

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDOS SOBRE A REATIVIDADE À CAL DE SOLOS LATERÍTICOS, VISANDO
DO SUA ESTABILIZAÇÃO. APLICAÇÃO A UM SOLO LATERÍTICO DE NOVA
FLORESTA, ESTADO DA PARAÍBA

CANROBERT GUIMARÃES LIMA

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO/1983

ESTUDOS SOBRE A REATIVIDADE À CAL DE SOLOS LATERÍTIOS, VISANDO
DO SUA ESTABILIZAÇÃO. APLICAÇÃO A UM SOLO LATERÍTICO DE NOVA
FLORESTA, ESTADO DA PARAÍBA.

CANROBERT GUIMARÃES LIMA

ESTUDOS SOBRE A REATIVIDADE À CAL DE SOLOS LATERÍTICOS, VISANDO SUA ESTABILIZAÇÃO. APLICAÇÃO A UM SOLO LATERÍTICO DE NOVA FLORESTA, ESTADO DA PARAÍBA.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

ORIENTADOR: HEBER CARLOS FERREIRA

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO/1983



L732e Lima, Canrobert Guimaraes
Estudos sobre a reatividade a cal de solos lateriticos,
visando sua estabilizacao: aplicacao a um solo lateritico
de Nova Floresta, Estado da Paraiba / Canrobert Guimaraes
Lima. - Campina Grande, 1983.
128 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

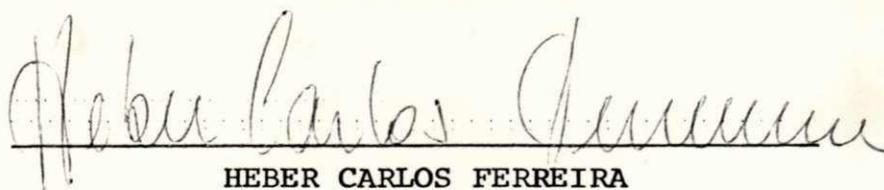
1. Solo Lateritico 2. Estabilizacao do Solo 3. Geotecnia
4. Dissertacao I. Ferreira, Heber Carlos, Dr. II.
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)

CDU 585(043)

ESTUDOS SOBRE A REATIVIDADE À CAL DE SOLOS LATERÍTICOS, VISAN
DO SUA ESTABILIZAÇÃO. APLICAÇÃO A UM SOLO LATERÍTICO DE NOVA
FLORESTA, ESTADO DA PARAÍBA.

CANROBERT GUIMARÃES LIMA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 09 DE MARÇO DE 1983



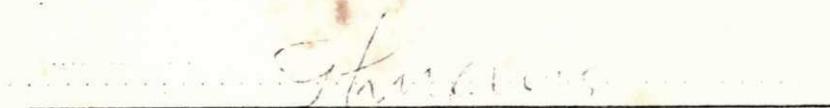
HEBER CARLOS FERREIRA

Orientador



GUNTHER E. BAUER

Examinador



FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA

Examinador

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO/198

Aos meus pais, ao meu sogro, à minha
esposa e aos meus filhos, pelo incen
tivo e apoio que me deram, tornando
possível a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a DEUS que, em sua infinita bondade, proporcionou saúde e sabedoria para a realização deste trabalho.

Ao Dr. HEBER CARLOS FERREIRA, professor Titular do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, a quem fica a dever a orientação e estímulo constantes, recebidos na elaboração desta dissertação.

À Direção do Centro de Ciências e Tecnologia, em especial ao Professor ADEMILSON MONTES FERREIRA, Chefe do Departamento de Engenharia Civil, pelo apoio oferecido para a realização desta pesquisa.

Ao Mestre FRANCISCO BARBOSA DE LUCENA, pelo incentivo e apoio constantes, sem os quais, ficaria distante a concretização deste objetivo.

Aos colegas professores da Área de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, pelo estímulo e apoio dados ao Autor durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Laboratoristas FRANCISCO BATISTA DOS SANTOS, JOSÉ NIVALDO SOBREIRA e VANILDO FERNANDES DO AMARANTE, pela dedicada colaboração na realização dos ensaios de laboratório.

Ao desenhista JOSÉ PAULO DUARTE PIRES pela execução dos desenhos que ilustram o texto.

Aos Funcionários WOLBERG GUIMARÃES LIMA e JECONIAS DANTAS COSTA, pela solicitude com que me atenderam nos serviços de datilografia.

Finalmente, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução deste objetivo.

SUMÁRIO

Esta dissertação investiga a evolução do comportamento de um solo laterítico, quando submetido à estabilização com cal, no que se refere a mudanças nas suas propriedades de engenharia (propriedades mecânicas e características de permeabilidade), com diferentes concentrações de cal e submetido a diferentes tempos de cura e de percolação d'água.

As amostras ensaiadas, foram moldadas nas concentrações de 0, 2, 4, 6 e 8 por cento de cal; submetidas a 7, 14 e 28 dias de cura e a um sistema de percolação d'água à pressão constante, por períodos de 0, 3, 7, 14 e 28 dias, após os quais eram submetidas ao ensaio de resistência ao cisalhamento triaxial, nas pressões confinantes de 1,0, 2,0 e 3,0 kgf/cm².

O processo de percolação, foi analisado quanto ao comportamento dos parâmetros de permeabilidade, para as diferentes concentrações de cal e tempos de cura, em função do tempo. Os resultados obtidos mostram, claramente, que para o solo estudado, a adição de cal nos diferentes teores, independentemente do tempo de cura, proporcionou ao sistema solo-cal, uma maior permeabilidade que a do solo em seu estado natural, em virtude do fenômeno de floculação, induzido ao solo pela cal.

A evolução do comportamento de resistência, foi analisada com base nos resultados obtidos através dos ensaios triaxiais (deviator x deformação axial). Os resultados conseguidos para o solo-cal, mostram que o teor de cal, o tempo de cura e o tempo de percolação, não tiveram uma influência evi

dente, quanto ao ganho de resistência, quando comparada com a do solo sem cal, havendo casos em que a resistência do solo-cal, para todos os teores, foi menor que a do solo puro, não existindo, portanto, nenhuma Lei de formação ou sequência lógica nos resultados obtidos de resistência ao cisalhamento triaxial, em termos de ganho ou não de resistência.

Procuramos desenvolver um estudo comparativo entre os resultados e conclusões por nós obtidos e os conseguidos por outros estudiosos do assunto, tentando agrupar e correlacionar estes resultados, em termos de avaliação da reatividade à cal, do solo laterítico em estudo, através de processos e métodos mecânicos, e aqueles com base na microestrutura do solo, analisando sua eficiência e facilidade de execução.

Uma interpretação detalhada de todos estes aspectos e fenômenos, é apresentada no presente trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (800) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

SUMMARY

This dissertation represents an investigation of the behaviour of lateritic soils stabilized with lime with reference to the changes in its engineering properties (mechanical properties and permeability characteristics) when treated with different concentrations of lime, and subjected to different curing periods and water percolation.

The samples tested were moulded with 0, 2, 4, 6 and 8% lime, cured at 7, 14 and 28 days and subjected to percolation of water at constant head for periods of 0, 3, 7, 14 and 28 days. After this treatment the samples were used in triaxial tests for shear resistance with the confining pressures of 1, 2 and 3 kgf/cm².

The percolation process was analysed in terms of permeability characteristics for different lime concentrations, different curing periods and duration of percolation. The results clearly show that for the soil studied, the addition of lime results in a higher permeability of the soil lime mixture caused by flocculation and is independent of the curing period.

The evolution of the resistance behaviour was analysed by means of the results of triaxial shear tests (deviator stress x axial deformation). The results obtained for soil lime show that the percentage of lime, curing time and duration of percolation did not have any influence on the shear resistance of the soil. Indeed there were cases where the shear strength of the soil lime mixture was lower than

that of the pure soil, however no definite trend of increase or decrease of strength could be noted.

A comparison of the results and conclusions of the present study and that of other researchers has been attempted in terms of reactivity to lime, of the lateritic soil in question utilizing mechanical processes and methods as well as those based on the micro-structure of the soil. The efficiency of the process and the ease of execution have been analysed.

