados para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial.

#### Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado atendendo as recomendações da BS 1377:1967 (23). Trata-se de um ensaio por via úmida que essencialmente consiste no seguinte procedimento: 200 gramas do solo a ensaiar são colocados em uma bandeja e misturados com água destilada contando 2 g de hexametáfosfato de sódio por litro de água. A mistura é mantida na bandeja por duas horas, sendo de vez em quando agitada para acelerar a desagregação das partículas menores da superfície de partículas maiores e também para desagregar flocos de partículas tamanho argila. Após este tempo o solo é lavado através de uma série de peneiras (série ASTM) até que a água saia límpida de todas as peneiras, inclusive da de Nº 200. A percentagem de material que passa na peneira Nº 200 é calculada por diferença entre o peso do solo seco antes do ensaio e o peso do solo seco retido em todas as peneiras.

A distribuição granulométrica da fração menor que 0,075 mm (peneira Nº 200) não foi determinada neste trabalho, os resultados apresentados foram obtidos a partir

Figura 5.1 Fluxograma de preparação e ensaios realizados com o solo no laboratório.



### Determinação dos Limites de Atterberg

#### Limite de Liquidez (LL)

Este parâmetro foi determinado seguindo as recomendações do Método DNER DPT M 44-64 (25).

#### Limite de Plasticidade (LP)

Este parâmetro foi determinado seguindo as recomendações do Método DNER DPT M 82-63 (25).

#### Ensaio de Compactação

A relação de peso específico aparente seco versus teor de umidade foi obtida usando água destilada e uma nova amostra para cada ponto de umidade. A energia de compactação para este ensaio corresponde a 5,6 kgf cm/cm<sup>3</sup> (Proctor normal), e o método de ensaio foi o indicado pela BS 1377:1967 (23).

#### Preparação dos Corpos de Prova para os Ensaios de Permeabilidade e Cisalhamento Triaxial

Como foi indicado no Capítulo III, o principal objetivo deste trabalho foi estudar a influência de percolação de água a três diferentes pHs nas propriedades de permeabilidade e cisalhamento triaxial no solo laterítico estudado. Para reduzir o programa de ensaios de laboratório foi necessário decidir quais variáveis seriam de maior importância e, ao mesmo tempo, decidir a geometria dos corpos de prova de tal maneira que a quantidade de solo a utilizar permitisse a realização dos ensaios num tempo razoável.

Para isto então, se decidiu arbitrariamente que a investigação somente incluiria corpos de prova moldados a um peso específico aparente seco constante para a mesma umidade de compactação. O peso específico aparente foi obtido da curva de compactação descrita no subcapítulo anterior, correspondente a uma umidade de compactação de 17%. A decisão de

se utilizar uma umidade de 17% foi tomada após grande número de ensaios experimentais de permeabilidade. Os valores de permeabilidade de corpos de prova moldados a umidade ótima de compactação ou umidade maior a esta são muito pequenos, isto é, a permeabilidade é muito baixa e os ensaios portanto, requeriam um tempo muito longo. A permeabilidade deste solo aumenta rapidamente com a diminuição do teor de umidade de compactação, a partir da umidade ótima de compactação. O teor adotado permitiu conduzir os ensaios num tempo razoável e ao mesmo tempo ter um teor próximo ao teor ótimo para o máximo peso específico aparente, o que significa que a condição dos ensaios se aproxima das condições que poderiam se esperar na prática de construção.

Uma vez que as variáveis de umidade e peso específico foram fixadas, teve que se decidir sobre a geometria dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial, com a exigência de que o manuseio dos corpos de prova não afetassem suas propriedades durante os ensaios de laboratório. Para isto, foi necessário projetar todo o equipamento e ao mesmo tempo fazer uso de técnicas não convencionais para acelerar os tempos de saturação dos corpos de prova.

Equipamento para preparação dos corpos de prova para ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial.

Desde que esta pesquisa é parte do estudo de solos vermelhos do Estado da Paraíba, e pode-se considerar como continuação da investigação sobre propriedades de cisalhamento do solo Sapé-Mari (22), decidiu-se que para fins de comparação, a geometria dos corpos de prova e o modo de aplicação da energia de compactação seriam os mesmos utilizados por Borba (22). Assim, os corpos de prova para ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial foram das seguintes dimensões: 76,2 mm de altura e 40,3 mm de diâmetro; a energia de compactação foi aplicada de modo estático, com um valor correspondente a energia necessária para alcançar em cada corpo de prova peso específico aparente de  $1785 \text{ kgf/m}^3$  correspondente ao peso

específico aparente seco da curva de compactação dinâmica para uma umidade de moldagem de 17%.

Descrição de equipamento projetado e construído para a pesquisa. Tendo em conta que os moldes não só serviriam para moldagem dos corpos de prova, mas ainda para submetê-los à saturação e medição de permeabilidade, decidiu-se fabricá-los com material PVC que é resistente ao ataque no intervalo de pHs utilizados. Ao mesmo tempo, a geometria dos moldes foi projetada de tal maneira que o corpo de prova não sofresse expansão durante o estágio de saturação, e que fosse adequado para ser colocado no aparelho projetado para medidas de permeabilidade. A Fig. 5.2 mostra o desenho dos moldes indicando suas dimensões, enquanto a Fig. 5.3 mostra uma fotografia com os componentes do molde.

Como pode ver-se nas figuras indicadas, o diâmetro interno do molde é de 40,3 mm e o comprimento é de 101,6 mm o que permite obter espécimens de 76,2 mm de comprimento, com um espaço de 12,7 mm nas extremidades de molde que contém roscas internas para receber dois cilindros complementares, um de 65 mm de comprimento e outro de 20 mm de comprimento. A extremidade com o cilindro complementar menor é colocada sobre a base guia para o início da compactação que é conduzida em dois estágios. Para o segundo estágio, o molde é invertido e assentado sobre a segunda base guia para a conclusão da compactação.

Equipamento projetado e construído para a saturação dos corpos de prova. Nos ensaios comuns de permeabilidade ou ensaios de cisalhamento com espécimens saturados, o estágio de saturação dos espécimens é muito longo. Em virtude do número dos corpos ter sido bastante elevado, decidiu-se construir um equipamento especial para saturá-los em uma atmosfera correspondente a uma pressão 2 mm. Este equipamento foi o mesmo projetado por Cabrera (26), e essencialmente consiste no seguinte: Um dissecador de vidro com válvula para permitir extração de ar e entrada de água; uma bomba de vácuo marca Brasil com capacidade para produzir a pressão requerida, e um tanque de água destilada com conexão ao dissecador. As Figuras 5.4a e 5.4b mostram os detalhes do aparelho utilizado durante esta pesquisa.

Figura 5.2 Detalhes dimensionados de um molde projetado para esta pesquisa e dos cilindros complementares usa dos na compactação.

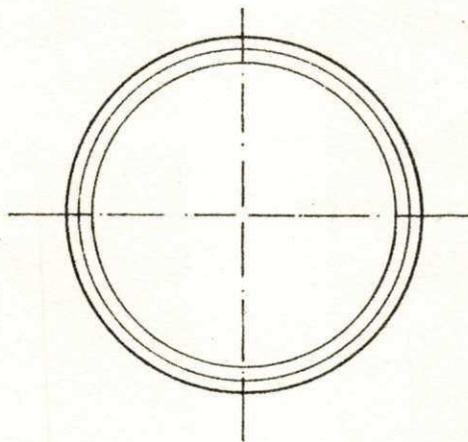
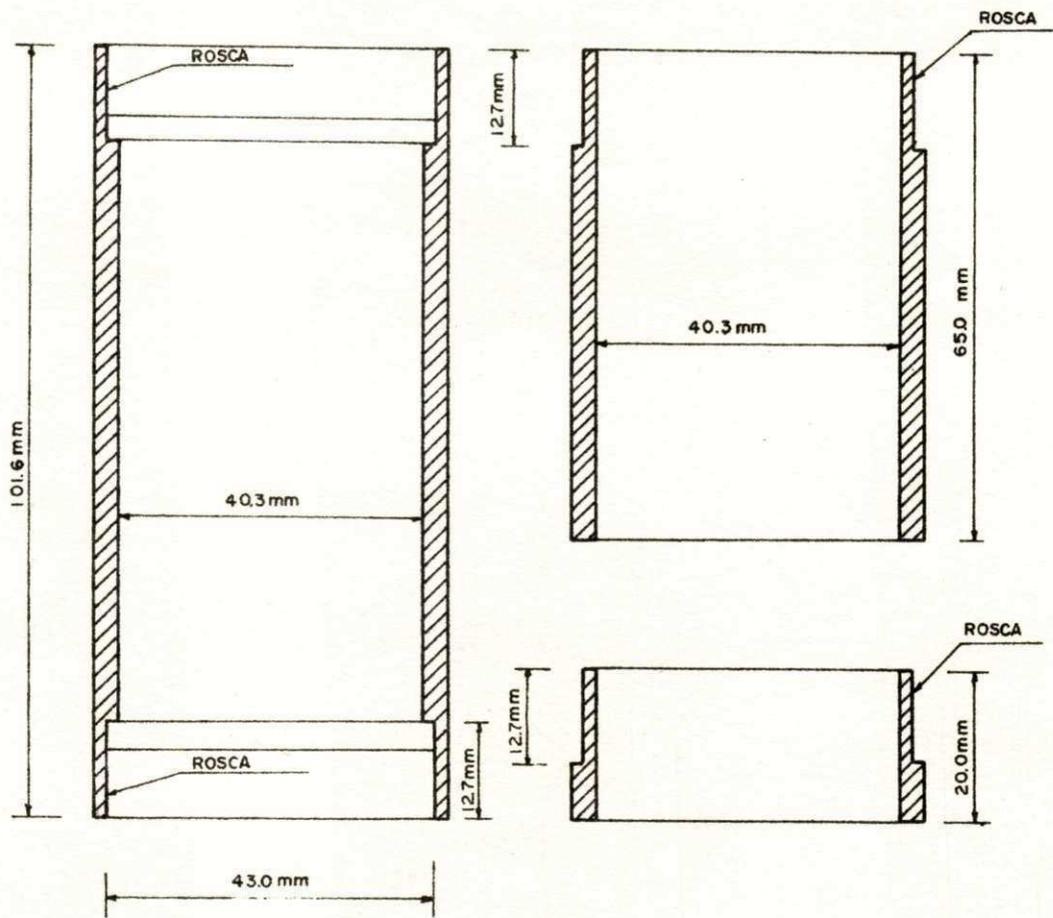


Figura 5.3 Detalhes dos moldes confeccionados para compactação e percolação dos corpos de prova.



Figura 5.4a    Detalhes de introdução de água no dissecador. Pode ser visto que o nível de água submerge totalmente os corpos de prova

Figura 5.4b    Detalhes da aplicação de vácuo no dissecador contendo os corpos de prova

Equipamento para medição de permeabilidade. O equipamento para medição de permeabilidade foi construído como um permeâmetro múltiplo de carga constante, utilizando-se o material PVC em todos os componentes, os quais foram: Um tanque de alimentação de água a um pH requerido, um tanque regulador para manter carga constante e um conjunto de tubos em PVC que permitiam colocar ao mesmo tempo 12 corpos de prova preparados nos moldes descritos anteriormente. As Figuras 5.5a e 5.5b, mostram o permeâmetro múltiplo de carga constante descrito.

Descrição do procedimento de preparação de corpos de prova e ensaios.

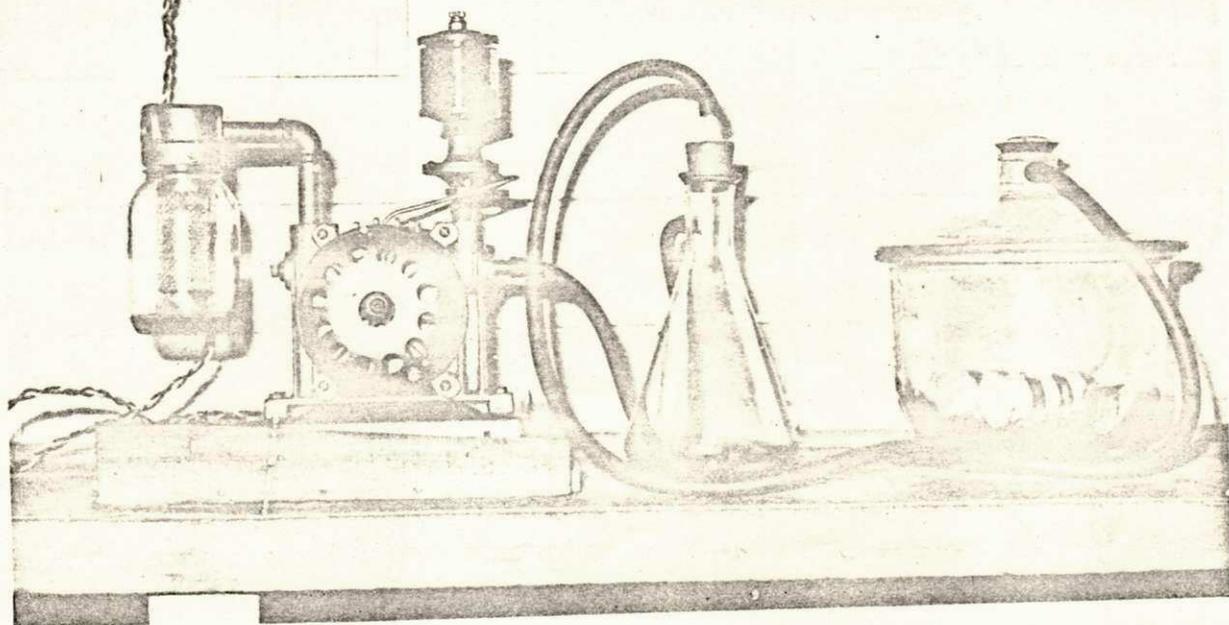
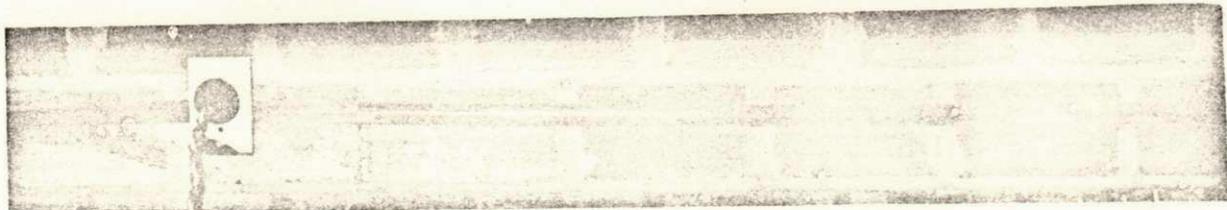
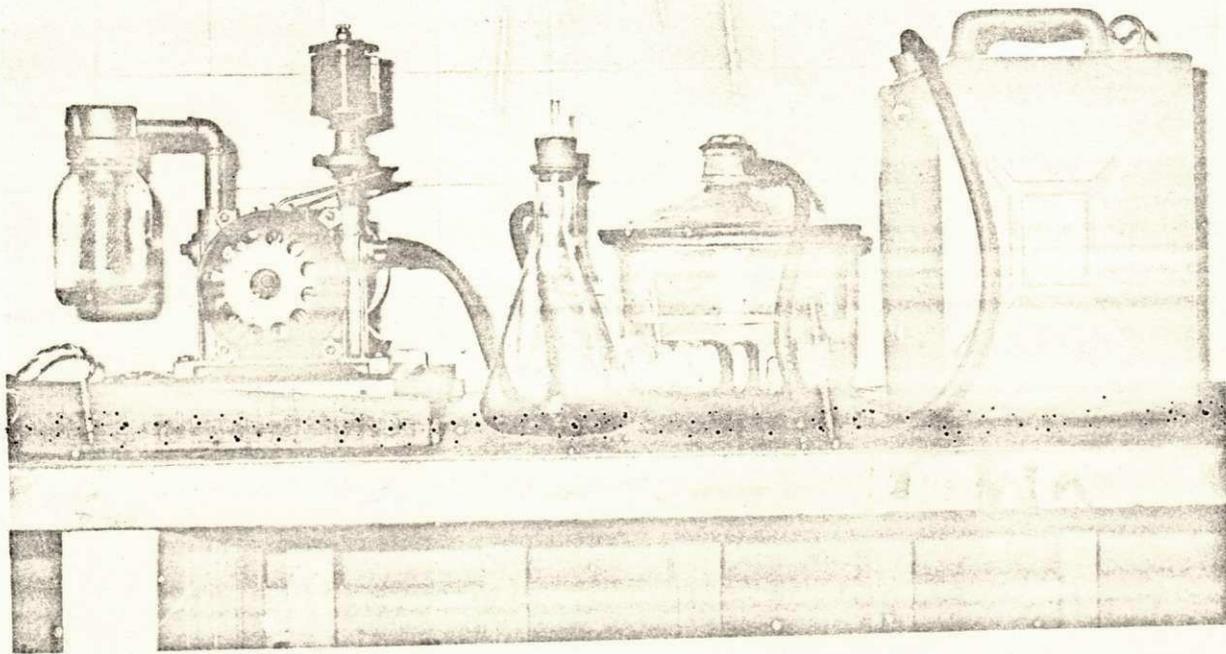
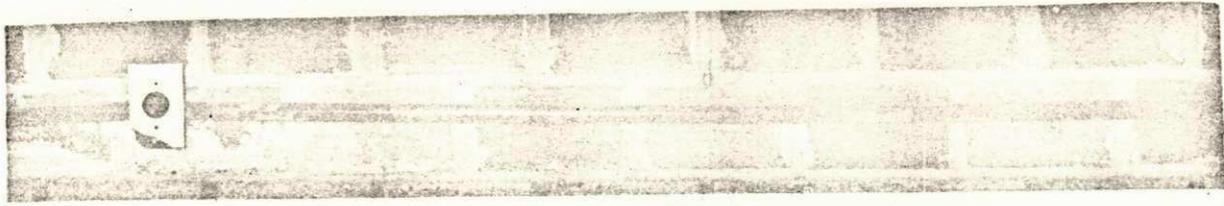
Mistura solo-água. Para fazer a homogeneização do solo com água foi usado um misturador elétrico de eixo vertical, marca Hobart, com capacidade para  $11,4 \text{ dm}^3$  de solo. A mistura solo-água era revolvida com o misturador girando a uma velocidade de 60 r.p.m. durante um tempo total de 3 minutos. Após cada minuto o misturador era parado, desconectado e o solo úmido era raspado e misturado manualmente com uma espátula. O tempo de três minutos era suficiente para produzir uma massa homogênea.