A detailed interpretation of all these aspects and other phenomena are presented in this work.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS UTILIZADAS

w	- teor de umidade
W_{ot}	- teor de umidade ótima
γ_s	- peso específico aparente sêco
γ_s (máx)	- peso específico aparente sêco máximo
K	- coeficiente de permeabilidade
σ_1	- tensão axial
σ_3	- tensão de confinamento
$(\sigma_1 - \sigma_3)$	- deviator
σ_n	- tensão normal
σ_3'	- tensão efetiva
σ_1'	- tensão efetiva
τ	- tensão de cisalhamento
u	- pressão neutra
C	- coesão
ϕ	- ângulo de atrito
C'	- coesão efetiva
ϕ'	- ângulo de atrito efetivo
ϵ	- deformação axial
μ	- micron (1×10^{-3} mm)
pH	- logarítimo decimal do inverso da atividade dos íons hidrogênio numa solução
LL	- limite de liquidez
LP	- limite de plasticidade
IP	- índice de plasticidade
CBR	- Califórnia Bearing Ratio
RCS	- Resistência a Compressão Simples

LR - lime reactivity
RT - reatividade de Thompson
Ai - índice de atividade pozolânica
CTC - capacidade de troca de cátion
DCTC - diferença de capacidade de troca de cátions
BS - British Standard Institution
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
USAID - United States Agency for International Development
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
HBR - Highway Research Board

Í N D I C E

		Página
CAPÍTULO I	INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	OBJETIVO DA PESQUISA	03
CAPÍTULO III	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
	3.1 - INTRODUÇÃO	04
	3.2 - SOLOS LATERÍTICOS - DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO	04
	3.3 - MECANISMO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL	08
	3.3.1 - Introdução	08
	3.3.2 - Reação de Troca de Cátion e Floculação	09
	3.3.3 - Reação de Carbonatação	10
	3.3.4 - Reação Pozolânica	10
	3.4 - INFLUÊNCIA DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS	11
	3.5 - ESTUDOS ESPECÍFICOS SOBRE O SOLO ES TUDADO	15
CAPÍTULO IV	MATERIAIS	25
	4.1 - INTRODUÇÃO	25
	4.2 - SOLO LATERÍTICO	25
	4.2.1 - Localização e Coleta	25
	4.3 - CAL	27
	4.4 - ÁGUA	28
CAPÍTULO V	MÉTODOS	37

	Página
5.1 - INTRODUÇÃO	37
5.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	37
5.2.1 - Introdução	37
5.2.2 - Granulometria	38
5.2.3 - Limites de Atterbert	39
5.2.4 - Densidade Real	40
5.2.5 - Classificação do Solo em <u>Es</u> <u>tudo</u>	40
5.3 - ENSAIOS TECNOLÓGICOS	40
5.3.1 - Introdução	40
5.3.2 - Compactação	40
5.3.3 - Preparação das Amostras <u>pa</u> <u>ra os Ensaios de Permeabili</u> <u>dade e Triaxial</u>	42
5.3.3.1 - Introdução	42
5.3.3.2 - Mistura	42
5.3.3.3 - Moldagens	43
5.3.3.4 - Compactação	44
5.3.3.5 - Cura	46
5.3.3.6 - Saturação	46
5.3.4 - Ensaios de Permeabilidade .	47
5.3.5 - Ensaios de Cisalhamento <u>Tri</u> <u>axial Consolidado não Drena</u> <u>do</u>	49
CAPÍTULO VI RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
6.1 - INTRODUÇÃO	58

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Vimos contribuir, com este trabalho, no prossequimento dos estudos que tentam dissipar as dúvidas existentes e a primorar os conhecimentos já obtidos sobre a utilização de material laterítico nas obras de engenharia de grande, médio e pequeno porte, tendo em vista considerarmos a utilização deste material, quase que obrigatória, face à sua franca ocorrência e aos elevados custos com transporte de material para estas obras, custos estes que tendem a crescer dia a dia, frente ao sistema econômico vigente.

Embora existindo em grande quantidade e já tendo sido empregado inúmeras vezes nestas obras, este solo, quando utilizado como se encontra ao natural, tem trazido uma série de problemas, tendo em vista o comportamento instável que o mesmo tem apresentado. Com a finalidade de melhorar as propriedades deste solo e torná-lo mais estável, inúmeros processos de estabilização têm sido utilizados.

Para modificar as propriedades do solo laterítico, tentando torná-lo melhor enquadrado com as boas características desejadas na engenharia, escolhemos aditivá-lo com cal, tendo em vista, basicamente, o aspecto de que nas regiões em que o solo laterítico se encontra presente, verifica-se associado, ocorrências de calcáreo, matéria prima na fabricação de cal.

Ferro (1976), Queiroz de Carvalho (1979), Cabrera e Nwakanma (1979) e outros, desenvolveram trabalhos utilizando a

cal como aditivo, tornando-se deste modo, ser possível traçar um quadro comparativo dos resultados obtidos e melhor enquadrar o estudo assim desenvolvido, em um contexto mais amplo, e finalmente, por ser a cal um aditivo amplamente utilizado e de custo relativamente baixo.

Este estudo torna-se relevante, na medida em que se dirige para a realidade da região em que o mesmo foi desenvolvido, ou seja, Nordeste do Brasil, região em que, pelas suas características geográficas, corresponde a zona de ocorrência dos materiais em estudo.

Desta forma, as propriedades e o comportamento do solo e solo estabilizado são, no presente trabalho, estudados e procurou-se relacionar através de uma análise comparativa com os resultados obtidos em outras pesquisas.

Procurou-se, desta forma, trazer uma nova contribuição na área de engenharia de solos, fazendo com que os fatores economia e segurança possam ser mais claramente utilizados, na medida em que uma contribuição em termos de melhor conhecimento dos materiais com que se trabalha, é trazida à tona.

CAPÍTULO II

OBJETIVO DA PESQUISA

Embora largamente utilizado em obras de engenharia, o solo laterítico tem seu emprego submetido a uma série de restrições, tendo em vista que suas propriedades e comportamento são ainda objetos de estudo em vários centros espalhados por todo o mundo, existindo assim, lacunas a serem preenchidas no que diz respeito a pesquisas que podem e devem se desenvolver sobre o assunto.

Dentro deste contexto, procuramos analisar o comportamento de um solo laterítico, quando submetido a estabilização com cal, no que se refere a mudanças nas suas propriedades de engenharia (propriedades mecânicas e características de permeabilidade). Procuramos, ainda, desenvolver um estudo comparativo entre os resultados por nós obtidos e os conseguidos por outros pesquisadores, tentando agrupar e correlacionar estes resultados, de maneira que pudessemos chegar a conclusões de ordem teórico-prática, sobre o comportamento do solo laterítico em estudo. Finalmente, é feita uma análise comparativa dos métodos de avaliação da reatividade à cal (mecânicos e com base na microestrutura) visando verificar sua eficiência, bem como facilidade de execução.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentamos uma revisão dos conhecimentos existentes e ao alcance para este trabalho. Esta revisão bibliográfica será desenvolvida de maneira sucinta e apresentada como se segue:

- Solos Lateríticos: Definição e Classificação;
- Mecanismos de Estabilização de Solos com cal;
- Influência da cal na Estabilização de solos lateríticos;
- Estudos específicos sobre o solo estudado.

3.2 - SOLOS LATERÍTICOS - DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Os solos lateríticos são, essencialmente, produtos do intemperismo tropical ou sub-tropical. A composição química e as características morfológicas desses produtos sofrem grande influência do grau de intemperismo a que é submetida a rocha mãe.

O termo laterita foi, pela primeira vez, empregado por Buchanan, em 1807, para descrever um material pétreo, de aspecto ferruginoso e cor avermelhada, encontrado em Malabar, Sul da Índia. O material podia ser cortado facilmente, em blocos, com um instrumento de aço, logo após sua extração da ja

zida e apresentava a especial característica de endurecer, em exposição ao ar. Estes blocos endurecidos eram utilizados localmente como tijolos, daí a denominação "laterita", originária da palavra latina "later" que significa tijolo, Ferreira (1963).

O termo laterita passou a assumir significados diferentes e por vezes conflitantes, visto que os cientistas estudiosos do assunto, se preocupavam em conferir ao termo, significados diversos, cada um dentro de sua especialização, Ferreira (1963). Várias definições têm sido propostas; no entanto, ainda não existe uma definição universalmente aceita da laterita.

Históricamente, o primeiro a introduzir o conceito químico, estabelecendo a natureza ferrosa e aluminosa dos solos lateríticos, foi provavelmente Mallet, em 1883; mas quem procurou defini-los através da relação molecular sílica/alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), foram Martin e Doyne (1930).