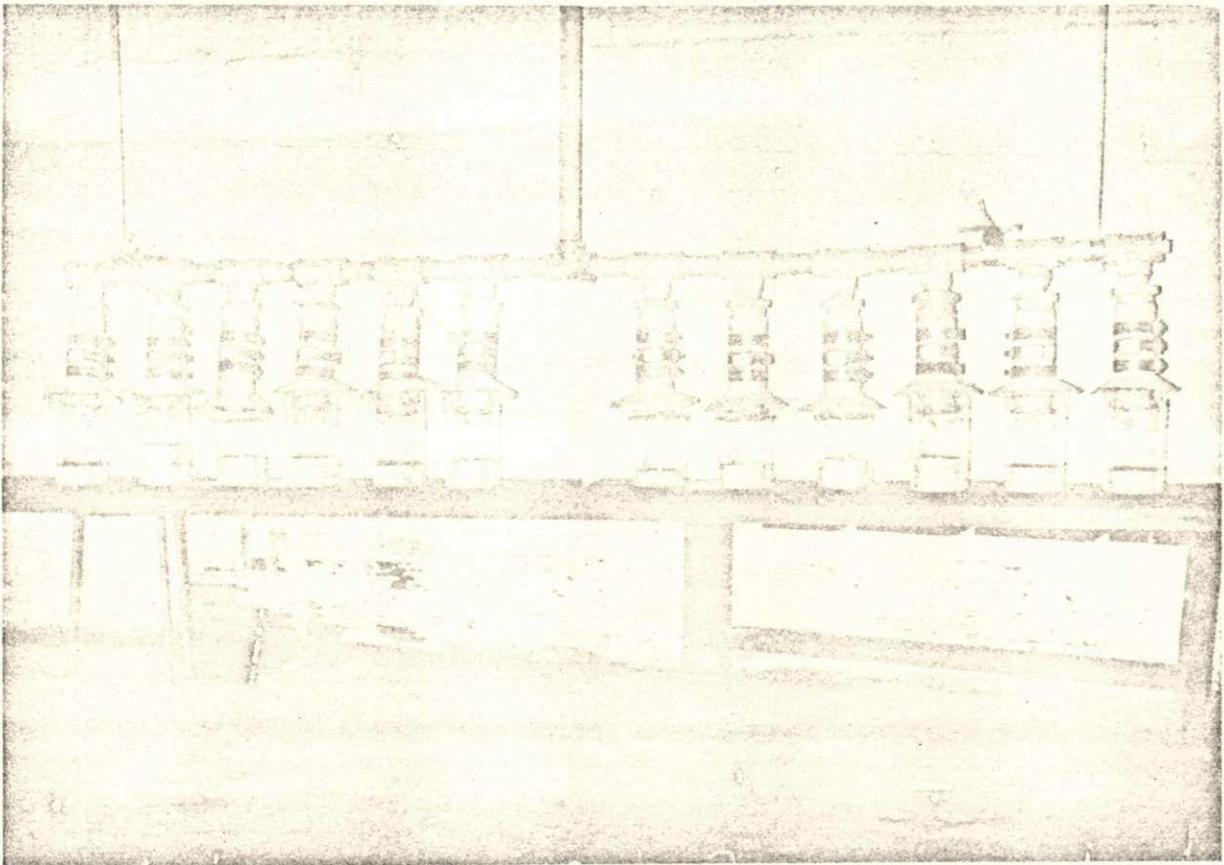
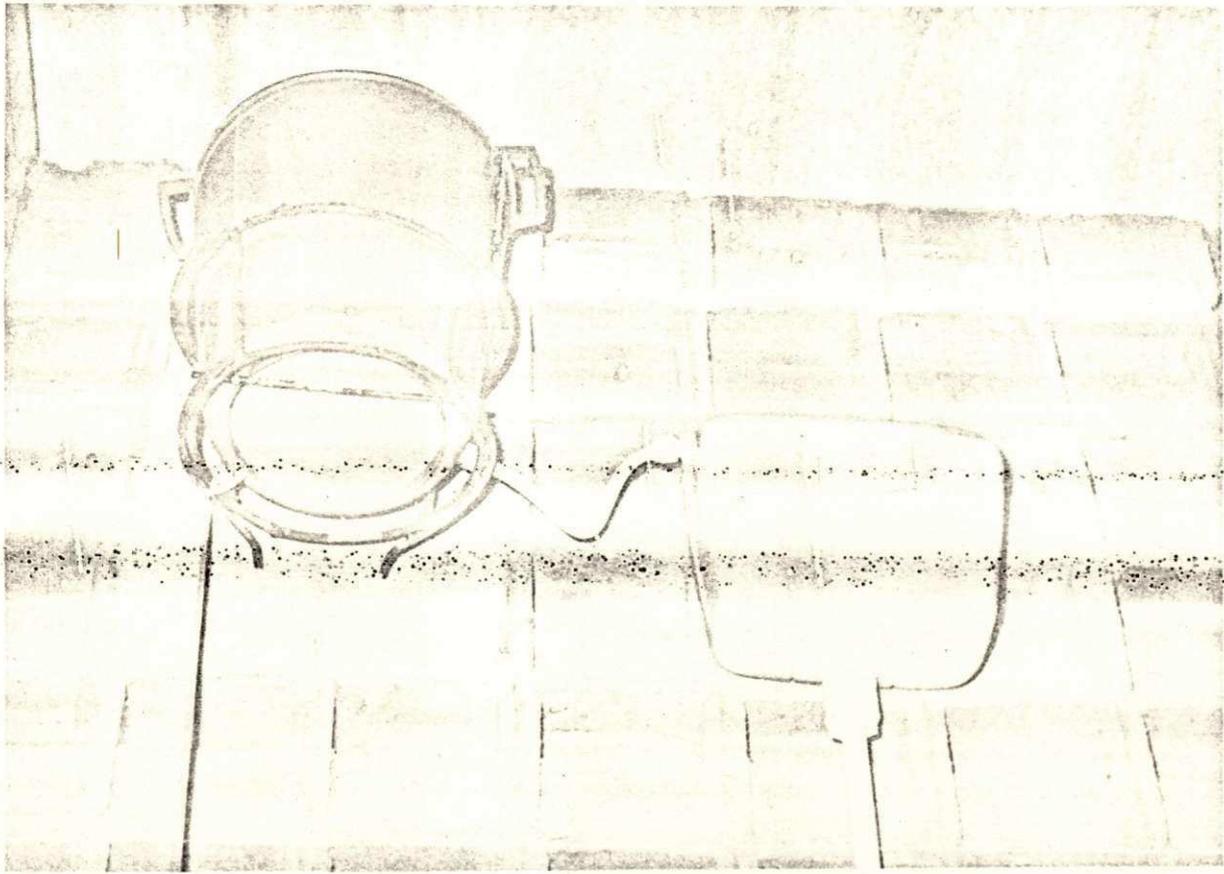
Compactação. Os corpos de prova foram compactados estaticamente aplicando-se cargas sobre o solo por meio de uma prensa hidráulica universal Farnell, na qual foi adaptado um pistão de 40,3 mm de diâmetro (veja Figura 5.6a).

A moldagem foi realizada colocando-se em cada cilindro o peso desejado do solo úmido homogeneizado para um teor de umidade de 17%, e aplicando-se sobre este, cargas, por meio de um pistão adaptado à prensa. Quando a altura da coluna de solo dentro do molde era de 82,5 mm, o que era controlado pela penetração do pistão, a prensa era parada e

Figura 5.5a Detalhes do tanque de alimentação e do tanque regulador para manter o nível constante.

Figura 5.5b Multipermeâmetro utilizado para percolação das amostras e ensaios de permeabilidade.





o pistão retirado. O cilindro complementar superior (maior) era removido do molde e o cilindro principal contendo o solo era invertido, passando a apoiar-se sobre a base de ferro com saliência cilíndrica de 43 mm de diâmetro e recebendo carga do pistão pela outra extremidade, até que o comprimento do corpo de prova ficasse reduzido a 76,2 mm. Neste estágio a prensa era novamente desligada, porém deixando-se o solo suportar a carga por mais um minuto. A inversão era feita para evitar a formação de gradiente de compactação ao longo do corpo de prova. (Ver Figura 5.6b).

Durante a moldagem, toda precaução era tomada para reduzir as perdas de umidade, a cápsula de solo era mantida coberta com um pano úmido e a cada molde preparado, porções de solo eram tomadas para verificação do teor de umidade, sendo rejeitados os corpos de prova que apresentavam diferença de  $\pm 0,20\%$  da umidade desejada.

A fim de evitar que tensões de cisalhamento se desenvolvessem entre a superfície solo molde na compactação, todos os cilindros eram revestidos internamente por película muito fina de vaselina.

Após serem retirados da prensa, os corpos de prova recebiam em ambas as extremidades um disco de papel de filtro de 42 mm e um disco de fibra com toda a superfície perfurada, funcionando este conjunto como uma pedra porosa. Adaptava-se então ao molde, em ambas as extremidades, uma conexão tipo "redução", que servia para evitar a expansão do corpo de prova quando da saturação, e para prender o molde ao conjunto onde seria feita a percolação de água (ver Figura 5.7).

Figura 5.6a Detalhes da compactação das amostras.

Figura 5.6b Detalhes da compactação das amostras após a inversão do molde, podendo ser visto o ci lindro complementar superior já removido do molde.

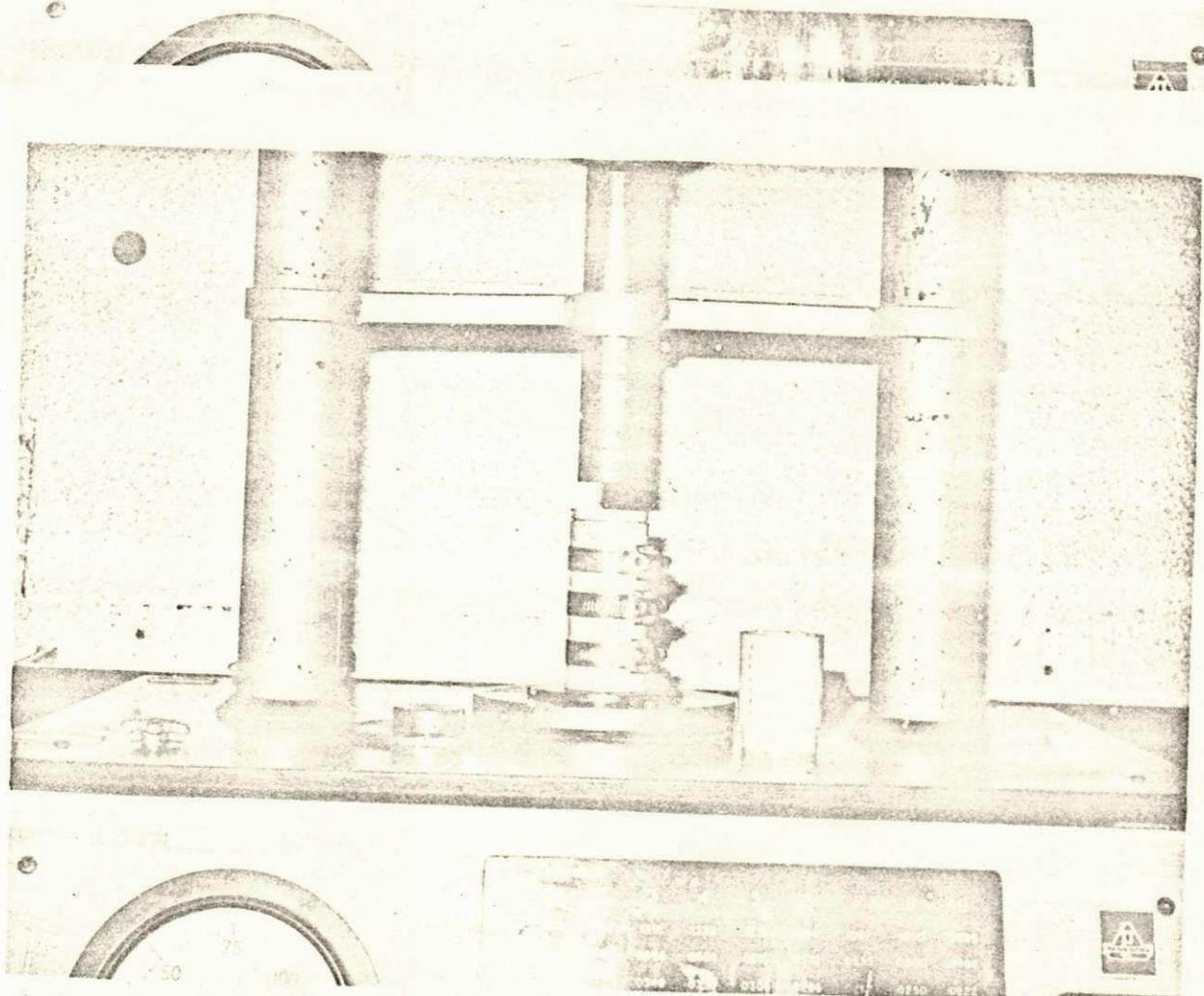
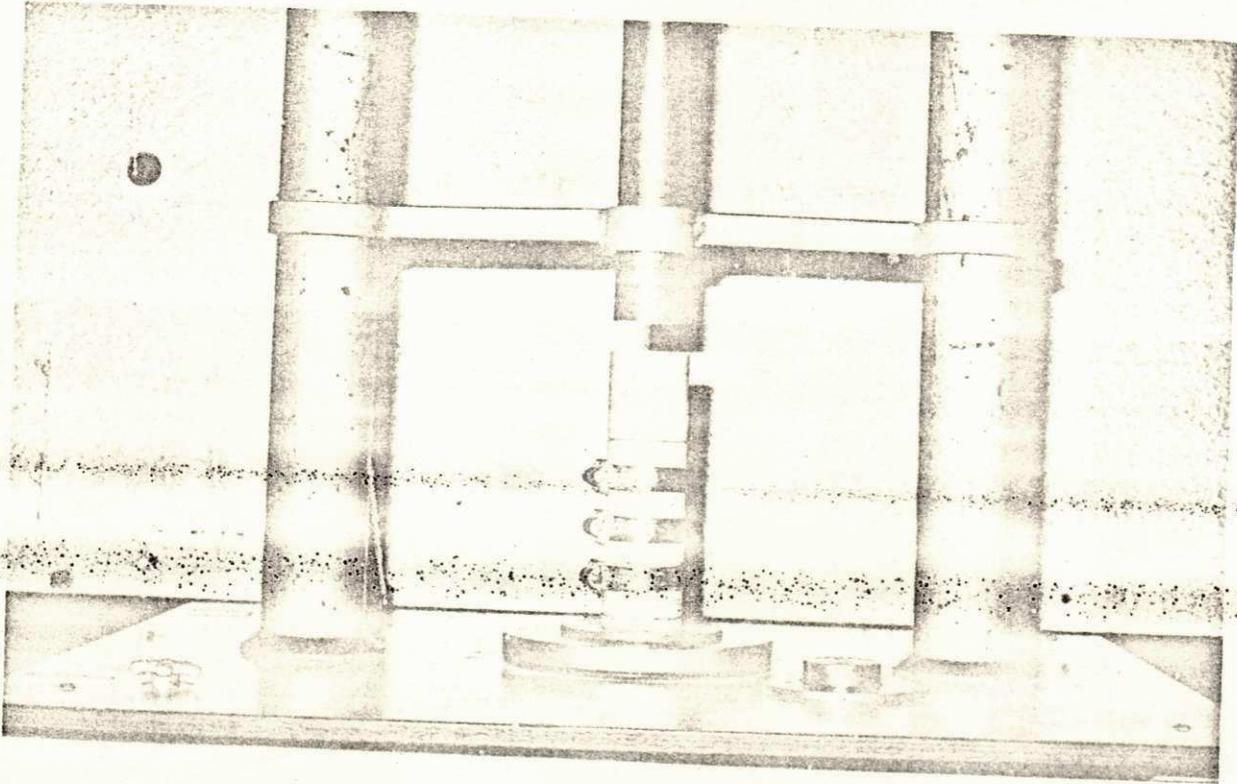
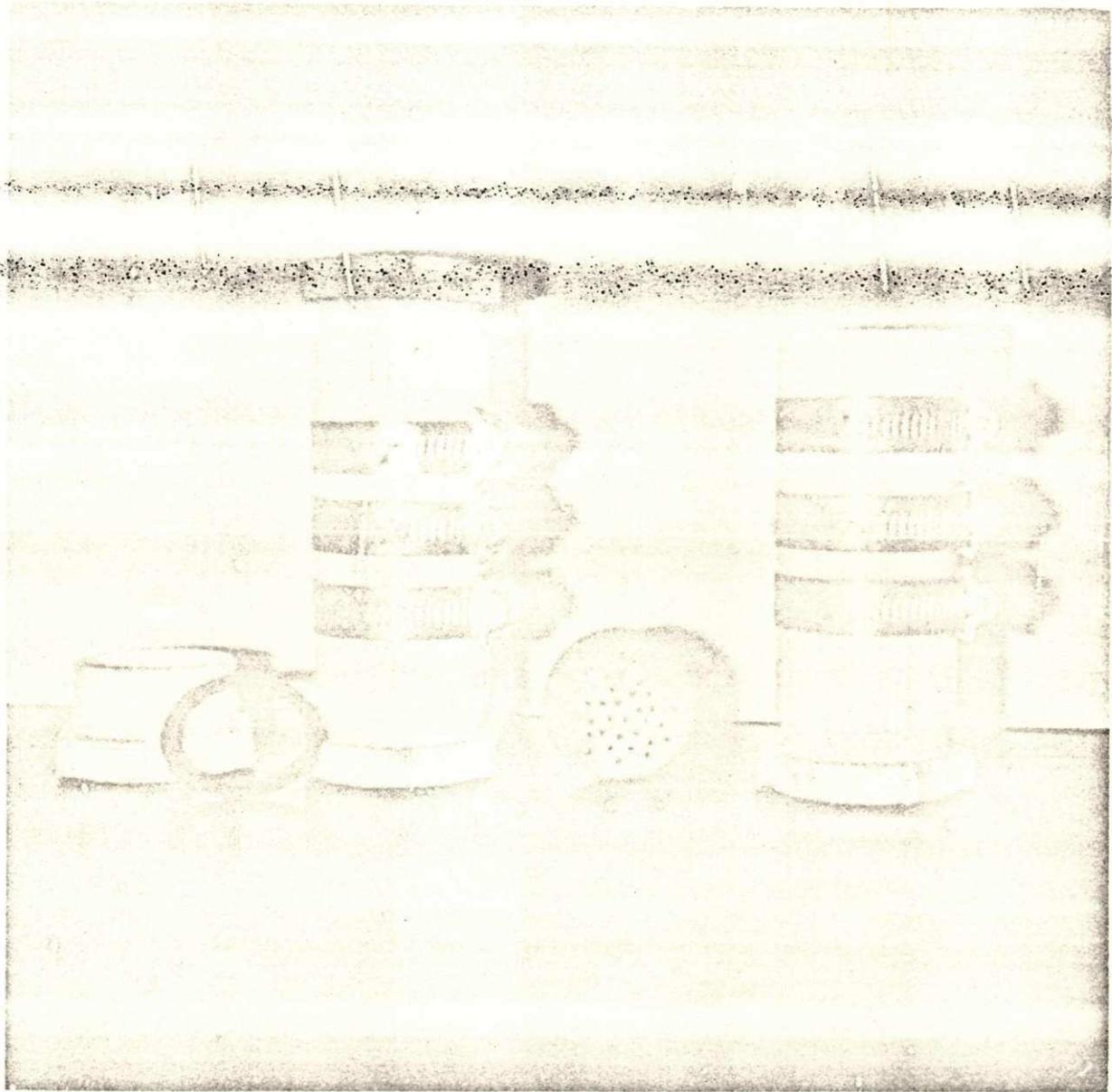


Figura 5.7 Detalhes do molde após compactação pronto para saturação. Podem ser vistas as peças tipo "redução" para evitar expansão do corpo de prova, o disco de fibra perfurado e a borracha de vedação.



Saturação. Após a moldagem, os corpos de prova devidamente preparados eram colocados no dissecador de vidro e submetidos, durante uma hora, ao vácuo produzido por uma bomba marca Brasil. Isto servia para retirar o ar de dentro do corpo de prova, criando no seu interior uma pressão menor que a pressão atmosférica. Após uma hora, fechava-se a válvula do dissecador, desligava-se a bomba e introduzia-se água com o pH requerido no dissecador em quantidade suficiente para submergir os moldes, utilizando o vácuo ali existente. Era então o dissecador aberto e, por duas horas deixava-se o conjunto sujeito à pressão atmosférica. Como a pressão nos vazios do corpo de prova era menor que a atmosférica, a água penetrava no seu interior, promovendo assim a saturação desejada.

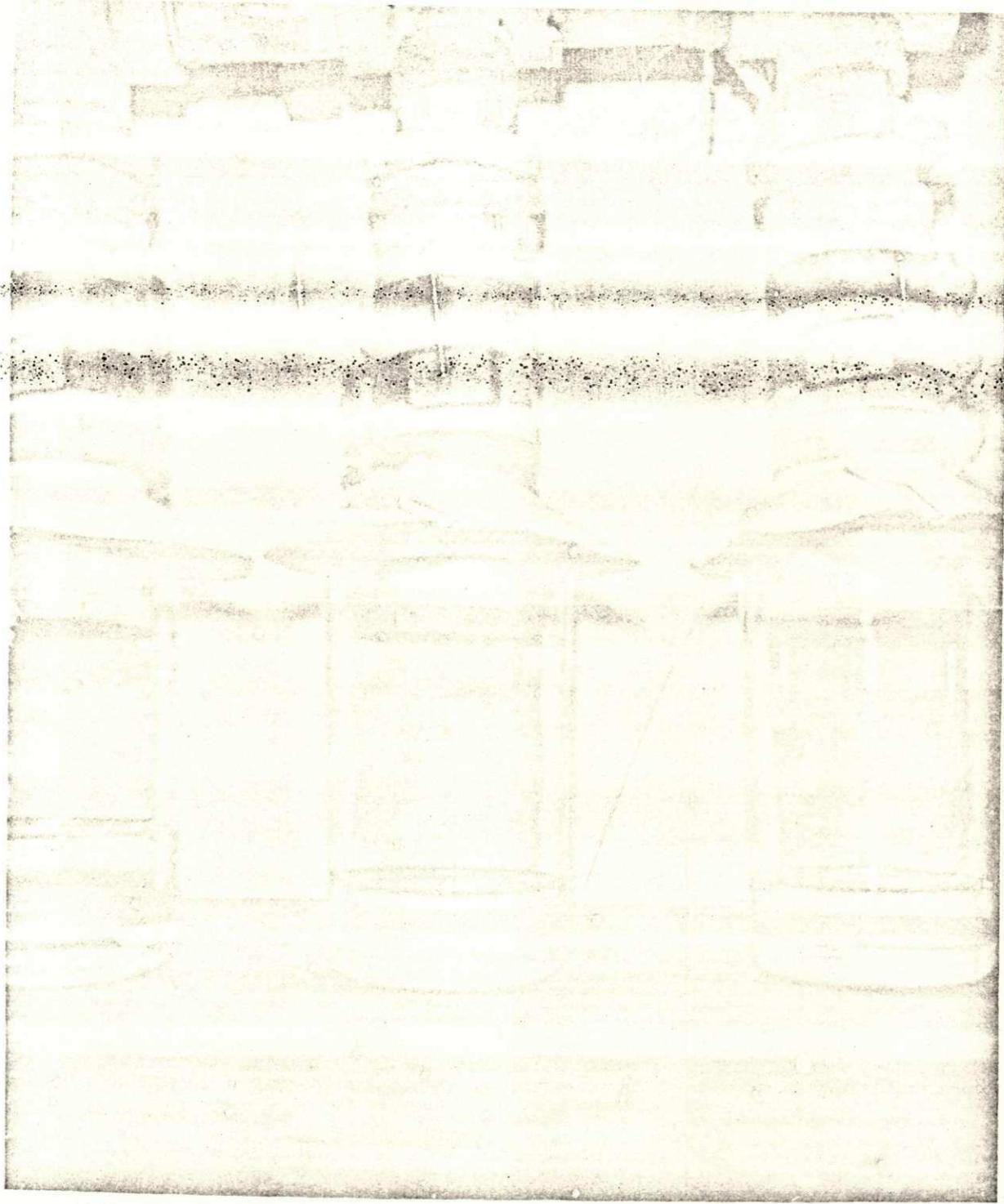
Percolação da água. Após a saturação, os moldes eram conectados ao aparelho de permeabilidade descrito anteriormente. A Figura 5.8 mostra os moldes contendo as amostras saturadas sendo submetidas a percolação de água.

O permeâmetro múltiplo permite que a percolação ocorra sob um gradiente hidráulico de 49, desde que a pressão na parte superior do corpo de prova é de  $0,375 \text{ kgf/cm}^2$ .

A água que atravessava o corpo de prova era recolhida em um "beaker" devidamente protegido por um disco de cartolina adaptado ao molde, e após verificação da quantidade em uma proveta graduada, acondicionada em frascos para análise posterior (ver Figura 5.8).

Os corpos de prova foram submetidos a percolação durante os tempos de 24 h, 48 h, 72 h, e 96 h ininterruptos. Para cada um des

Figura 5.8 Detalhes dos moldes contendo as amostras saturadas sendo submetidas a percolação de água.



ses intervalos de tempo eram moldados 6 corpos de prova, sendo 3 ensaiados imediatamente após a retirada do permeâmetro múltiplo, e 3 levados a estufa por 6 horas a 60°C e posterior saturação à vácuo para ensaio.

O pH 3,25 foi obtido adicionando-se 0,06 ml de ácido clorídrico a cada litro de água destilada, enquanto que para obter o pH 12,4 adicionava-se 0,6 g de hidróxido de sódio a cada litro de água destilada.

#### Cisalhamento Triaxial Consolidado não Drenado

Estes ensaios foram realizados com os corpos de prova compactados, saturados, imediatamente após a percolação e, também secagem parcial em estufa a 60°C e posterior saturação.

Utilizaram-se as pressões confinantes de 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>, 2,0 kgf/cm<sup>2</sup> e 3,0 kgf/cm<sup>2</sup> aplicadas usando o aparelho de pressões de Bishop. O equipamento usado na realização dos ensaios foi da E.L.E. (Engineering Laboratory Equipment) (27), constando de aparelho e célula triaxial devidamente preparada para medições de pressões neutras, a fim de serem obtidas características de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas.

O procedimento adotado nos ensaios foi o preconizado por Bishop e Henkel (28).

## CAPÍTULO VI

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

#### Introdução

Neste Capítulo são apresentados os resultados de compactação, permeabilidade e ensaios triaxiais consolidados não drenados a que foram submetidas as amostras, após percolação de água com pH 3,25, 7,3 e 12,4, durante 24, 48, 72 e 96 horas.

#### Características de Compactação do Solo Estudado

Conforme foi explicado no Capítulo V, as características de compactação do solo estudado foram obtidas usando o ensaio dinâmico de compactação com uma energia de  $5,6 \text{ kgf.cm/cm}^3$  equivalente ao Proctor normal, o qual forneceu a curva teor de umidade versus peso específico aparente seco mostrada na Figura 6.1. Nesta figura pode observar-se que o peso específico aparente seco máximo foi de  $1810 \text{ kgf/m}^3$  correspondente a um teor de umidade ótimo de 18,6%.

Para os ensaios executados, as amostras foram preparadas a um teor de umidade de 17%, ao qual corresponde um peso específico aparente seco de  $1785 \text{ kgf/m}^3$ . Como já foi dito no Capítulo V, admitiu-se uma tolerância no teor de umidade de  $\pm 0,20\%$ .

#### Resultados dos Ensaio de Permeabilidade

Como foi indicado no capítulo anterior, os corpos de prova foram submetidos à percolação de água utilizando-se permeâmetro múltiplo de carga constante que permitia uma carga de  $0,375 \text{ kgf/cm}^2$ .

A água que atravessava a amostra era recolhida em "beackers" a intervalo de 12 horas, e o volume destes medido com provetas graduadas, determinando-se então o coeficiente de permeabilidade para cada intervalo de 12 horas. Estes valores para cada um dos

6.4. As Tabelas B.1, B.2 e B.3 do Apêndice B, mostram os valores quantitativos correspondentes. As Figuras mostram uma acentuada diminuição de permeabilidade com o aumento do tempo de percolação, para todos os valores de pH. Nestes mesmos gráficos são mostradas as retas de regressão linear, com seus respectivos coeficientes de correlação.

Os valores médios dos coeficientes de permeabilidade para cada 12 horas de percolação, são mostrados na Figura 6.5. Observa-se que, quanto maior o pH da água de percolação, menor a permeabilidade do solo.

#### Ensaio Consolidados não Drenados

Os ensaios triaxiais foram executados com amostras submetidas a dois tipos de tratamento: no primeiro denominado série de ensaios  $S_1$ , as amostras foram moldadas a um teor de umidade de 17%, saturadas a vácuo com água no mesmo pH da água de percolação a que seriam submetidas posteriormente, e após percolação por um tempo pré-determinado (24, 48, 72 e 96 horas), imediatamente ensaiadas. O segundo, denominado série de ensaio  $S_2$ , difere da série anterior na secagem parcial a 60°C por 6 horas a que eram submetidas as amostras após o tempo pré-determinado de percolação, e nova saturação a vácuo com água no mesmo pH da água de percolação antes de se proceder ao ensaio triaxial. Esta segunda série serviu para verificar a influência da secagem parcial nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Foram utilizados 4 intervalos de percolação (24, 48, 72 e 96 horas), e 3 amostras para cada determinação, sendo os ensaios triaxiais realizados com tensões confinantes de 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>, 2,0 kgf/cm<sup>2</sup> e 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>, utilizando-se uma velocidade de 0,023 mm/min, escolhida por tentativa a fim de serem obtidas medições precisas das tensões neutras desenvolvidas no interior das amostras quando da aplicação de tensões, visto serem essas medições, um dos fatores primordiais na determinação correta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (29).

A consolidação foi conseguida mediante a

decorrer do ensaio. As medições de pressões neutras permitiram a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões totais e tensões efetivas.

Deve-se notar que este material quando ensaiado imediatamente após moldagem e saturação, não apresentava, claramente, pontos de máximo no "deviator" de tensões, mas, quando submetidos a percolação de água com qualquer valor de pH, passava a apresentar esses valores máximos, sempre abaixo de 3% de deformação. (Ver exemplos no Apêndice A)

O material moldado ao teor de umidade de 17%, saturado com água destilada, ensaiado sem percolação e sem secagem parcial, apresentou um valor de coesão efetiva  $C'$  igual a  $0,540 \text{ kgf/cm}^2$  e um ângulo de atrito efetivo  $\phi'$  igual a  $20^\circ$ . Em termos de tensões totais,  $C_{cu}$  igual a  $0,517 \text{ kgf/cm}^2$  e  $\phi_{cu}$  de  $21,1^\circ$ . Sem percolação, saturado com água destilada mas com secagem parcial de 6 horas em estufa a  $60^\circ$  e posterior saturação com água destilada, os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento foram:  $C'$  igual a  $0,816 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi'$  igual a  $14,7^\circ$ , em termos de tensões totais,  $C_{cu}$  de  $0,759 \text{ kgf/cm}^2$  e  $\phi_{cu}$  de  $16,6^\circ$ .

As relações de coesão efetiva versus tempo de percolação para as séries de ensaios  $S_1$  e  $S_2$  são mostradas nas Figuras 6.6a, 6.7a e 6.8a. Pode-se notar que, em geral, os resultados são em todos os casos valores menores de coesão para a série  $S_1$  (amostras não submetidas a secagem). Por outro lado, as funções empíricas coesão-tempo de percolação exibem um valor mínimo de coesão para qualquer pH da água de percolação.

Linhas de regressão linear para ambas as séries são ainda mostradas nos gráficos indicados. Sua validade será discutida no próximo Capítulo.

As Figuras 6.6b, 6.7b e 6.8b apresentam as variações do ângulo de atrito efetivo com tempo de percolação. Pode-se observar que ao contrário das tendências entre coesão e tempo de percolação neste caso as funções ângulo de atrito tempo de percolação apresentam um máximo valor de  $\phi'$  para ambas as séries de ensaios e todos os pHs testados.

As Tabelas C.1 e C.2 do Apêndice C mostram os valores numéricos de  $C'$  e  $\phi'$ ,  $C_{cu}$  e  $\phi_{cu}$  para todas as condições de ensaio.

Figura 6.1 Relação peso específico aparente seco versus unidade obtida do ensaio de compactação dinâmica com energia equivalente a Proctor normal.