Esses autores estabeleceram que as relações sílica/alumina abaixo de 1,33, indicavam verdadeiras lateritas; aquelas situadas entre 1,33 e 2,00, solos lateríticos; e, as maiores que 2,00, solos tropicais não lateríticos.

Winterkorn e Chandrasekharan (1951), apresentam uma classificação para solos lateríticos, com base na relação sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) da fração tamanho argila, utilizando a mesma classificação de Martin e Doyne.

No Brasil, a definição aceita para os solos vermelhos produzidos pelo processo de laterização, é proposta pelo

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER - 1971), baseada, substancialmente, na relação sílica/ sesquióxidos, originalmente proposta por Winterkorn e Chandrasekharam em 1951, como segue: "Solos Lateríticos são aqueles cuja fração coloidal apresentam uma relação sílica/sesquióxidos menor que 2,0 e, em conjunto, as seguintes características: apreciável presença de sesquióxidos de ferro, tendência ao concrecionamento e endurecimento, quando expostos ao ar, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica".

Os sistemas de classificação de solos lateríticos são muitos e geralmente são orientados para atender um propósito particular. Assim, geólogos, pedólogos e cientistas de solos utilizam sistemas de classificação que servem aos seus propósitos. Contudo, para o engenheiro civil, uma classificação só será de utilidade, quando esta permitir agrupar os solos lateríticos em classes que exibam propriedades de engenharia similares.

Em virtude da grande variedade dos solos lateríticos, não se conseguiu, até o presente, o desenvolvimento de um critério satisfatório que permita esta classificação, de modo que o enfoque atual é baseado em critérios estatísticos.

Uma classificação de solos lateríticos que, no momento, parece ser de maior utilidade no campo da engenharia, é a que foi apresentada pela United States Agency for International Development (USAID - 1971), em seu estudo sobre propriedades dos solos da África. Esta classificação utiliza uma simplificação e tenta correlações estatísticas de propriedades de engenharia em grupos de classificação de D'Hoore. Dada

a sua importância, esses grupos e suas propriedades são descritos como segue:

Solos Ferruginosos - Solos tropicais laterizados que ocorrem em regiões áridas, em áreas com pronunciada estação seca. Formam-se sobre todo tipo de rocha e apresentam uma separação marcante de óxido de ferro livre, podendo ser oriundos da lixiviação ou precipitação dentro do perfil, em forma de manchas ou concreções. Estes solos exibem baixos limites de Atterberg, altos valores de densidade e CBR. Não ocorrem os argilos-minerais haloisita e alofano e, a gibsita também não ocorre ou é pouco comum, sendo a caulinita o argilo-mineral predominante.

Solos Ferralíticos - Solos tropicais laterizados que ocorrem em regiões úmidas e em áreas com vegetação densa. Estes solos são também formados sobre todos os tipos de rocha, sendo relativamente comum a presença de couraças ferruginosas, sem no entanto, apresentarem a mesma dureza e durabilidade daqueles de regiões ferruginosas, devido a não terem sofrido uma completa desidratação, normalmente impedida pela densa cobertura vegetal. A gibsita ocorre frequentemente e outras formas de alumina e ferro hidratados também ocorrem, sendo a haloisita bastante comum em rochas vulcânicas. Estes solos apresentam uma plasticidade mais alta e valores de densidade e CBR mais baixos que os solos ferruginosos.

Ferrisolos - Solos tropicais laterizados que, como os solos de outros grupos, ocorrem em qualquer tipo de rocha,

em áreas de média e alta precipitação pluviométrica, onde a erosão tem ocorrido paralelamente com o desenvolvimento do perfil. O argilo-mineral predominante é a caulinita, podendo ocorrer a goetita. Os materiais argilosos apresentam alto grau de hidratação, resultando daí, a semelhança com os solos ferralíticos. Devido às agregações de minerais de ferro, as variações nas propriedades com a desidratação são consideradas pequenas; contudo, estas variações podem ser significativas em rochas vulcânicas, quando a haloisita é um dos seus constituintes. Estes solos, como os solos ferralíticos, apresentam mais alta plasticidade e mais baixos valores de densidade e CBR que os solos ferruginosos

3.3 - MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

3.3.1 - Introdução

Quando adicionamos cal a um solo argiloso em presença de água, ocorrem reações químicas diversas, no instante da mistura, cujo tipo e origem têm dado espaço para discussões, face à dificuldade de identificação. Algumas dessas reações já foram detectadas e analisadas (Herrin e Mitchel - 1968), sendo aceitos, geralmente, como mais importantes, os três tipos de reações, como segue:

- Reação de troca de cátion e floculação;
- Reação de carbonatação;
- Reação pozolânica.

A importância e exato efeito de cada um destes três

tipos de reações ainda dá margem a debates e discussões. A maioria dos estudiosos do assunto acredita que as três reações acima citadas têm acentuada influência no mecanismo de estabilização dos solos argilosos com cal. Diamond e Kinter (1965), embora reconheçam que as duas primeiras reações possam ocorrer, preconizam que, em última análise, apenas a reação pozolânica é responsável pela estabilização dos solos.

3.3.2 - Reação de Troca de Cátion e Floculação

Ao entrar em contato com o sistema solo-água, a cal se ioniza e íons de cálcio são liberados. Segundo Ferro (1976), quando a cal é adicionada, a primeira reação que provavelmente ocorre, é a reação de troca de cátions, com os íons de cálcio substituindo os íons metálicos trocáveis na superfície do argilo mineral. Associada a esta reação de troca de cátions, acredita-se haver aglomeração dos cátions de cálcio adicionais da cal ao redor das partículas do argilo mineral, Davidson e Hilt (1960).

Tem sido observado que a adição da cal ao solo provoca modificações em suas características de plasticidade, contração e inchamento, Davidson e Hilt (1960), Shen e Li (1970). Estas modificações conferem ao solo a aparência de mais seco e friável, apresentando também um aumento do teor de umidade ótimo para o peso específico aparente seco máximo a um dado esforço de compactação. Estas mudanças imediatas são algumas vezes atribuídas aos efeitos de floculação que resulta da reação de troca de cátion, Davidson (1960).

3.3.3 - Reação de Carbonatação

O dióxido de carbono presente na atmosfera reage com a cal, formando carbonato de cálcio ou magnésio, dependendo do tipo da cal utilizada, sendo assim outro tipo de reação que ocorre nas misturas de solo-cal. O processo de carbonatação é considerado um fraco agente cimentício, o qual é prejudicial ao ganho final de resistência, tendo portanto, a cal utilizada nesta reação, melhor aproveitamento na reação pozolânica, Ferro (1976).

3.3.4 - Reação Pozolânica

Nesta reação existem formações de gels cimentícios, através de um processo lento e contínuo, sob condições alcalinas propícias, entre o cálcio e a sílica e alumina presentes na estrutura básica do argilo-mineral, conferindo à mistura solo-cal, um considerável aumento na sua resistência, Ferro (1976).

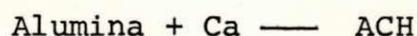
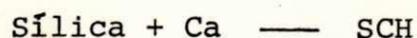
As propriedades, a natureza e o mecanismo de formação dos gels cimentícios pela reação pozolânica, ainda são bastante discutidos. Diamond e Kinter (1965) e outros, concordam que os gels cimentícios formados, com o tempo, nas misturas solo-cal, são essencialmente silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (SCH, ACH).

Como se sabe, a cal se ioniza ao entrar em contato com o sistema solo-água, sendo que nesta etapa, os íons cálcio reagem, como citado acima, com a sílica e alumina, enquan

to que os íons oxidrilas proporcionam ao sistema, as condições alcalinas necessárias para que estas reações ocorram, Ferro (1976).

O processo geral para formação dos gels cimentícios é o seguinte, (Ormsby, 1973):

Na presença da água - $\text{Ca(OH)}_2 \text{ — Ca}^{++} + 2(\text{OH})^-$. O íon oxidrila $(\text{OH})^-$ oferece ao sistema maior pH, resultando assim as reações da sílica e alumina com o cálcio liberado pelo hidróxido de cálcio.



A este processo vários estudiosos tem atribuído o ganho de resistência a longo prazo dos solos estabilizados com cal. Devido a variações estruturais distintas que ocorrem no argilo-mineral, de maneira irreversível, o sistema torna-se também altamente resistente à ação da água, Daniels, (1971).

3.4 - INFLUÊNCIA DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTIÇOS

Os solos lateríticos estabilizados com cal têm sido amplamente estudados e utilizados, principalmente nos países africanos, tendo apresentado bons resultados. Townsend, Manke e Parcher (1971), chegam a afirmar que a cal é efetivo agente estabilizante para solos lateríticos.

Apresentamos a seguir alguns aspectos da influência da Cal, sobre algumas das propriedades de engenharia dos solos lateríticos, tais como limites de Atterberg, características de compactação e resistência.

Em muitas pesquisas realizadas sobre o assunto, (Cartmell e Bergh, 1969, Kassiff, 1962, Schofield, 1962, USAID, 1971) o índice de plasticidade do solo teve comportamento se melhante ao da maioria dos solos argilosos estabilizados com cal, ou seja, houve uma diminuição deste índice. O tempo de cura em uma das pesquisas realizadas (USAID, 1971), não teve grande influência sobre o comportamento do índice de plasticidade, nem sobre o limite de liquidez, visto que, amostras en saídas a 7 e 28 dias de cura, não apresentaram diferenças apreciáveis nestes parâmetros. Contudo, Hayter e Cairns (1966), em pesquisa realizada na Nigéria Oriental, apresentaram um com portamento pouco comum ao limite de plasticidade de solos es tabilizados com cal. Amostras foram ensaiadas imediatamente após a mistura do solo com a cal e após 72 horas e, em ambos os casos, houve a esperada diminuição do índice de plasticidade; entretanto, tal diminuição, principalmente no ensaio realizado logo após a mistura, foi devida à acentuada diminuição do limite de liquidez, visto que o limite de plasticidade pouco se alterou e, ao contrário, mostrou uma certa tendência a diminuir, Ferro, (1976).

Tem sido mostrado (Cartmell e Bergh, 1969, Hayter e Cairns, 1966) que o comportamento da relação peso específico aparente seco versus teor de umidade de solos lateríticos es tabilizados com cal, não apresenta singularidades com relação àqueles de outras misturas solo-cal, isto é, há em geral um aumento do teor de umidade ótima e uma diminuição no correspondente peso específico aparente seco, à medida que o teor de cal na mistura solo-cal aumenta. Contudo, em um caso,

Cartmell e Bergh (1969), observaram que o teor ótimo de umidade para o máximo peso específico aparente seco, para a mistura solo-cal com 6% de cal, foi menor que para a mistura solo-cal com um teor de 5%.

A revisão bibliográfica realizada mostra que as informações sobre a influência da cal na resistência de solos lateríticos estabilizados são inconsistentes. Alguns estudos apresentam resultados animadores enquanto que outros, eliminam completamente a possibilidade de benefícios em termos de incrementos de resistência. Winterkorn (1951), informa completo fracasso usando inclusive altas porcentagens de cal (8% e 18%) enquanto que Biszewski (1963), indica resultados satisfatórios de incrementos de resistência medida pelos ensaios de CBR e compressão simples, sem contudo deixar de enfatizar, o fato de que a compactação da mistura solo laterítico-cal, não deveria demorar mais de 24 horas após a mistura.

Alguns pesquisadores (Cartmell e Bergh, 1969, Hayter e Cairns, 1966 e Kassiff, 1962) em pesquisas realizadas em laboratório utilizando ensaios de CBR e compressão simples, têm mostrado que há substancial aumento na resistência de solos lateríticos estabilizados com cal e que este ganho de resistência destes solos estabilizados depende também do teor de cal e do tempo de cura. Um estudo comparativo do ganho de resistência de amostras de solos lateríticos estabilizados com cal e cimento, realizado por Hayter e Cairns (1966), com igual porcentagem de aditivo a 6 e 21 dias de cura com 1 e 7 dias de imersão respectivamente, verificaram que, a 7 dias (6 de cura e 1 de imersão em água), a resistência da mistura solo-

cal foi inferior à da mistura solo-cimento, enquanto que, a 28 dias (21 de cura e 7 de imersão em água), a resistência da mistura solo-cal foi maior ou no mínimo igual à da mistura solo-cimento.

As curvas de resistência (CBR ou compressão simples) versus teor de cal, apresentam resultados que evidenciam a influência do teor de cal. Em todos os casos, até um certo ponto, houve um aumento de resistência com o aumento do teor de cal. A partir deste ponto, incrementos posteriores de cal levam a muito pouca ou nenhuma melhora, tendo sido verificado, pelo contrário, um decréscimo de resistência, Cartmell e Bergh (1969).

Alguns pesquisadores têm encontrado o teor ótimo de cal para a resistência máxima, entre 3% e 4% (Cartmell e Bergh, 1969, Hayter e Cairns 1966). No entanto Harty e Thompson (1973) indicam que a quantidade de cal para obter a máxima resistência nos solos lateríticos é geralmente maior do que a quantidade de cal para solos de clima temperados.

Harty e Thompson (1973) procuraram determinar os fatores que influenciam a reatividade da cal com solos tropicais e sub-tropicais, a exemplo do que foi feito por Thompson (1966) para os solos de zonas temperadas. Utilizaram o termo "oxisolos" para definir aqueles solos que foram submetidos a avançados processos de laterização. Thompson (1966) define reatividade da cal como sendo o aumento da resistência à compressão simples de solos tratados com cal depois de 28 dias de cura a 22,8°C (73°F) com o teor ótimo de cal para a máxima resistência, comparada com a resistência à compressão simples

do solo, em seu estado natural. Nenhuma correlação significativa foi encontrada entre a reatividade da cal com os "oxissolos" e propriedades destes solos tais como: pH, capacidade de troca de cátions, etc. Entretanto, significativas correlações foram encontradas entre a reatividade da cal e a concentração dos constituintes básicos destes solos, medidas pelas relações sílica/sesquióxidos ($r = -0,782$) e sílica/alumina ($r = -0,750$). Isto sugere que, quanto menor for a relação sílica/sesquióxidos, maior será o ganho de resistência destes solos a 28 dias de cura, a $22,8^{\circ}\text{C}$ (73°F) de temperatura, com o teor ótimo de cal para a máxima resistência. Esta sugestão parece contradizer o que propuzeram Townsend, Manke e Parcher (1971) ao afirmarem que: "a presença dos sesquióxidos cobrindo a superfície da argila (presente nos solos lateríticos) inibe as reações entre o cálcio e a argila (sílica)".

Do que foi visto, pode-se observar que a influência exercida pela cal sobre muitas das propriedades dos solos lateríticos não se verifica da mesma maneira que sobre os solos de zonas temperadas.

3.5 - ESTUDOS ESPECÍFICOS SOBRE O SOLO ESTUDADO

O solo selecionado para a realização do presente trabalho foi o da jazida de Nova Floresta, cujas características são apresentadas no capítulo referente a materiais, tendo em vista a existência de alguns trabalhos já realizados e/ou em andamento por pesquisadores, sobre este mesmo solo laterítico.

Atualmente, são conhecidos alguns resultados obtidos em pesquisas realizadas com este solo de Nova Floresta, por estudiosos como: Ferro, Queiroz de Carvalho e Cabrera e Nwakanma, relativos a parâmetros de resistência, reatividade à cal, índice de atividade pozolânica e outros, não havendo contudo, um consenso entre os resultados obtidos por estes pesquisadores.

Ferro (1976) estudou o comportamento do solo em termos de propriedades de plasticidade e resistência CBR para teores de 2% e 5% de cal, sendo as amostras, ensaiadas após sete dias de cura e quatro de imersão e imediatamente após a compactação.

Os resultados obtidos por Ferro (1976) em termos de aumento de resistência nas misturas solo-cal, com sete dias de cura e quatro dias de imersão para os três solos por ele estudado, apontam o solo de Nova Floresta como aquele que obteve maiores e efetivos ganhos de resistência. Ferro (1976) também propõe um parâmetro arbitrário de reatividade, baseado no parâmetro de reatividade de Thompson e para este parâmetro proposto, o solo de Nova Floresta se apresenta como o mais reativo para 5% de cal. Ferro (1976) em suas conclusões, sugere que os sistemas solo-cal por ele estudado, em termos práticos de aplicação na construção de estrutura de pavimento, poderão ser utilizados sem restrições como materiais de base para qualquer tipo de rodovia.