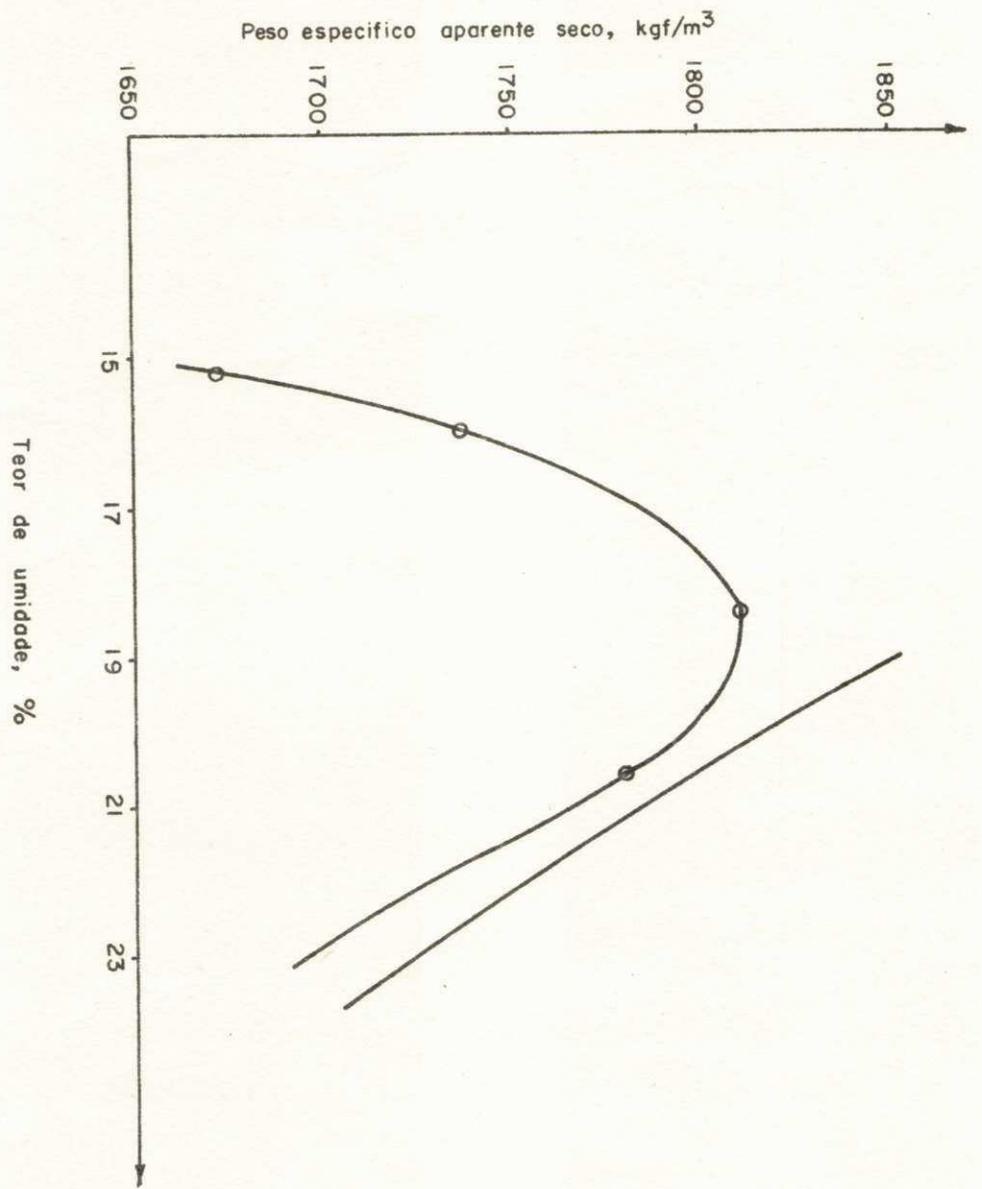


Figura 6.2 Relação coeficiente de permeabilidade versus tempo de percolação, para água com pH 3,25.

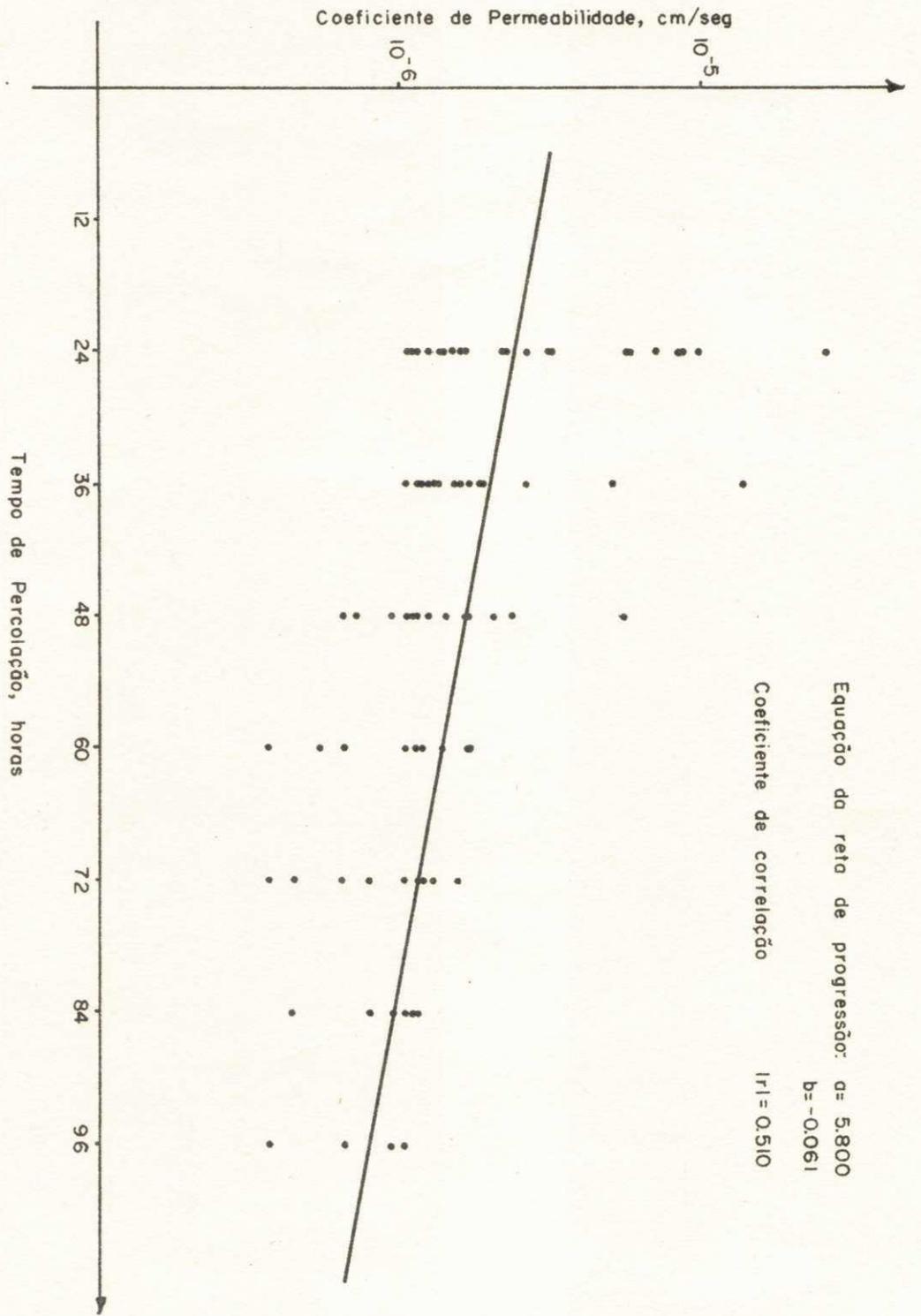


Figura 6.3 Relação coeficiente de permeabilidade versus tempo de percolação, para água com pH 7,3.



Figura 6.4 Relação coeficiente de permeabilidade versus tempo de percolação, para água com pH 12,4.

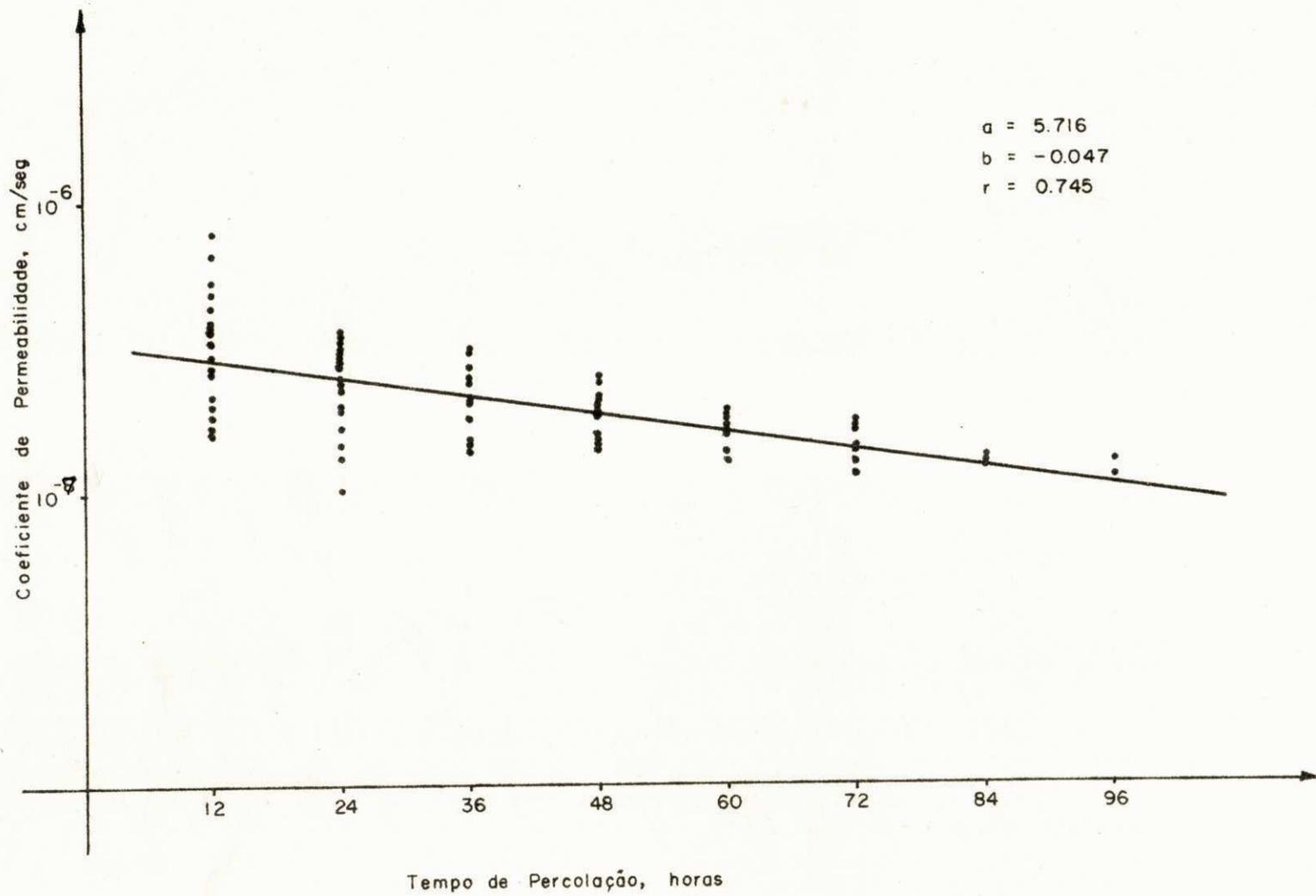


Figura 6.5 Relação coeficientes de permeabilidade médios ver  
sus tempo de percolação. Água com pH 3,25, pH 7,3  
e pH 12,4.

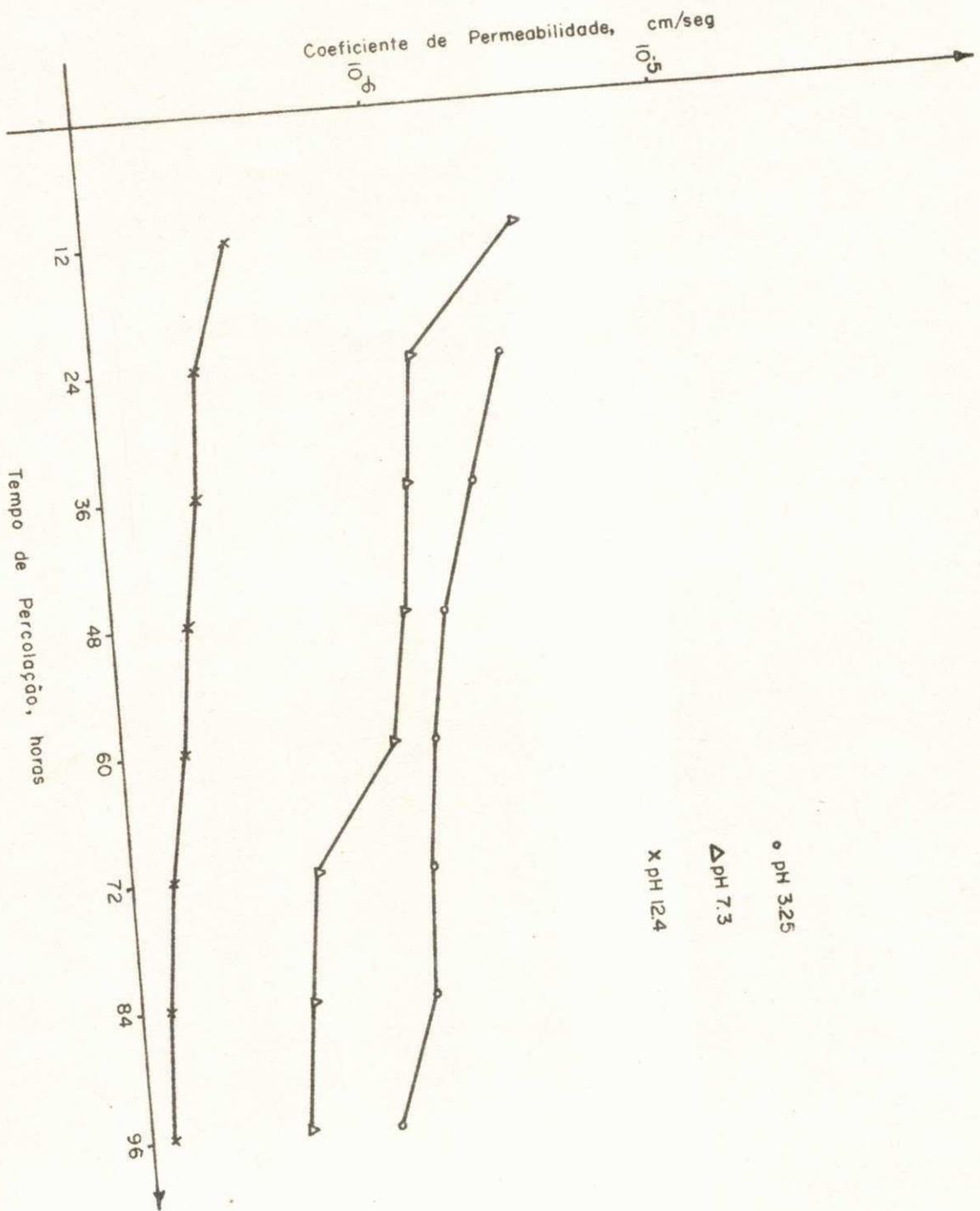


Figura 6.6a Relação entre coesão efetiva e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 3,25.

Figura 6.6b Relação entre ângulo de atrito efetivo e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 3,25.

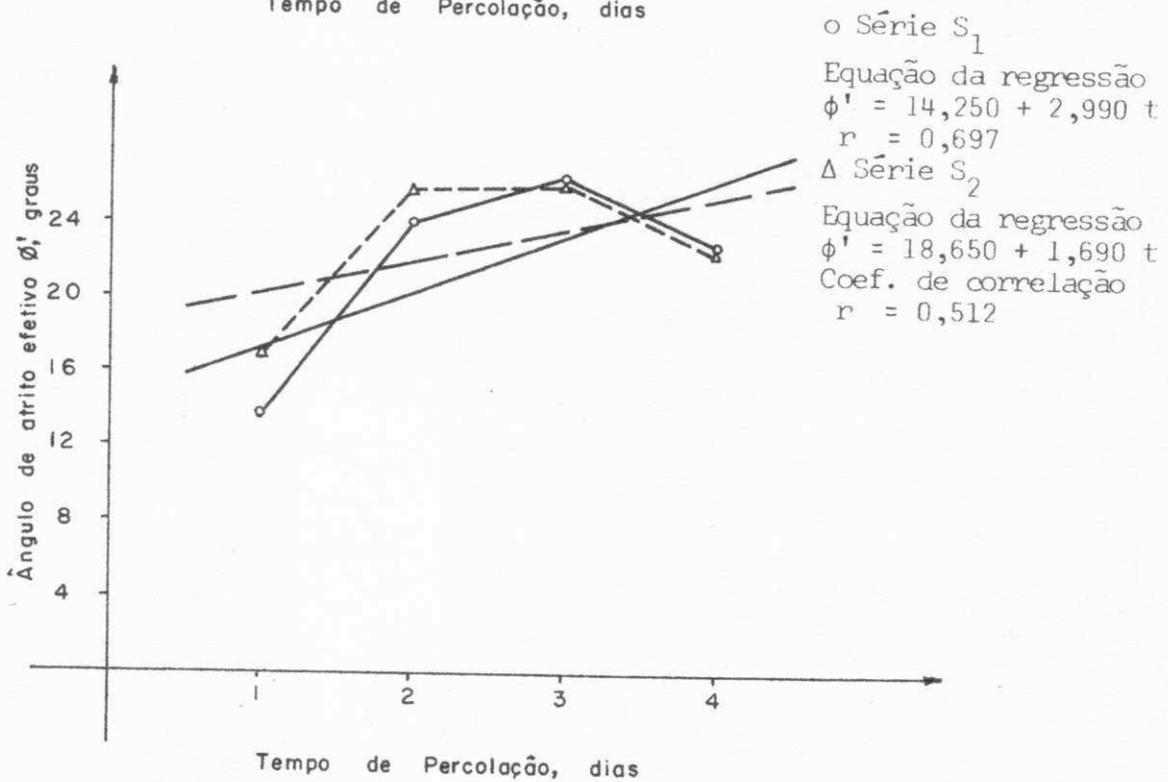
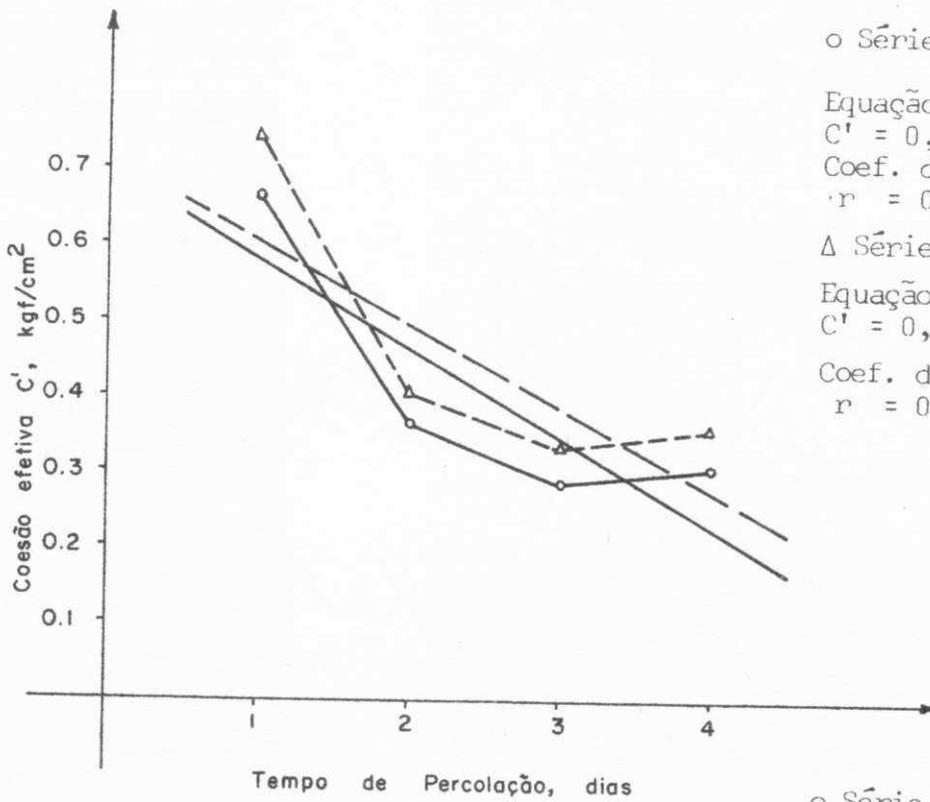