Queiroz de Carvalho (1979) apresenta resultados de pesquisas desenvolvidas com dezenove solos lateríticos do Nordeste do Brasil, fazendo parte destes solos, o solo da jazida

de Nova Floresta. Nessa pesquisa, Queiroz de Carvalho realizou um estudo bastante amplo, relativo às propriedades de engenharia, características de plasticidade, microestrutura do solo, parâmetro de reatividade de Thompson e outros parâmetros, de modo que através de análises de correlações simples e múltiplas, fosse possível estabelecer um critério mais amplo de classificação para os solos estudados, através do máximo informações obtidas para os solos em seu estado natural e após tratamento com cal a diferentes teores, condições de cura e umidade. Os resultados obtidos por Queiroz de Carvalho (1979) através da análise de correlações simples, revelam que não existe correlação entre a reatividade à cal e propriedades de compactação (peso específico e teor de umidade). Estes resultados mostram também que não há relação entre a reatividade à cal, com propriedades físicas do solo tais como, peso específico, umidade higroscópica, limite de Atterbert, atividade coloidal, pH e fração tamanho argila. Por outro lado Queiroz de Carvalho (1979) cita uma correlação bastante significativa entre a reatividade à cal e a diferença de capacidade de troca de cátion (DCTC), definida como a diferença entre a capacidade de troca de cátion medida em pH 10 e a capacidade de troca de cátion em pH 7 ($CTC_{pH 10} - CTC_{pH 7}$). Nesse trabalho Queiroz de Carvalho (1979) apresenta uma tabela de classificação dos solos investigados de acordo com o parâmetro de reatividade à cal, de Thompson. O solo de Nova Floresta é, neste quadro, classificado como um solo de baixa reatividade com um índice LR ou RT = 490 kPa, parâmetro este obtido através da diferença entre a resistência à compressão sim

ples (RCS) do solo tratado com cal e a resistência à compressão simples (RCS) do solo, em seu estado natural, conforme já definido anteriormente.

Cabrera e Nwakanma (1979) propuseram um método para determinar a atividade pozolânica de solos vermelhos. Este método é baseado em um modelo teórico da difusão do sistema solo-cal, do qual obtem-se a constante da reação do sistema. Esta constante, multiplicada pela porcentagem da fração tamanho argila elevada a uma potência "x", foi por eles denominada de índice de atividade pozolânica.

A atividade pozolânica de um solo é definida como a habilidade de alguns dos componentes do solo reagirem com a cal, para produzir produtos cimentícios.

O índice de atividade pozolânica proposto por Cabrera e Nwakanma (1979) através do modelo teórico, foi relacionado através de correlação linear simples, ao parâmetro de reatividade de Thompson, obtidos para dezenove solos lateríticos do Nordeste do Brasil, utilizados na investigação (estes solos foram os mesmos utilizados por Queiroz de Carvalho, 1979) e apresentaram uma equação estatística altamente significativa.

Os valores do índice de atividade pozolânica obtidos para os dezenove solos estudados, variam de $0,12 \times 10^{-4}$ /dia a $4,08 \times 10^{-4}$ /dia, sendo proposto um valor mínimo de $A_i = 0,75 \times 10^{-4}$ /dia, como um limite entre solos pozolânicos e solos não pozolânicos. O solo de Nova Floresta, um dos dezenove solos investigados, apresentou um índice de atividade pozolânica igual a $0,472 \times 10^{-4}$ /dia, menor que o valor mínimo limite proposto por Cabrera e Nwakanma e portanto classificado como solo não pozol

lânico.

Por outro lado, Queiroz de Carvalho e Cabrera (1979) propõem um método simples para avaliar a reatividade à cal dos solos vermelhos tropicais. Este método consiste em determinar a capacidade de troca de cátions dos solos em meio neutro (pH = 7) e em um meio alcalino (pH = 10) e expressar a propriedade catiônica de cada solo como a diferença da capacidade de troca catiônica (DCTC) ou seja: $DCTC = CTC_{pH10} - CTC_{pH7}$. O valor da diferença da capacidade de troca de cátions é usado como indicador da reatividade à cal dos solos vermelhos tropicais. Este parâmetro proposto por Queiroz de Carvalho e Cabrera foi determinado para os mesmos dezenove solos lateríticos do Nordeste do Brasil, já utilizados por eles em outras investigações. Os valores da diferença de capacidade de troca de cátions, obtidos para os dezenove solos estudados, variam de 0,40 meq/100g a 5,05 meq/100g e foram relacionados ao parâmetro de Reatividade de Thompson e ao índice de atividade pozolânica de Cabrera e Nwakanma, através de correlação linear simples, apresentando uma correlação altamente significativa.

Baseados nos resultados obtidos, Queiroz de Carvalho e Cabrera propõem a seguinte classificação:

DCTC < 1,0 meq/100g - solos não reativos

1,0 ≤ DCTC < 1,5 meq/100g - solos reativos próprios para sub-bases e subleitos

DCTC ≥ 1,5 meq/100g - solos altamente reativos próprios para bases

O solo de Nova Floresta, um dos dezenove solos investigados, apresenta uma diferença de capacidade de troca catiônica igual a 1,08 meq/100g, enquadrado na classificação proposta, na faixa dos solos reativos e próprios para sub-bases e sub-leitos. No entanto, tendo em vista que este valor ($DCTC = 1,08 \text{ meq}/100 \text{ g}$) está muito próximo do limite inferior da faixa de classificação (1,0), poder-se-ia dizer que o solo de Nova Floresta, com base na classificação proposta, é um solo de baixa reatividade à cal.

Como foi visto, foram apresentados alguns métodos de avaliação de reatividade à cal, de solos lateríticos, baseados em parâmetros e características distintas dos solos, propostos por diferentes pesquisadores, envolvendo o solo laterítico de Nova Floresta, chegando-se no entanto a resultados e conclusões até certo ponto conflitantes.

Ferro (1976) propõe um parâmetro arbitrário de avaliação de reatividade à cal, com base em características mecânicas (resistência CBR), relacionado ao parâmetro de reatividade de Thompson. O solo de Nova Floresta dentro desta classificação proposta por Ferro é classificado como um solo de boa reatividade e indicado sem restrições como material próprio para base na construção de pavimentos. Este método contudo, é bastante deficiente, tendo em vista que o ensaio utilizado para obtenção das características de resistência do solo (resistência CBR) é um processo empírico de avaliação, realizado com o material totalmente confinado. Esta condição para a qual o solo é ensaiado à resistência CBR, é bastante irreal, comparada à situação real que o solo se encontra em seu estado na

tural no campo, fornecendo assim resultados duvidosos, embora seja este método muito utilizado como subsídio no cálculo de pavimentos, sendo esta sistemática atualmente bastante criticada.

Queiroz de Carvalho (1979) propõe uma classificação para solos lateríticos baseado no parâmetro de reatividade de Thompson. O solo de Nova Floresta é, nesta classificação, enquadrado na faixa dos solos de baixa reatividade. Uma desvantagem deste método de avaliação é que a obtenção do parâmetro de reatividade é bastante trabalhoso, para ser determinado, tendo em vista que o mesmo é obtido através da diferença entre a resistência à compressão simples (RCS) do solo estabilizado e a resistência à compressão simples do solo em seu estado natural, obtidas a máximo peso específico e umidade ótima, após um período de cura de 28 dias a 22°C. Outra desvantagem deste método, quanto à confiabilidade dos resultados, diz respeito ao processo de obtenção dos mesmos, visto que estes, são obtidos através de ensaios de resistência à compressão simples, realizados para amostras totalmente livres de confinamento, situação irreal comparada ao estado natural em que o solo se encontra na natureza.

Cabrera e Nwakanma (1979) propõem uma classificação com base em um índice de atividade pozolânica obtido através de um modelo matemático teórico de difusão no sistema solo-cal. Neste sistema, o solo laterítico de Nova Floresta é classificado como um solo não pozolânico. Este método de avaliação é desenvolvido em última análise, para a fração tamanho argila do solo, tendo em vista que um estudo preliminar reali

zado para três frações tamanhos 2mm - 0,074mm, 0,074mm - 0,002 mm e menor que 0,002mm, mostra que a fração tamanho argila é altamente mais reativa à cal. Este critério é portanto, bastante confiável tendo em vista que sua obtenção é feita através da microestrutura do solo com base em seus componentes amorfos extraídos através de uma solução 0,5 N de NaOH (Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3). Contudo, apesar da confiabilidade do método, o mesmo possui uma grande desvantagem, relativa à sua determinação, visto que o mesmo requer equipamentos sofisticados, necessários para a obtenção do elemento cálcio (Ca), fator envolvido na determinação do índice de atividade (Ai) e estes equipamentos não são comuns em laboratórios de solos ou materiais de construção.

Queiroz de Carvalho e Cabrera (1979) propõem um método de avaliação da reatividade à cal, baseado na diferença de capacidade de troca de cátions. Neste critério, o solo de Nova Floresta é classificado como um solo reativo e próprio para sub-bases e sub-leitos. Este método é desenvolvido para a fração tamanho argila do solo, após remoção dos óxidos de ferro livre. Determina-se a capacidade de troca de cátions em um pH 7 e em um pH 10, sendo o valor da diferença de capacidade de troca catiônica ($DCTC = CTC_{pH_{10}} - CTC_{pH_7}$) usado como indicador da atividade à cal. Este método é simples e de relativa facilidade de determinação.

Fica evidenciada portanto, a dificuldade da correta classificação quanto à avaliação da reatividade à cal do solo de Nova Floresta, utilizado pelo autor neste estudo. Fica também evidenciado que dos métodos apresentados, aqueles relacio

nados com características de resistências mecânicas parecem ser os menos confiáveis, tendo em vista o próprio desenvolvimento do processo (CBR - totalmente confinado, RCS - totalmente não confinado), enquanto que os demais métodos parecem ser mais confiáveis, face ao relacionamento com a microestrutura do material. Dos dois métodos desenvolvidos com base na fração tamanho argila do solo, o método da DCTC parece ser mais indicável, em virtude da sua facilidade de obtenção. Em resumo, verifica-se que os métodos descritos para avaliação da reatividade à cal, apresentam resultados conflitantes para o solo laterítico de Nova Floresta, utilizado neste trabalho, conforme se apresenta a seguir:

- Método do CBR (Ferro, 1976) - boa reatividade e próprio para bases
- Método da RCS (parâmetro de Thompson)-(Queiroz de Carvalho, 1979) - baixa reatividade
- Método do índice de atividade de pozolânica (Cabrera e Nwakanma, 1979) - não pozolânico
- Método da DCTC (Queiroz de Carvalho e Cabrera, 1979) - reativo e próprio para sub-bases e subleitos

Finalmente, observa-se que os processos de avaliação através de características mecânicas são mais fáceis de se determinar em laboratórios comuns de mecânica dos solos,

parecendo ser bastante sugestivo se estudar um método de avaliação com base no ensaio de resistência ao cisalhamento triaxial, o qual é realizado para pressões confinantes variáveis, sendo portanto muito mais representativo para a situação real em que o solo se encontra no campo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 832 Tel (83) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

CAPÍTULO IV

MATERIAIS

4.1 - INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados na realização do presente trabalho, necessários à confecção das amostras submetidas aos ensaios descritos no Capítulo V, resumiram-se, basicamente, a solo laterítico, cal e água.

4.2 - SOLO LATERÍTICO

4.2.1 - Localização e Coleta

A escolha do solo para a realização deste estudo, foi feita por existirem, na época, já alguns trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento por pesquisadores no CCT, sobre estabilização de solo laterítico com cimento, cal e/ou aditivos, podendo assim, se efetuar uma análise comparativa dos resultados obtidos.

O solo escolhido foi o da jazida de Nova Floresta, situada na Zona Fisiográfica da Borborema Oriental, à margem direita da rodovia PB-151, entre os municípios Cuité - Nova Floresta, distante aproximadamente 5,0 km da sede do município de Cuité. Apresentamos na Figura 4.1, um mapa do Estado da Paraíba, indicando a localização geográfica da jazida. As fotografias apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3, mostram res

pectivamente um corte de onde foi retirado o solo e um detalhe do material na jazida.

A área que envolve a jazida pesquisada, apresenta uma geologia correspondente ao período terciário, com o topo revestido por capeamento sedimentar, assente sobre uma superfície do cristalino, bastante aplainada e intensamente caulinizada. (Lucena - 1976).

O material foi coletado após se efetuar uma raspagem e remoção do solo exposto, desgastados pela ação dos fatores intempéricos, a uma profundidade aproximada de 1,0 m, em relação ao nível do terreno, em um talude vertical em corte, através de processo manual com uso de pás e picaretas. Depois da coleta, o material foi acondicionado em sacos de lona grossa, a fim de evitar qualquer perda de material fino, durante sua remoção para o laboratório.

Apresentamos na Tabela 4.1 as propriedades químicas e a composição mineralógica do solo estudado, enquanto que na Tabela 4.2 mostramos a composição química do mesmo.

Os dados de composição mineralógica, superfície específica, pH, teor de matéria orgânica e composição química fornecidos nas Tabelas 4.1 e 4.2, foram obtidos do trabalho de Lucena (1976). No presente trabalho, eles têm apenas valor qualitativo, já que correspondem, como se pode observar, a duas frações do mesmo material, ou sejam concreções e solo.

Lucena (1976) utilizou uma divisão arbitrária para considerar a separação entre concreção e solo, baseada no diâmetro de 3/8 pol. (9,5 mm). A fração de diâmetro menor que 2 um proveniente da desagregação mecânica das concreções e a

fração de diâmetro menor que 2 μm oriundos do solo, são, então, aquelas cujas propriedades estão apresentadas nas Tabelas. Como o solo utilizado nesta pesquisa foi obtido através da britagem das concreções em mistura com o solo, os valores fornecidos nas tabelas, não correspondem à fração de diâmetro inferior a 2 μm . A percentagem de concreções do solo estudado, não foi determinada antes da britagem; por isso, valores quantitativos para os solos britados, não podem ser apresentados.

Os resultados das propriedades físico-químicas e mineralógicas e da composição química extraídos de Lucena (1976), para o solo em estudo, permitem classificar o solo com base no sistema de classificação proposto pela USAID, como um solo Ferruginoso. Baseado no sistema de classificação oficialmente adotado no Brasil, no momento, o solo de Nova Floresta pode ser classificado como um solo laterítico.

4.3 - CAL

A cal utilizada como aditivo na pesquisa, é uma cal dolomítica, denominada comercialmente com o nome de "SOCAL", adquirida na cidade de Campina Grande, Paraíba, junto ao depósito da fábrica do mesmo nome. A cal chegou ao laboratório em sacos de papel Kraft, sendo retirada da embalagem original e acondicionada em depósitos de plástico devidamente lacrados, para evitar alterações do produto, durante o período em que seria utilizado.

Os resultados da análise química da cal, foram fornecidos pela SOCAL - Comércio e Indústria de Cal e Insetici

das Ltda, responsável pela fabricação e fornecimento da mesma e são apresentados na Tabela 4.3.

4.4 - ÁGUA

A água utilizada na execução de todos os ensaios necessários para a realização desta pesquisa, tanto para modificar a umidade do material como nos ensaios de percolação, foi destilada, para evitar a presença de substâncias que pudessem interferir nas propriedades dos materiais estudados.