Figura 6.7a Relação entre coesão efetiva e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 7,3.

Figura 6.7b Relação entre ângulo de atrito efetivo e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 7,3.

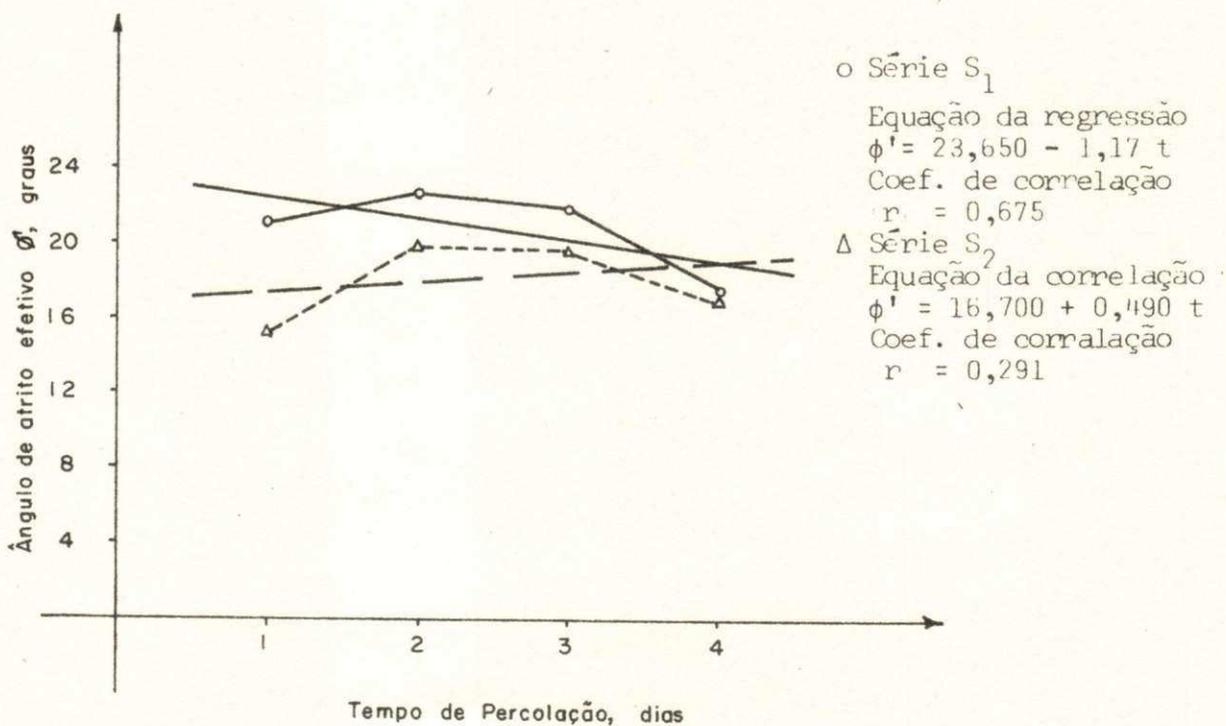
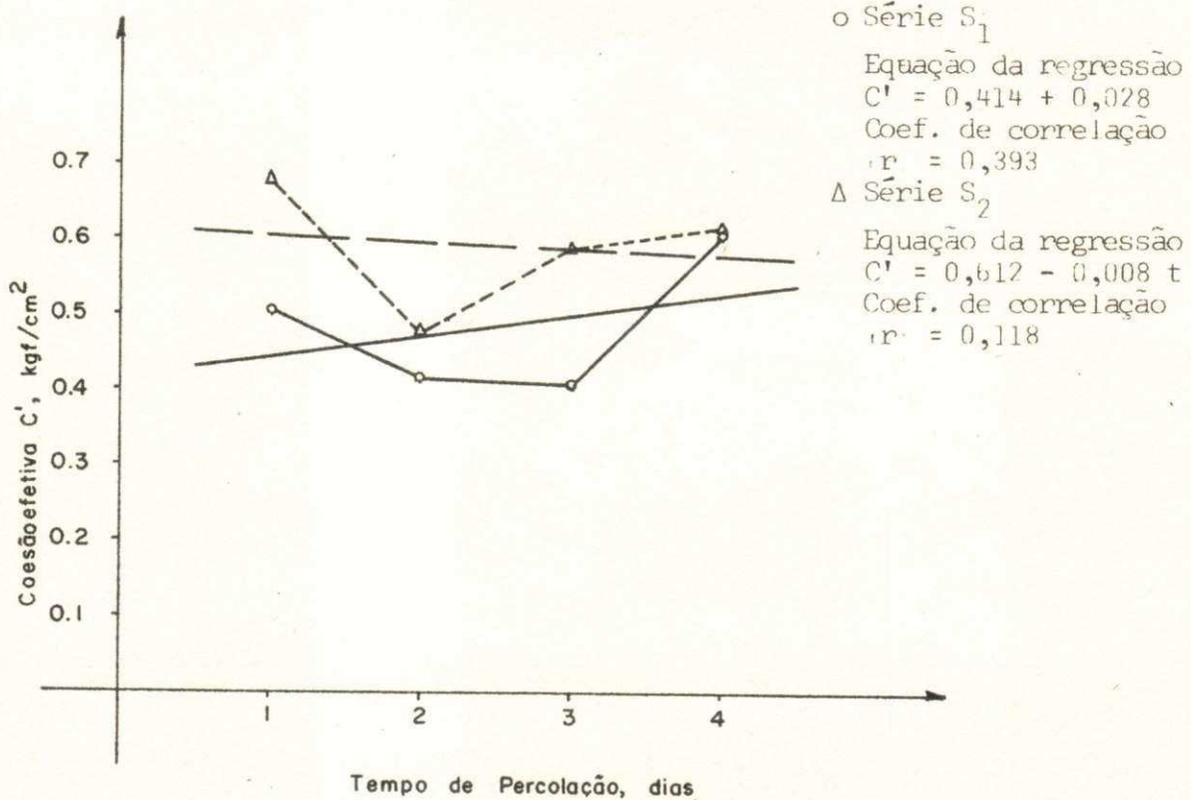
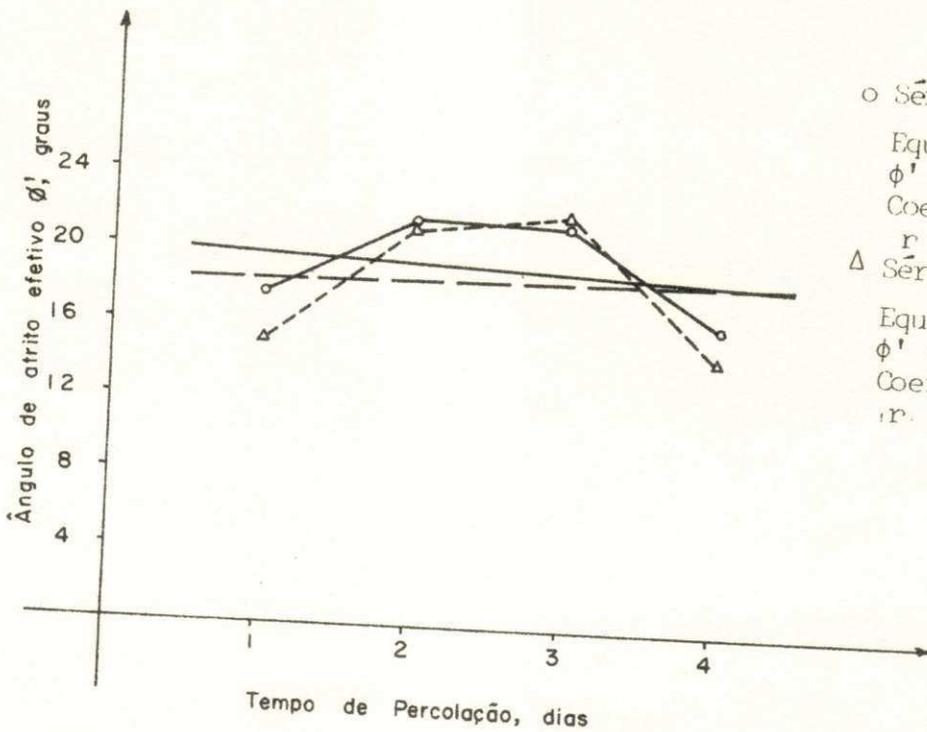
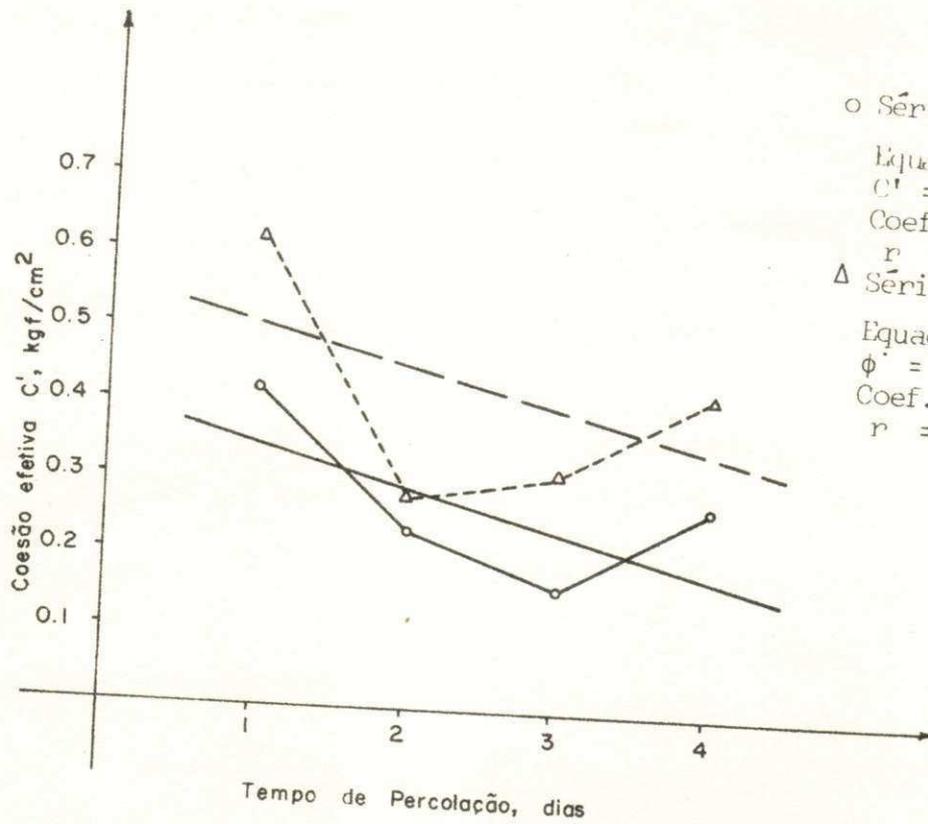


Figura 6.8a Relação entre coesão efetiva e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 12,4.

Figura 6.8b Relação entre ângulo de atrito efetivo e tempo de percolação. Séries  $S_1$  e  $S_2$ . Água com pH 12,4.



## C A P Í T U L O VII

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### Introdução

O presente Capítulo discute a importância dos resultados obtidos e apresenta uma interpretação qualitativa dos efeitos de percolação, secagem parcial e nível de pH na água de percolação na permeabilidade e resistência ao cisalhamento do solo Sapé-Mari estudado.

#### Propriedades Físicas e Químicas e Características de Compactação

As propriedades físicas do solo Sapé-Mari apresentadas no Capítulo VI confirmam os valores obtidos por outros pesquisadores trabalhando com o mesmo solo (22,30,31). A composição química do solo Sapé-Mari foi obtida do trabalho de Lucena (3). O mais importante aspecto da composição química deste solo é que suas concreções contêm sílica amorfa que é, em parte, o material cimentante delas, e ao mesmo tempo a acentuada presença de óxidos amorfos e cristalinos de ferro nas concreções e em menor grau na fração fina do solo que tem grande importância nas propriedades de engenharia que serão discutidas mais adiante.

Como foi indicado por Lucena (3), as propriedades físicas, químicas e mineralógicas permitiram classificar este solo como um solo laterítico na nomenclatura brasileira e como um solo ferruginoso de acordo com a classificação proposta pela USAID (10). A implicação disto é que em termos quantitativos este solo exibirá melhores propriedades de engenharia que outros solos vermelhos.

As características de compactação apresentadas no Capítulo anterior mostraram que o máximo peso específico aparente seco foi de  $1810 \text{ kgf/m}^3$  para um teor de umidade ótima correspondente a 18,6%. Embora os ramos seco e úmido da curva de compactação coincidam com os valores registrados por Borba (22), o máximo peso específico aparente seco a curva

dente umidade ótima são um tanto diferentes. Os métodos de compactação utilizados e o nível de energia de compactação foram os mesmos, podendo a diferença ser então atribuída às variações inerentes ao material. Como é conhecido (10,32), a reprodutibilidade dos ensaios de compactação em solos lateríticos é muito pobre. Para este estudo foram tomados cuidados especiais na coleta das amostras e no procedimento de preparação do solo no laboratório, existindo mesmo assim uma diferença média de peso específico aparente seco para fins de comparação com o trabalho de Borba de  $50\text{g/cm}^3$ , valor que como se vê está dentro de reprodutibilidade aceitável para este tipo de ensaio.

#### Coeficiente de Permeabilidade do Solo Estudado

A reprodutibilidade dos ensaios de permeabilidade, obtidos durante o processo de percolação com o multipermeâmetro de cargas constantes projetado e construído para esta pesquisa, é melhor apreciada em termos dos coeficientes de variação para diferentes tempos de percolação. Estes valores são mostrados nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 do Apêndice B. Nelas pode vêr-se que os coeficientes de variação diminuíam com o tempo de percolação; com excessão dos valores para as doze primeiras horas de percolação com água a um pH de 3,25 os coeficientes de variação variam num intervalo de 16,22 a 1,73%. Se se considera que os valores obtidos provem de diferentes espécimens cuja preparação, por maiores que sejam os cuidados tomados, não permitem completa identidade entre os espécimens, pode dizer-se que a reprodutibilidade do aparelho mostrou sua validade como instrumento para a pesquisa.

Para os três valores de pH de água de percolação a relação do coeficiente de permeabilidade com o tempo de percolação mostrou uma tendência de diminuição do coeficiente de permeabilidade com o tempo. Se se observar as linhas de regressão das Figuras 6.2, 6.3 e 6.4, pode ver-se que para os três casos a diminuição proporcional é aproximadamente a mesma. É claro que as retas de regressão não expressam as funções empíricas de forma adequada visto serem os coeficientes de correlação muito baixos, e por outro lado as tendências não poderiam aceitar-se como reais com uma diminuição constante, pois isto

significaria que para um tempo de percolação finito o material converteria-se em impermeável. Uma maneira empírica de melhor expressar estas relações é mostrada na Figura 7.1. Nesta figura as curvas que expressam as funções coeficientes de permeabilidade versus tempo de percolação foram obtidas por interpolação gráfica por tentativa, ajustando-as aos pontos que representam as médias dos valores medidos. Estas curvas mostram que o valor de permeabilidade se aproxima de uma constante com aumentos do tempo de percolação. Para um pH de 3,5 o valor constante do coeficiente de permeabilidade é aproximadamente  $9 \times 10^{-7}$ ; para um pH de 7,3 igual a  $6 \times 10^{-7}$  e para um pH de 12,4 a  $2 \times 10^{-7}$  cm/seg.

A diminuição do coeficiente de permeabilidade com tempo de percolação para qualquer dos níveis de pH ensaiados pode ser atribuída a efeitos físicos relacionados com pressão de valor significativo que ocasionou um gradiente hidráulico elevado. Alguns pesquisadores (33) relatam o mesmo fenômeno encontrado pesquisando a permeabilidade de solos argilosos. No momento pode sugerir-se que a condição de fluxo aliada ao alto gradiente hidráulico induzem no solo um rearranjo de sua geometria que, sem mudar o índice de vazios, incrementa a resistência ao fluxo de água em virtude de uma diminuição do diâmetro médio dos poros do solo.

O aspecto mais interessante do estudo de permeabilidade é a influência de mudança de pH na água de percolação. Se se considera que o coeficiente de permeabilidade a um pH de 7,3, que é o que corresponde à água destilada, e a permeabilidade do solo sob condições normais, então é claro que no limite das condições de ensaio um decréscimo de pH tem como efeito incrementar a permeabilidade do solo; no entanto um acréscimo de pH diminui o coeficiente de permeabilidade notavelmente. A interpretação destes resultados pode ser, no momento, somente expressa por tentativa pois a água de percolação que atravessou os espécimens não foi analisada para a determinação dos compostos químicos que foram lixiviados. Esta deficiência deve-se a falta de facilidades de Laboratório para estas análises.

A um pH de 3,25 teoricamente íons de  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e alumínio poderiam ser carregados na água de percolação.

Para o caso do solo estudado a quantidade de compostos de ferro e alumínio atacável por água ácida será muito limitada devido a presença de sílica amorfa que provavelmente encontra-se como cimento nas agregações sobretudo de compostos de ferro (3). Desta maneira, os materiais carregados em solução serão aqueles provenientes dos óxidos livres de sílica amorfa que estarão ocupando pontos de contato entre agregações e na superfície do argilo-mineral. O resultado de perda limitada destes compostos será um pequeno aumento no volume dos vazios do solo e portanto um incremento de permeabilidade.

No caso da medida de permeabilidade obtida com água alcalina a um pH de 12,4, houve uma diminuição com relação à permeabilidade obtida para água de percolação a um pH de 7,3. Inspeção da água de percolação após atravessar o espécimen mostrou que esta tinha uma coloração vermelha e material em suspensão que sedimentava após 24 horas. À primeira vista isto pareceria surpreendente desde que a um pH de 12,4 os compostos solúveis seriam somente os provenientes de sílica e alumínio. Mas se se considera, como já foi dito antes, que a sílica amorfa nestes solos tem a função de agente cimentício especialmente ligando compostos de ferro, pode aceitar-se que a remoção da sílica amorfa sob condições de fluxo a alta pressão ocasionará o carregamento de partículas pequenas. Ao liberar compostos de ferro por remoção da sílica amorfa cimentante, incrementa-se o número de canais através dos quais a água flui e ao mesmo tempo se propicia a troca de cátions na superfície do argilo-mineral que como se sabe é caulinita. Desta maneira, um aumento dos canais de fluxo, mais o aumento da espessura da água absorvida nas superfícies do argilo-mineral devido aos cátions Na, tem como efeito final diminuir a permeabilidade do solo.

#### Resistência ao Cisalhamento do Solo Estudado

A secagem parcial do solo após tempos variáveis de percolação, em todos os casos aumentou o valor de coesão efetiva em relação a coesão obtida do solo sem secagem parcial. Estes resultados são de muito interesse devido ao fato que é aceito por muitos pesquisadores de que as propriedades de solos ferruginosos não são afetadas por secagem a temperaturas

menores que  $100^{\circ}\text{C}$ . Não obstante isso ser verdade para muitos solos ferruginosos, para alguns deles especialmente aqueles onde ainda há presença de compostos ferrosos amorfos hidratados como no caso do solo Sapé-Mari, secagem no laboratório ou secagem equivalente no campo a temperaturas tão baixas quanto a usada ( $60^{\circ}\text{C}$ ), tem como efeito modificar apreciavelmente os parâmetros de cisalhamento. O aumento da coesão por secagem parcial é então devido a transformação de materiais amorfos em materiais cristalinos que naturalmente cimentam com maior eficiência as partículas do solo. O ângulo de atrito efetivo, ao contrário da coesão, diminuiu com relação ao ângulo de atrito dos espécimens que não foram submetidos a secagem parcial. Isto confirma a explicação de que os aumentos de coesão são devidos a cimentação mais efetiva das partículas do solo.

O efeito do pH nos parâmetros de cisalhamento triaxial pode ser melhor discutido se se consideram como base de comparação os valores de  $C'$  e  $\phi'$  correspondentes a um pH de 7,3. Para todos os tempos de percolação (com exceção de um dia para pH 3,25), os valores de  $C'$  e  $\phi'$  foram menores para pH de 3,25 e menores ainda para o pH de 12,4. Isto pode explicar-se claramente em termos do efeito de solubilidade da água de percolação. A um pH 7,3 é possível que relativamente pequenas quantidades de compostos ferrosos possam ser removidas do solo. Isso implica que as variações nos parâmetros de cisalhamento triaxial serão quantitativamente menores. No caso de percolação com água ácida, como já se indicou anteriormente, há provavelmente remoção de alumínio e compostos férricos. Esta remoção ocasionará certo grau de desagregação com a consequente diminuição dos valores de coesão. Para o caso de água alcalina, a remoção da sílica e carreamento em solução de partículas de compostos ferrosos ocasiona uma desagregação mais violenta das partículas do solo e portanto a diminuição do valor de coesão é ainda maior.

Se agora se analisa o comportamento do solo em relação as variações dos parâmetros de cisalhamento triaxial com tempo de percolação, pode-se observar (Veja Figuras 6.6, 6.7 e 6.8) que o valor de coesão para todos os casos exibe um decréscimo até um valor mínimo a certo tempo de percolação, e daí em diante um acréscimo. No caso do ângulo de atrito as tendên

cias são no sentido oposto, isto é, enquanto a coesão diminui o ângulo de atrito aumenta, e quando a coesão aumenta o ângulo de atrito diminui. A explicação para este comportamento pouco usual é a mesma encontrada em outras pesquisas (22). Resumidamente pode se explicar que a reversão nos valores de coesão e ângulo de atrito é devido a alterações na microestrutura do solo que são ocasionadas, neste caso, pela destruição das agregações por efeitos de solubilidade da água de percolação. Em todos os casos, mais particularmente quando a água de percolação é ácida ou alcalina, o valor inicial de coesão é bastante alto, e a desagregação paulatina das agregações por efeito de percolação ocasiona diminuição da coesão e incremento do ângulo de atrito. A certo valor crítico de tempo de percolação (que é função da efetividade de solubilização da água de percolação) as microagregações são quebradas e um novo sistema estrutural passa a existir no solo. Isto se traduz numa reversão nas tendências da função  $C'$  versus tempo de percolação e  $\phi'$  versus tempo de percolação.

É interessante notar que o comportamento do solo durante o ensaio triaxial e o modo de ruptura é o mesmo que o encontrado por Borba (22). Como no estudo deste pesquisador, a pressão neutra durante o intervalo de deformação do ensaio não diminui. Por outro lado os diagramas  $p' - q$  mostram o mesmo tipo de comportamento, isto é, durante os estágios iniciais de incremento de  $q$  o solo se comporta como um material granular, a pressão neutra incrementa num intervalo desprezível, e a partir de certo valor de  $q$ , valor que decresce com a água de percolação alcalina mais que com água de percolação ácida, surge um brusco acréscimo no valor da pressão neutra, o que pode-se interpretar como o valor crítico de  $q$  que causa mudança na estrutura do solo. (Ver Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5).

As implicações para o engenheiro civil que utiliza estes materiais em estruturas são óbvias. Mudanças do coeficiente de permeabilidade nas obras de terra, tais como barragens, podem acarretar rupturas estruturais principalmente devido a diminuição da resistência do material que forma a estrutura. Por outro lado, carreamento de materiais em solução e dispersão, podem provocar, como já se indicou durante a revisão, problemas em estruturas ou dispositivos internos como por exem

ção dos resultados obtidos, sendo que estes são válidos somente para as condições do modelo de laboratório, mas deve-se ressaltar que os resultados são válidos como indicação de tendências do comportamento deste solo laterítico que não são comuns em solos desenvolvidos em regiões temperadas.

Figura 7.1 Relação coeficiente de permeabilidade médios versus tempo de percolação, mostrando a tendência a estabilização com o tempo. Água com pH 3,25, pH 7,3 e pH 12,4.

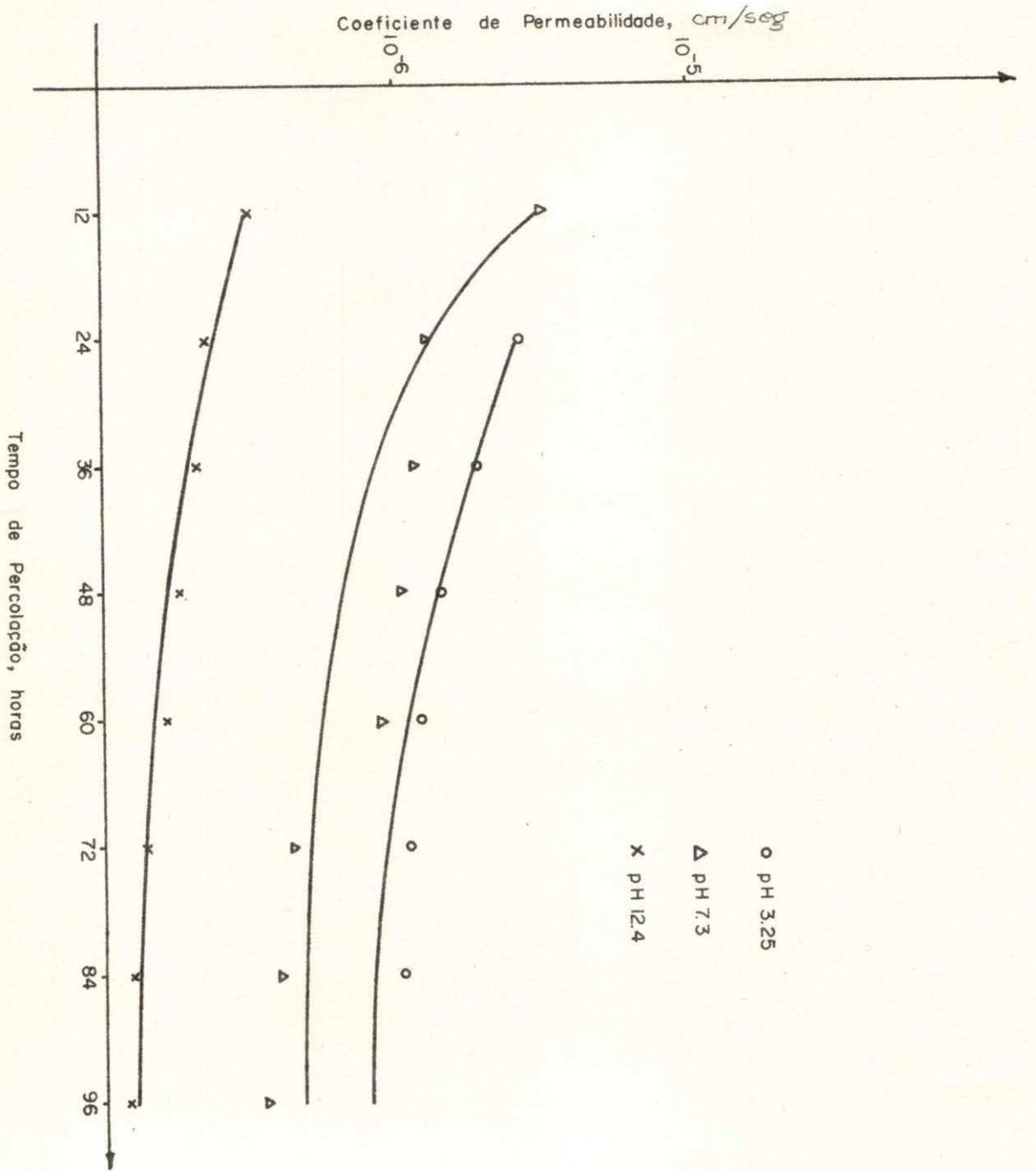


Figura 7.2a Curva tensão-deformação para 3 diferentes ensaios triaxiais com amostra sem percolação mostrando que o "deviator" não apresenta ponto máximo definido. Série  $S_1$ .

Figura 7.2b Curva tensão-deformação para 3 diferentes ensaios triaxiais com amostras sem percolação mostrando o efeito de secagem no "deviator". Série  $S_2$ .

Figura 7.2c Curva de  $\sigma'_1/\sigma'_3$  e pressões neutras com a deformação axial. Amostra sem percolação. Série  $S_1$ .

Figura 7.2d Curvas de  $\sigma'_1/\sigma'_3$  e pressões neutras como a deformação axial. Amostra sem percolação. Série  $S_2$ .

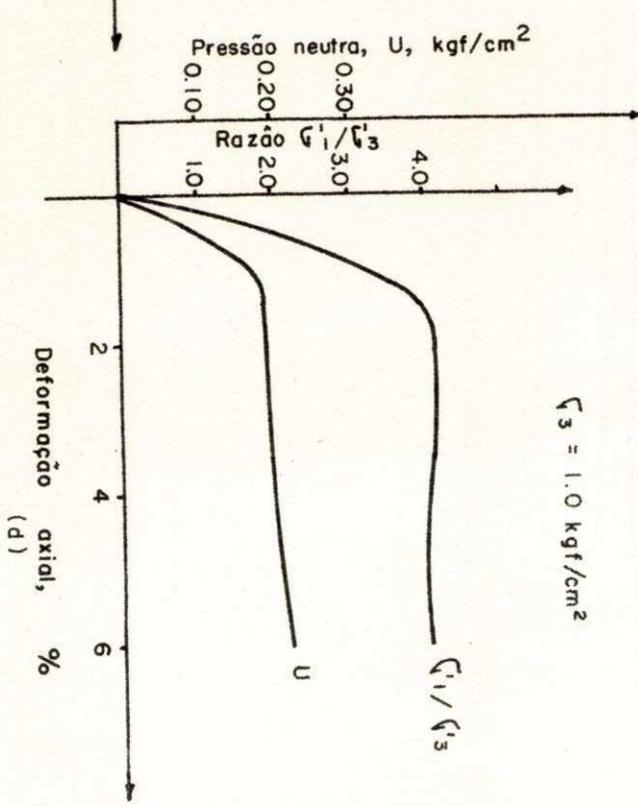
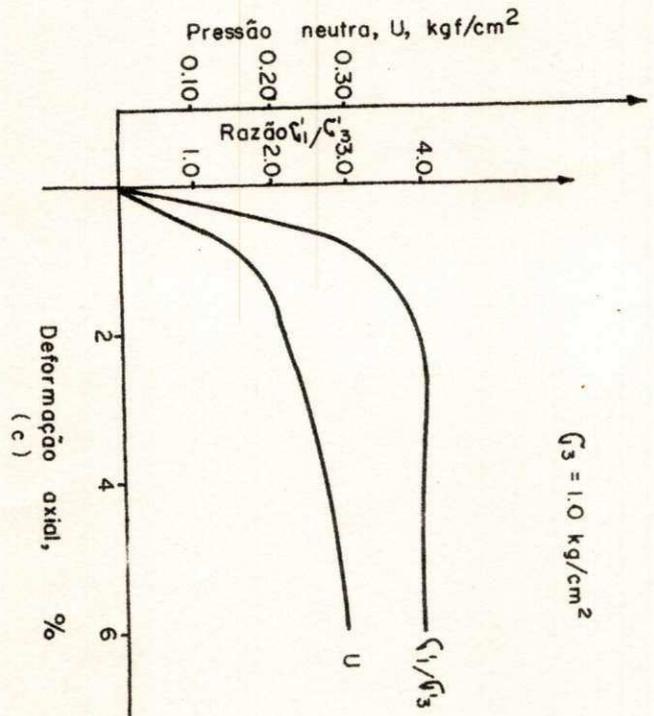
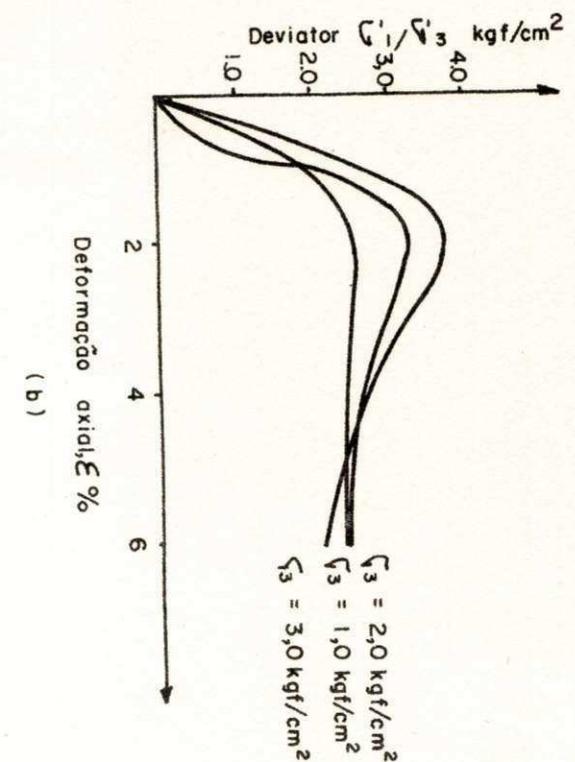
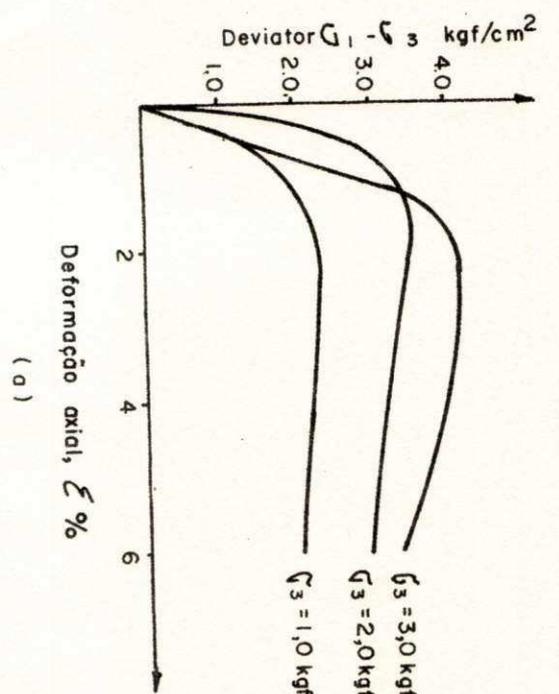


Figura 7.3 Diagrama p-q, mostrando a trajetória das tensões para amostras sujeitas a percolação com água com pH 3,25.