FIGURAS DO CAPÍTULO IV

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

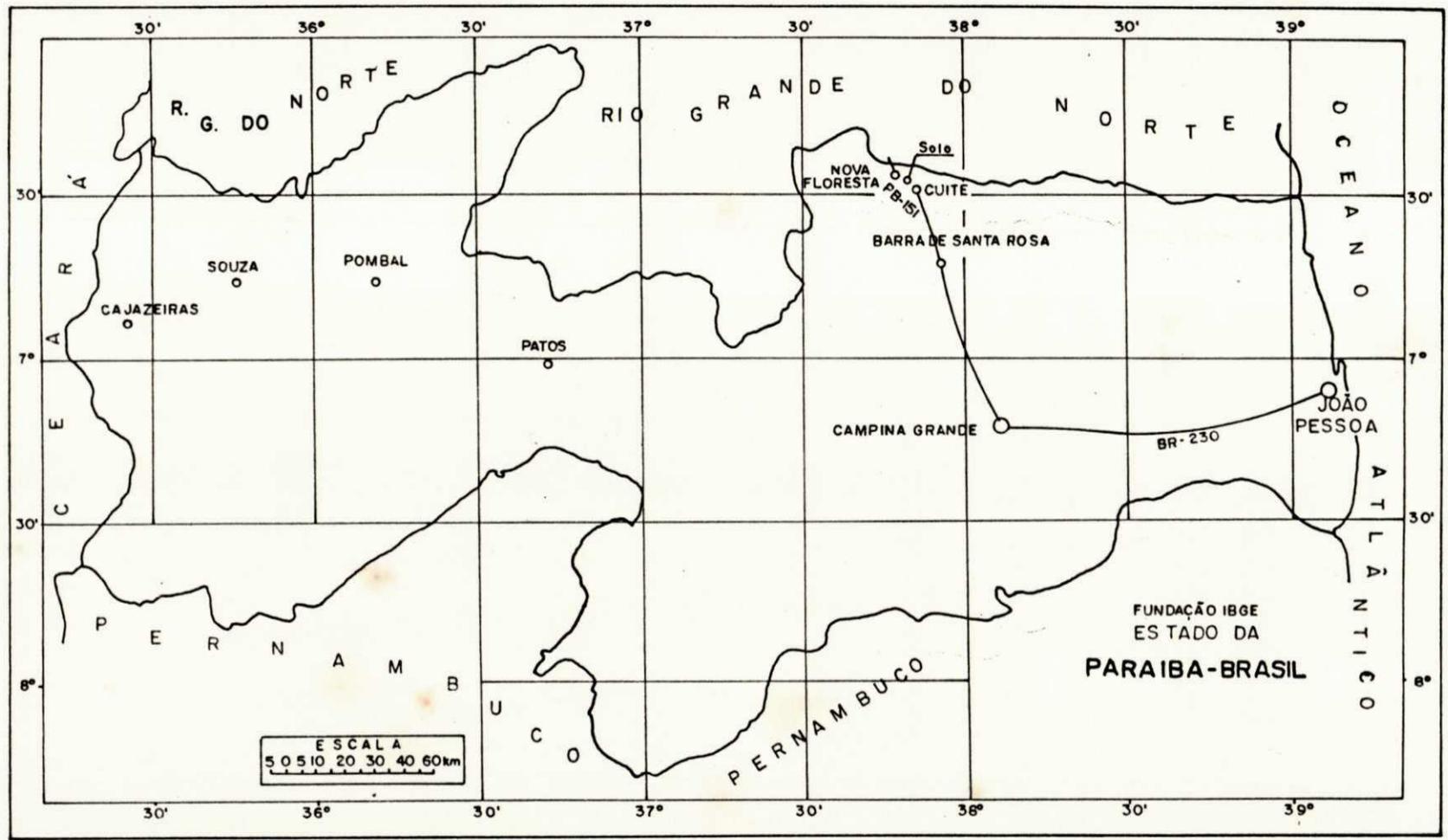


FIGURA 4.1 - MAPA DO ESTADO DA PARAIBA MOSTRANDO A LOCALIZACAO DA JAZIDA



FIGURA 4.2

VISTA DA JAZIDA DE ONDE FOI RETIRADO MATERIAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

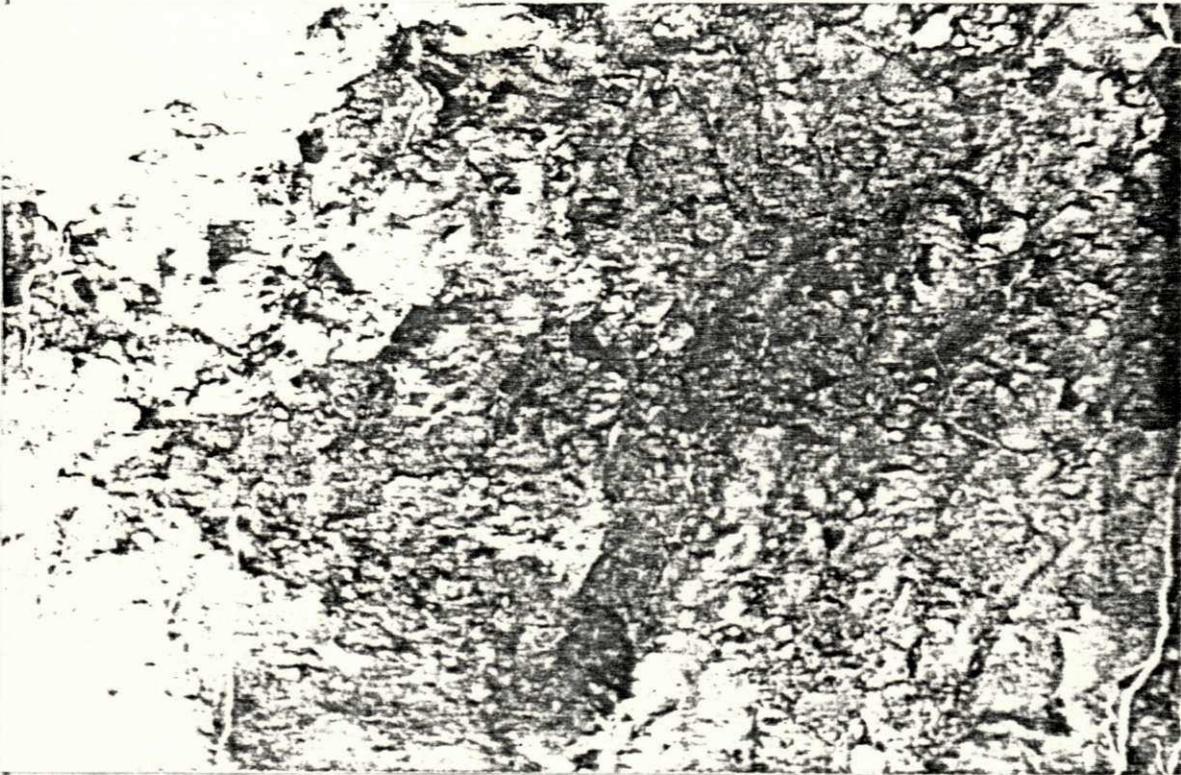


FIGURA 4.3
"CLOSE" DA JAZIDA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Especial de Pós-Graduação
Rua Aprísio Veloso, 832 - F. II (COP) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

TABELAS DO CAPÍTULO IV

PROPRIEDADES QUÍMICAS		
Teor de Matéria Orgânica (%)		0,67
pH		5,10
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (m ² /g)		
Concreções (< 2 µm)		8,33
Solo (< 2 µm)		18,19
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA		
Fração (< 0,074 mm)		
Argilo Mineral Predominante		Caulinita
Outros		Quartzo
		Goetita

TABELA 4.1 - Propriedades Químicas e Composição Mineralógica do Solo Estudado.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	SOLO (%)	CONCREÇÕES (%)
S_iO_2	28,00	22,00
Fe_2O_3	7,00	29,50
FeO	0,00	0,00
Al_2O_3	27,00	21,70
TiO_2	1,30	1,00
Ca	0,00	0,00
MgO	0,30	0,20
MnO	0,00	0,00
P_2O_5	10,00	6,00
Na_2O	4,10	2,15
K_2O	0,30	0,50
SO_3	1,50	1,00
S_r	0,00	0,00
Cu	0,00	0,00
Zn	0,00	0,00
Perda a 1.000°C	15,00	12,30

TABELA 4.2 - Composição Química das Frações menores que 2 μm , do Solo e das Concreções.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	%
Perda ao fogo (1.000°C)	25,23
Insolúveis em ácido clorídico	10,24
Sesquióxidos	0,53
Cálcio total (em C_aO)	42,55
Magnésio (em M_gO)	21,37
Cálcio disponível (em C_aO)	30,31

TABELA 4.3 - Propriedades Químicas da Cal utilizada na pesquisa.

CAPÍTULO V

MÉTODOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Tratamos, no presente capítulo, dos métodos que foram adotados nas experiências realizadas; expomos as adaptações e/ou criações na aparelhagem utilizada e mostramos a sequência das operações a que foi submetido o material estudado.

Os processos de preparação do solo no laboratório e os ensaios executados durante a pesquisa, estão mostrados diagramaticamente na Figura 5.1.

As experiências são apresentadas a seguir, na ordem natural de suas realizações.

- Ensaios de Caracterização
- Ensaios Tecnológicos

5.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.2.1 - Introdução

O solo coletado na jazida apresentava-se com acentuada presença de concreções. Foi acondicionado em sacos de lona grossa, devidamente lacrados, a fim de evitar perda de material fino, para garantia de sua representatividade. Após sua chegada ao laboratório, foi exposto ao ar para secagem.

Em virtude da presença de concreções, o material foi submetido a um processo de britagem, utilizando-se para isso, um britador de mandíbulas com abertura ajustada, de modo a reduzir para 9,5 mm, o diâmetro máximo dos grãos.