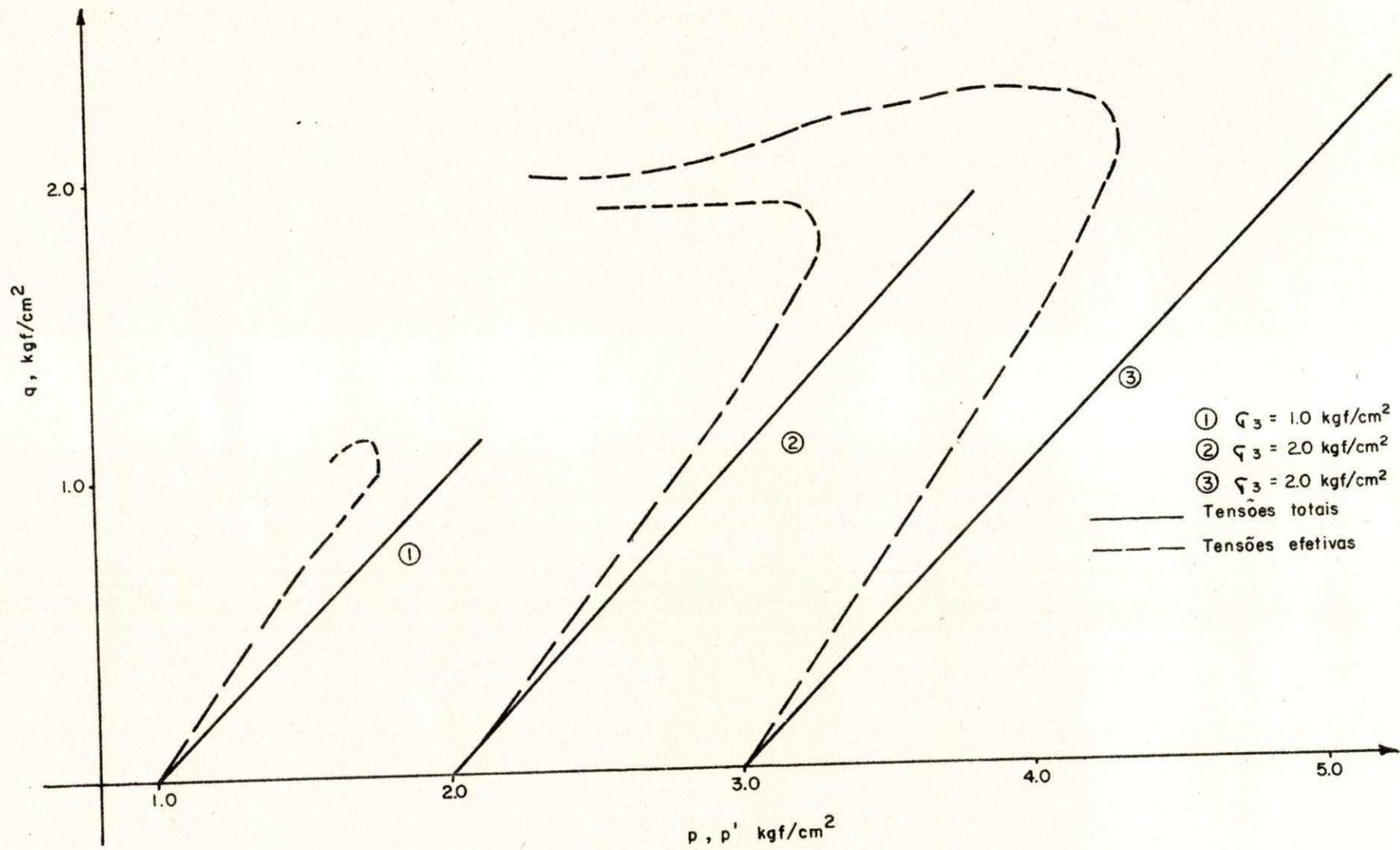


Figura 7.4 Diagrama p-q, mostrando a trajetória das tensões para amostras sujeitas a percolação com água com pH 7,3.

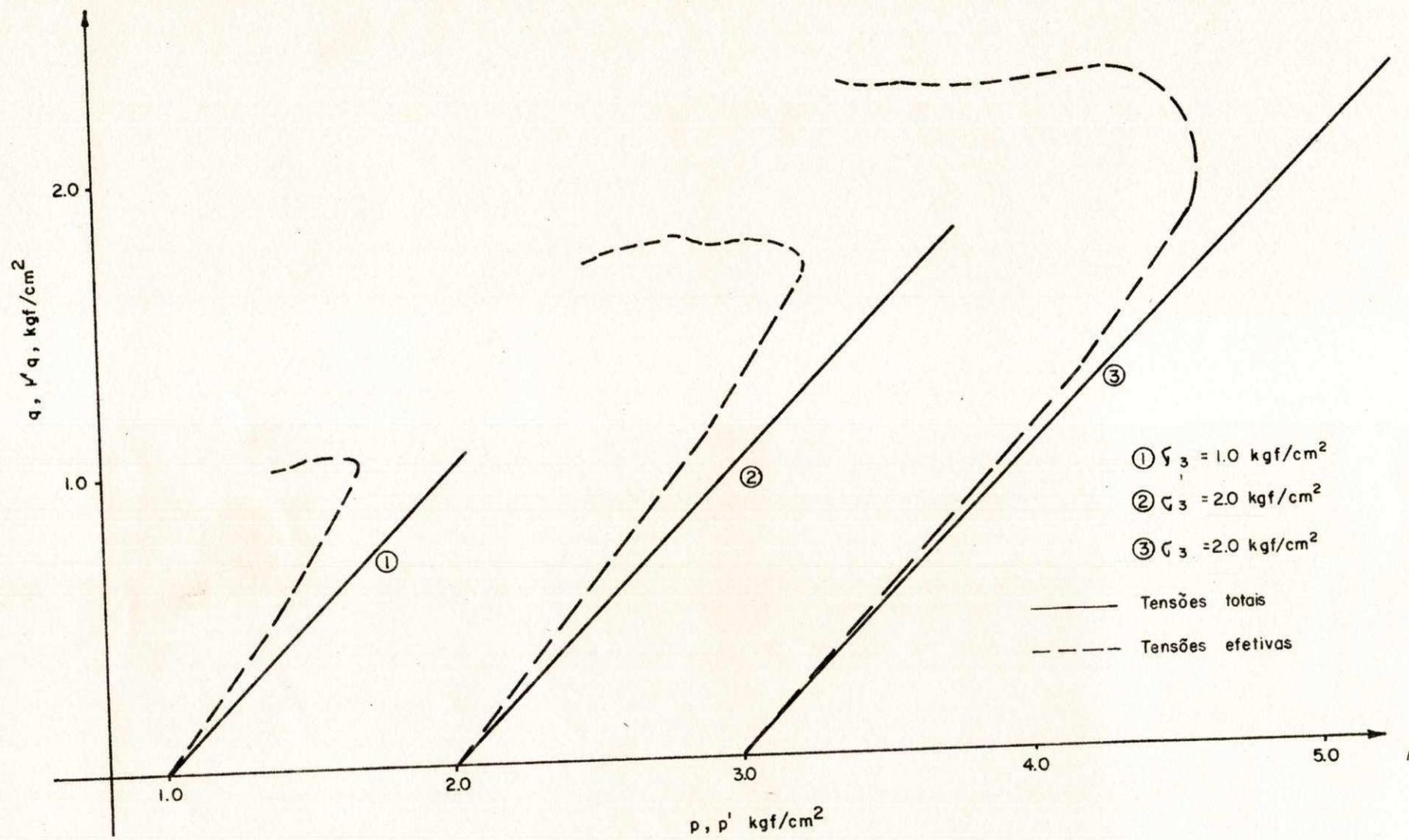
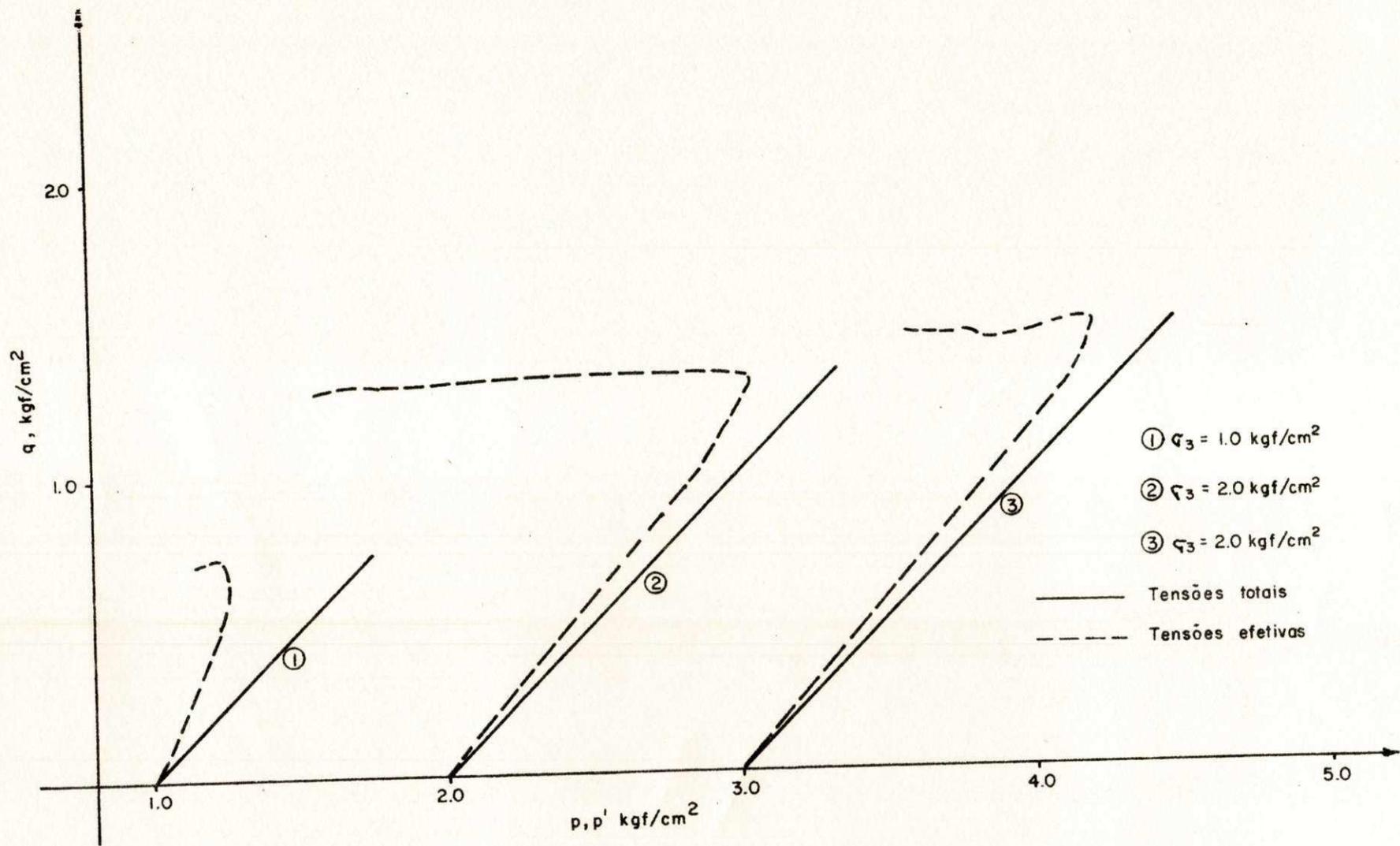


Figura 7.5 Diagrama p-q, mostrando a trajetória das tensões para amostras sujeitas a percolação com água com pH 12,4.



## C A P Í T U L O    V I I I

### CONCLUSÕES

As conclusões que os resultados deste trabalho permitem apresentar, se referem a dois aspectos: desenvolvimento de equipamento especial para a pesquisa e comportamento do solo estudado.

Com referência ao equipamento:

1. Os moldes para uso múltiplo de compactação, medida de coeficiente de permeabilidade e percolação, que foram projetados e construídos especialmente para este trabalho podem ser recomendados para uso futuro em vista dos resultados satisfatórios obtidos com seu uso.
2. A técnica de saturação a vácuo e o equipamento construído, permitiram reduzir o tempo de saturação de espécimens a uma hora; sua facilidade de operação e as peças convencionais utilizadas para sua construção permitem assegurar que este equipamento deveria ser padrão em um laboratório de solos.
3. O multipermeâmetro de carga constante projetado e construído permite ensaiar 12 espécimens ao mesmo tempo. Esta vantagem, apoiada pela comprovação estatística de reprodutibilidade de resultados, permite concluir que o equipamento é de grande potencial para pesquisas de laboratório.

Com referência ao comportamento do solo Sapê-Mari estudado:

1. A permeabilidade do solo laterítico estudado diminui com o tempo de percolação até um valor constante. Por isso, nos ensaios de permeabilidade de laboratório com solos do mesmo tipo, se recomenda que as permeabilidades sejam medidas até alcançar o estado de equilíbrio.
2. O coeficiente de permeabilidade do solo Sapê-Mari é influenciado pelo nível de pH da água de percolação. Este coeficiente é influenciado pelo nível de pH da água de percolação.

## C A P Í T U L O IX

### SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Dado o caráter pioneiro desta pesquisa e suas óbvias limitações, parece apropriado sugerir o desenvolvimento das seguintes pesquisas futuras:

1. A justificativa das interpretações qualitativas do comportamento do solo laterítico estudado poderá parcialmente ser feita fazendo análise químicas das águas que durante o processo de percolação passam através dos espécimens. Por isto se recomenda que este trabalho seja desenvolvido.
2. Trabalhos similares ao descrito nesta dissertação deveriam ser desenvolvidos utilizando outros solos lateríticos obtidos em regiões com condições climáticas e topográficas diferentes.
3. Os tempos de percolação que neste trabalho foram limitados a quatro dias não permitiram chegar a um possível estado e equilíbrio. Por isso deveria se ampliar o trabalho a maiores tempos de percolação.
4. O potencial de oxidação Eh não foi controlado durante os ensaios. Devido a que as solubilidades dos componentes dos solos lateríticos são realmente funções não sô do pH mas do Eh, um programa futuro deveria incorporar controle deste parâmetro.
5. Outras variáveis de importância no comportamento de solos lateríticos com referência a permeabilidade e cisalhamento triaxial são: umidade de compactação e índice de vazios. Estas variáveis deveriam ser pesquisadas.
6. Os resultados apresentados mostraram claramente a influência da secagem nos parâmetros estudados. Deveriam então se ampliar os estudos de secagem a programas de ciclagem que simulem as condições que ocorrem no campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Infantil Jr. N. e Kanji, M.A., Preliminary considerations on geochemical factors affecting the safety of earth dams. 2<sup>nd</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology, São Paulo, Brasil 1974.
2. Buchanan, F.A., A Journey from Madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar, Vol. 2, London East India Company. 1807.
3. Lucena, F.B., A natureza e propriedades de solos vermelhos do Estado ds Paraíba. Tese M.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1976 - Inédito.
4. Ferreira H.N., O conceito de laterita na engenharia civil, Laboratório de Engenharia Civil de Angola. Publ. nº 96, Luanda 1963.
5. Martin, E.D. e Doyne, H.C., Laterite and Laterite Soil in Sierra Leone. Journal of Agriculture Science, Vol 20, p. 135-143. 1930.
6. Winterkorn, H.F. e Chandrasekharan, E. C. Laterite Soils and their stabilization. Highway Research Board, Bull 44, p. 10-29, 1951.
7. Vallerga, V. B. e Van Til, C.J. Classification and engineering properties of lateritic materials, Highway Research Record nº 310, 1970.
8. Grant, K., Laterites, Ferricretes, Brauxites and silcretes, 2<sup>nd</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology, Vol. 1, 1974.
9. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Especificações Gerais para Obras Rodoviárias, DNER, 1971.

10. United States Agency for International Development. Laterite and Laterite Soils and Other Problem Soils of Africa. Report prepared by Lyon Associates. Inc; Building and Road Research Institute, Numasi, Ghana, 1971.
11. Ferro, J.G.O., Lateritas: Origem, formação e propriedades, Seminário apresentado no Curso de Pós-Graduação de Projeto de Pavimentos, Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. 1974. Inédito.
12. Gidigas, M.D. e Bhatia, H.S. The importance of soil profiles to the engineering studies of laterite soils in Ghana. Proc. of 5<sup>th</sup> Conf. on African Soil Mechanics and foundation engineering: Luanda, 1971.
13. Norton, S. A. Laterite and Brauxite formation. Econ. Geol. Vol. 68, nº 3, 1973.
14. Townsend, F.C. Manke, G.P. e Parcher, J. V. The influence of sesquioxides on Laterite Soil properties. Highway Research Record nº 374, p. 80-92, 1971.
15. Townsend, F.C. e Reed, L. W. Effects of Amorphous Constituents on some mineralogical and chemical properties of a Panamanian Latosol. Clay and Clay Minerals, Vol. 19. p. 303-310, 1971.
16. Terzaghi, K. e Peck, R.B. Mecânica dos Solos na Prática de Engenharia. Do Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1962.
17. Harrassowitz, H. Laterite, Fortschritte der Geologie and Paleontologie, Vol. 4, p. 253-566, 1926.
18. Chorley, R.J. Weather, Earth and Man, p. 135-155, 1969.
19. Garrels, R. M. Mineral Equilibria. Harper e Bro., New York, 1960.

20. Knill, J.L. e Best, R. Mineralogical, chemical and geochemical studies of core materials in the Kainji and Shek Pik Dams. 1<sup>st</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology, Paris França, 1970.
21. Haldane, A. D., Carter, E. K. e Burton, G.M. The relationship of pyrite oxidation in rock-fill to highly acid water at Corin Dam, A.C.T., Austrália, 1<sup>st</sup> International Congress of International Association of Engineering Geology, Paris França, 1970.
22. Borba, G.R. Propriedades de Resistência de um Solo Vermelho do Estado da Paraíba. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. 1976 - Inédito.
23. British Standards Institution, Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes: BS 1377:1967. The Institutions London.1967.
24. Marinho, R.L. Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaios de Classificação de Solos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. 1976. Inédito.
25. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Métodos de Ensaio Divisão de Pesquisas Tecnológicas, DNER, 1964.
26. Cabrera, J.G. The effects of vacuum saturation on the Strength Behaviour of fine grained soils. Presented to Geotechnique. 1975.
27. Engineering Laboratory Equipment, A comprehensive catalogue of materials testing and site investigation equipment, England, 1972.
28. Bishop, A. W. e Henkel, D. J. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold, London, 1972.

29. Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, 1943.
30. Ferro, J.G.O. A Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. 1976. Inédito.
31. Bezerra, R.L. A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento e Aditivos. Tese M.Sc. Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb. 1976. Inédito.
32. De Graft Jonhson, J.W.S. e Bhatia, H.S. Engineering characteristics of laterite soils (General Report) Proc. Sp. Sess. Eng. Props. Lateritic Soils Int. Conf.S.M.F.E. 7<sup>th</sup>, México, 1970.
33. Scott, R.F. Principles of Soil Mechanics. Addison-Wesley Publishing Company. Massachausetts. 1963.

A G R A D E C I M E N T O S

O Autor agradece ao Professor J.G. CABRERA, Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Leeds, e Professor de Engenharia Civil do Conselho Britânico no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, a cuja orientação e estímulo deve a realização deste trabalho.

Aos Professores HEBER CARLOS FERREIRA e FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio e incentivo dado ao Autor, durante o desenvolvimento deste trabalho.

À ATECEL, CNPq e BNDE, pelo apoio financeiro dado à realização desta pesquisa.

Aos Laboratoristas de Solos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pela ajuda na realização de alguns ensaios.

Finalmente aos Funcionários H. H. SOBREIRA DE ALMEIDA e J.B. DE SOUZA, pelo serviço de datilografia, e W. RAMOS pela confecção dos desenhos.

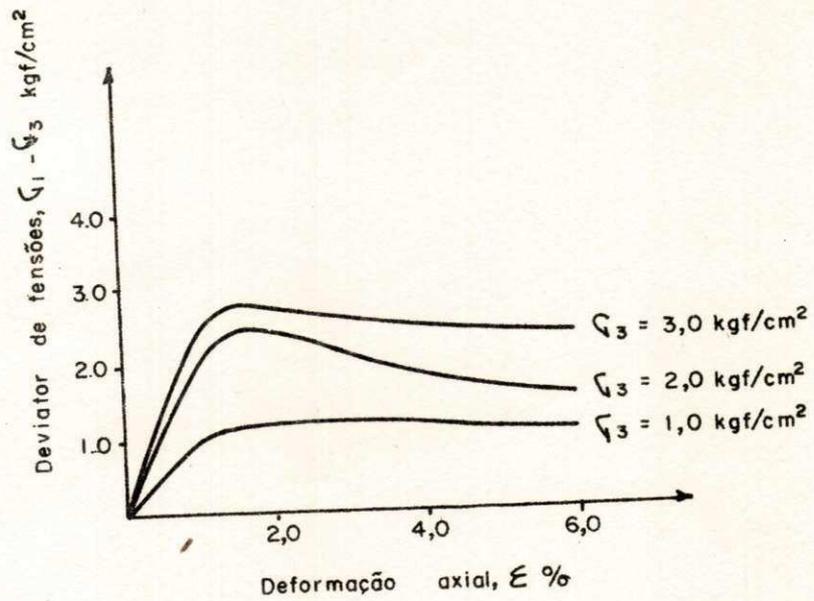
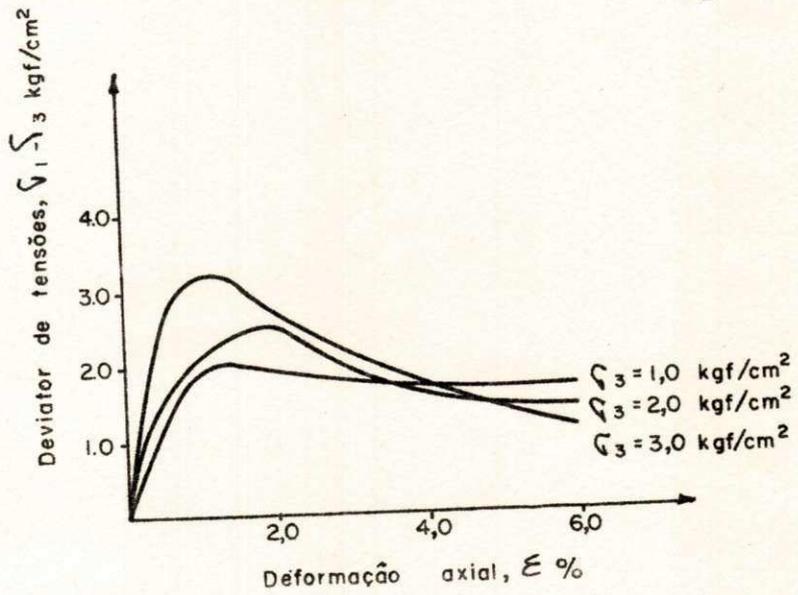
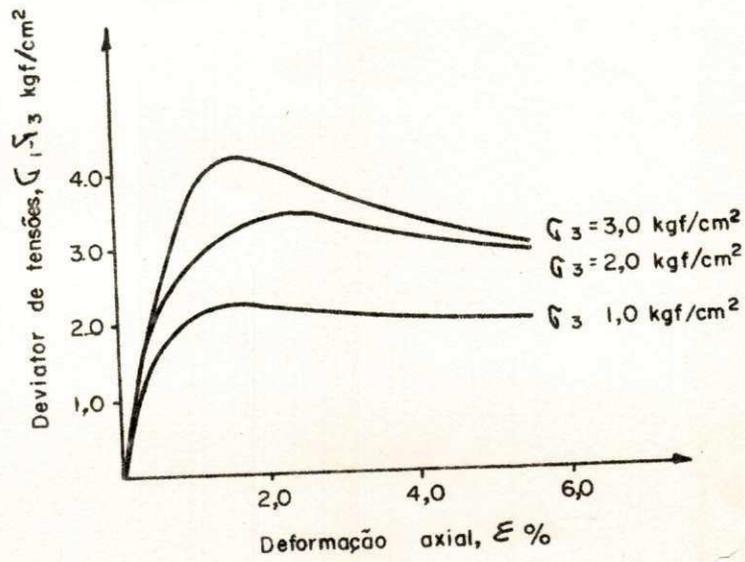
ALGUNS GRÁFICOS

APÊNDICE A

Figura A.1a Curvas tensão-deformação para 3 diferentes ensaios triaxiais, mostrando que o deviator apresenta um máximo abaixo de 3% de deformação. Água de percolação 7,3. Série  $S_1$ .

Figura A.1b Curvas tensão-deformação para 3 diferentes ensaios triaxiais, mostrando que o deviator apresenta um máximo abaixo de 3% de deformação. Água de percolação 3,25. Série  $S_1$ .

Figura A.1c Curvas tensão-deformação para 3 diferentes ensaios triaxiais, mostrando que o deviator apresenta um máximo abaixo de 3% de deformação. Água de percolação 12,4. Série  $S_1$ .



TABELAS DE RESULTADOS NUMÉRICOS  
OBTIDOS NOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

APÊNDICE B

Dias \ Horas	Horas							
	0/12	12/24	24/36	36/48	48/60	60/72	72/84	84/96
1	22,53	9,94						
1	21,90	4,75						
1	14,50	5,31						
1	25,26	8,56						
1	14,42	2,69						
1	8,97	5,42						
2	2,20	1,27	1,08	0,82				
2	1,38	1,08	1,08	0,97				
2	4,41	2,80	2,09	1,79				
2	24,70	9,42	7,32	3,66				
2	6,58	4,04	3,33	1,72				
2	29,11	13,67	11,21	7,62				
3	6,80	2,09	1,61	1,27	1,12	1,05		
3	5,16	1,79	1,20	0,86	0,75	0,67		
3	4,00	2,24	1,08	1,05	0,60	0,60		
3	10,28	2,91	2,47	2,24	2,24	1,94		
3	10,16	4,71	3,66	2,99	2,99	2,65		
3	7,10	2,54	1,79	1,42	0,82	0,82		
4	5,61	4,19	2,99	2,32	1,49	0,90	0,67	0,60
4	3,74	2,32	1,98	1,38	1,27	1,05	0,97	0,82
4	1,79	1,42	1,42	1,20	1,12	0,97	0,90	0,82
4	12,74	9,34	7,47	4,19	2,95	1,64	1,35	1,05
4	5,23	4,11	3,48	2,80	2,09	1,35	1,12	0,97
4	15,84	7,85	7,47	4,30	2,88	1,49	1,46	0,97
Média	11,017	4,769	3,485	2,387	1,693	1,261	1,078	0,872
Desv. P.	8,276	3,339	2,919	1,722	0,897	0,594	0,294	0,161
Coeficiente de Variação	34,48	13,91	16,22	9,57	7,48	4,58	4,90	2,68

Tabela B.1 - Valores de coeficientes de permeabilidade em  $10^{-6}$  cm/seg, para água com pH 3,25.

horas Dias	0/12	12/24	24/36	36/48	48/60	60/72	72/84	84/96
1	3,96	0,82						
1	2,58	0,64						
1	3,05	1,72						
1	8,11	1,01						
1	4,26	0,97						
1	6,35	5,61						
2	3,91	1,64	1,35	0,71				
2	4,50	2,34	2,02	1,55				
2	6,17	0,95	0,86	0,52				
2	2,39	1,23	1,21	0,56				
2	2,63	1,98	1,74	0,95				
2	3,72	1,64	1,63	1,05				
3	2,67	0,90	0,78	0,39	0,39	0,36		
3	6,02	3,49	2,49	1,35	1,16	0,77		
3	5,29	1,98	1,46	1,08	0,84	0,41		
3	10,30	5,59	3,87	2,20	1,66	1,12		
3	4,35	1,94	1,87	1,31	1,42	0,80		
3	3,25	2,34	1,70	1,08	1,05	0,67		
4	2,73	1,27	1,25	0,75	0,85	0,64	0,64	0,64
4	2,49	1,12	0,82	0,60	0,56	0,49	0,49	0,37
4	3,74	1,66	1,60	1,10	0,95	0,86	0,78	0,75
4	3,76	1,53	1,31	1,12	0,93	0,67	0,67	0,65
4	5,08	1,51	1,27	1,05	0,82	0,56	0,49	0,43
4	7,18	1,49	1,23	1,05	0,82	0,75	0,75	0,67
Média	4,520	1,890	1,581	1,023	0,954	0,675	0,637	0,585
Desv. P.	1,996	1,298	0,716	0,425	0,344	0,207	0,122	0,151
Coefficiente de Variação	8,23	5,41	3,98	2,36	2,87	1,73	2,03	2,52

Tabela B.2 Valores de coeficiente de permeabilidade em  $10^{-6}$  cm/seg, para água com pH 7,3.

Horas Dias	0/12	12/24	24/36	38/48	48/60	60/72	72/84	84/96
1	3,36	3,35						
1	2,80	2,06						
1	2,99	2,43						
1	5,98	4,11						
1	6,17	4,86						
1	3,92	3,55						
2	4,86	3,74	3,18	2,80				
2	4,67	3,55	3,18	3,18				
2	5,23	4,30	3,36	3,18				
2	5,61	4,48	3,74	3,55				
2	6,35	5,79	5,23	4,48				
2	3,74	1,17	2,43	2,43				
3	8,97	5,61	4,48	4,48	3,36	2,43		
3	5,98	4,86	4,48	3,74	3,36	3,18		
3	5,23	4,48	4,30	3,36	2,99	1,87		
3	8,22	3,74	2,24	2,24	1,87	1,49		
3	6,73	5,61	4,48	3,92	2,99	2,80		
3	6,35	5,42	4,86	4,30	3,55	2,99		
4	6,73	4,86	3,74	3,18	2,62	2,43	2,06	1,49
4	5,61	5,04	4,48	2,62	2,62	2,24	1,87	1,87
4	3,74	2,99	2,62	2,43	2,24	1,87	1,69	1,49
4	5,98	5,23	3,74	3,18	2,62	2,43	1,87	1,49
4	7,10	4,86	3,92	3,36	2,80	1,87	1,68	1,49
4	7,47	5,98	5,42	3,74	3,18	2,24	2,06	1,87
Média	5,575	4,253	3,882	3,343	2,850	2,320	1,872	1,617
Desv. P.	1,606	1,235	0,923	0,684	0,490	0,501	0,164	0,192
Coefficiente de Variação	6,69	5,15	5,13	3,80	4,08	4,18	2,73	3,20

Tabela B.3 Valores de coeficientes de permeabilidade em  $10^{-7}$  cm/seg, para água com pH 12,4.

TABELAS DE RESULTADOS NUMÉRICOS  
OBTIDOS NOS ENSAIOS TRIAXIAIS  
CONSOLIDADOS NÃO DRENADOS

APÊNDICE C

		Percolação 1 dia		Percolação 2 dias		Percolação 3 dias		Percolação 4 dias	
pH	Série	C' Kgf/cm <sup>2</sup>	φ' Graus						
3,25	S <sub>1</sub>	0,665	13,7	0,361	24,0	0,284	26,3	0,305	22,9
	S <sub>2</sub>	0,746	17,0	0,409	25,8	0,335	26,2	0,362	22,5
7,3	S <sub>1</sub>	0,506	21,1	0,417	22,6	0,410	21,7	0,604	17,5
	S <sub>2</sub>	0,677	15,3	0,479	19,8	0,592	19,0	0,618	17,0
12,4	S <sub>1</sub>	0,418	17,5	0,233	21,5	0,126	21,6	0,273	16,4
	S <sub>2</sub>	0,619	15,1	0,281	21,2	0,314	23,0	0,421	14,7

Tabela C.1 Ensaio triaxial consolidado não drenado. Parâmetros em termos de tensões efetivas.

		Percolação 1 dia		Percolação e dias		Percolação 3 dias		Percolação 4 dias	
pH	Série	$C_{cu}$ Kgf/cm <sup>2</sup>	$\phi_{cu}$ Graus						
3,25	S <sub>1</sub>	0,638	15,7	0,389	21,8	0,601	17,8	0,312	22,4
	S <sub>2</sub>	0,718	17,7	0,579	21,4	0,328	25,6	0,386	21,9
7,3	S <sub>1</sub>	0,436	22,3	0,366	23,5	0,410	21,5	0,561	18,8
	S <sub>2</sub>	0,643	16,8	0,484	19,9	0,576	20,1	0,580	18,3
	S <sub>1</sub>	0,413	18,2	0,242	21,2	0,117	21,9	0,315	16,0
	S <sub>2</sub>	0,588	16,5	0,426	13,9	0,341	21,9	0,417	16,1

Tabela C.2 Ensaio triaxial consolidado não drenado. Parâmetros em termos de tensões totais.