Em seguida, após homogeneizado, procedeu-se a um peneiramento do material britado, através da peneira nº 10 da série ABNT, cuja abertura da malha é de 2 mm. O material resultante foi utilizado para todos os ensaios. É importante ressaltar que a utilização do solo com tamanho máximo de 2 mm, se deve à geometria dos moldes projetados para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial.

5.2.2 - Granulometria

O ensaio de granulometria para as partículas maiores que 0,074 mm, foi desenvolvido através das recomendações da especificação inglesa BS 1377 (1967). Trata-se de um ensaio por via úmida e consiste basicamente em tomar duzentos gramas de solo e misturá-los com uma solução de hexametáfosfato de sódio, na concentração de duas gramas para um litro de água. Toma-se o cuidado de agitar a mistura solo-solução, em intervalos de tempo conveniente, de modo a permitir uma melhor desagregação de partículas menores da superfície de partículas maiores, facilitando a defloculação. Decorrido um período de duas horas, o material é submetido a um processo de lavagem, na série de peneiras (ABNT), até que a água de lavagem saia limpa, em todas as peneiras. A seguir o material retido nas diversas peneiras é colocado para secar e, posteriormente, pe

sado. A fração de material menor que 0,074 mm, é calculada por diferença entre a massa da amostra, antes do ensaio, e o somatório das massas secas retidas em cada uma das peneiras da série.

A granulometria da fração menor que 0,074 mm, foi obtida através da utilização do método ABNT-MB-32. Este ensaio consiste na determinação do diâmetro médio das partículas, em função da velocidade de deslocamento das mesmas, em um meio fluido. Foram consideradas todas as correções necessárias indicadas pela norma, de modo a obter um melhor resultado no ensaio.

Foram usados, como agente defloculante, 125 ml de solução de hexametáfosfato de sódio a uma concentração de 47,5 g/l de água destilada, tendo sido tamponada com CaCO_3 , em pH 9.

5.2.3 - Limites de Atterberg

Limite de Liquidez

Este parâmetro foi determinado seguindo as recomendações da norma ABNT-MB-30.

Limite de Plasticidade

Para a determinação deste parâmetro seguiu-se as recomendações da norma ABNT-MB-31.

5,2,4 - Densidade Real

O ensaio para a determinação da densidade real, foi executado seguindo as recomendações da norma DNER-D.P.T.M 93-64. Foram feitas três determinações, sendo aceitas de boa qualidade, por não diferirem entre si, além do limite especificado pela norma.

5.2.5 - Classificação do Solo em Estudo

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, será apresentada uma classificação do solo estudado, segundo os métodos de classificação do HRB e de Casagrande.

5.3 - ENSAIO TECNOLÓGICO

5.3.1 - Introdução

Os ensaios tecnológicos aqui evidenciados, são aqueles que fornecem parâmetros tecnológicos do material estudado, ou sejam, compactação, permeabilidade e cisalhamento triaxial.

Neste ítem, abriremos um sub-ítem para descrevermos a fase de preparação das amostras para os ensaios de permeabilidade e triaxial.

5.3.2 - Compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme orientação da norma ABNT-MB-33.

A energia de compactação utilizada foi correspondente à do Proctor Normal e a água foi destilada, para modificação da umidade do solo na obtenção dos diferentes pontos da curva de compactação, sendo assim, obtida a relação entre o peso específico aparente seco, em função do teor de umidade.

Para cada ponto da curva foi utilizado novo material, com o intuito de obter uma melhor representatividade, evitando, desta forma, possíveis modificações nas propriedades intrínsecas do material, que podem surgir quando do seu reaproveitamento.

Foram executadas compactações do solo natural e do sistema solo-cal nos diferentes teores. O processo de mistura do solo com água ou solo, cal e água, conforme o caso, foi feito utilizando um misturador elétrico de eixo vertical, existente no laboratório. Este processo de homogeneização do material, para o ensaio de compactação, obedeceu às seguintes etapas:

- Colocação do solo ou solo e cal, conforme o caso, na bacia do misturador;
- homogeneização do material na bacia por um período de um minuto;
- colocação da quantidade de água desejada, necessária para modificar a umidade e continuação da mistura por mais um minuto.
- parada do misturador e retirada do material aderido as paredes e pás. Religação por mais um minuto;

- material pronto para ser compactado.

5.3.3 - Preparação das Amostras para os Ensaios de Permeabilidade e Triaxial.

5.3.3.1 - Introdução

Sendo esta pesquisa, mais um trabalho sobre solo laterítico do Estado da Paraíba desenvolvido no CCT, achamos conveniente não desvinculá-lo inteiramente de trabalhos desenvolvidos anteriormente neste Centro. Por esta razão, decidimos adotar técnicas utilizadas anteriormente, com relação à geometria dos corpos de prova e ao método de aplicação da energia de compactação, para compactar as amostras para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial (Braga) (1979) (Ferreira) (1976). A amostra, moldada segundo esta orientação, serve para realizar os dois ensaios sem que seja preciso retrabalhá-la.

O processo de preparação das amostras segue basicamente as seguintes operações: mistura, moldagem, compactação, cura e saturação.

5.3.3.2 - Mistura

A mistura foi homogeneizada mecânicamente, através de um misturador elétrico de eixo vertical, marca Hobat de 1/6 de HP, em todas as suas fases.

Inicialmente, a mistura convenientemente dosada foi

homeneizada por um período de um minuto. Em seguida, adicionou-se a quantidade de água destilada necessária para que o material obtivesse a umidade ótima de moldagem, determinada anteriormente no ensaio de compactação, ou seja, 12,9% para o solo sem aditivo e 15,4 para o solo misturado com a cal, em todas as concentrações usadas no trabalho.

A mistura continuava por um minuto, após o qual parava-se o misturador e retirava-se o material aderido às paredes e às pás do mesmo. O aparelho era então religado por mais um minuto, perfazendo um tempo total de três minutos de mistura. Decorrido este tempo, o material estava pronto para a moldagem.

5.3.3.3 - Moldagens

Os moldes dos corpos de prova utilizados no presente trabalho eram constituídos de tubos de PVC, com um comprimento total de 101,6 mm por 40,3 mm de diâmetro, o que permite obter espécimens com este mesmo diâmetro, porém de altura igual a 76,2 mm.

Para evitar expansões dos corpos de prova durante a fase de compactação, bem como nas de saturação e percolação, foram colocadas três abraçadeiras de cintamento, como reforço das paredes de molde, evitando, assim, um possível abaulamento das mesmas. A amostra era também confinada nas suas faces superiores e inferiores, através de um sistema composto de papel de filtro, disco de fibra perfurado e conexão do tipo redução rosqueada. As reduções rosqueadas serviam tanto para

confinar mecânicamente a amostra, como peça de adaptação para os bocais do permeâmetro. O projeto do molde foi elaborado por Ferreira (1976) e executado nas oficinas do CCT, conforme apresentado na Figura 5.2. Os demais acessórios são apresentados na Figura 5.3.

5.3.3.4 - Compactação

Após obtermos a mistura convenientemente dosada e umedecida, tomava-se a quantidade necessária em peso para um espécimen, o que era função do seu volume final e da densidade desejada, ambos já conhecidos.

O material era então lançado no molde acoplado de seus complementos, que o capacitava a receber todo o material ainda não compactado.

Em seguida, o conjunto era levado para a prensa onde era submetido a um processo de compactação estática. Efeituava-se o primeiro estágio da compactação, após o qual, retirava-se o complemento maior e passava-se ao segundo estágio, que após concluído, fornecia a amostra compactada na densidade desejada, que era a máxima para o Proctor Normal.

Em seguida, retirava-se o complemento inferior e colocavam-se, nas superfícies superior e inferior, o papel de filtro, o disco de fibra perfurado e as conexões tipo redução rosqueada, que confinava convenientemente a amostra.

A energia de compactação foi aplicada ao solo, através de uma prensa hidráulica, marca Farnel, modelo 8220/301.

Os tubos complementares utilizados foram projetados

e executados, conforme o esquema mostrado na Figura 5.4 e sua finalidade era de aumentar a capacidade do molde, quando conectados, para receber, integralmente, todo o material a ser compactado.

Após rosquear os complementos ao molde, colocamos o conjunto sobre uma base metálica que possui uma saliência cilíndrica de 40,3 mm de diâmetro, por 6,40 mm de altura (base 1). A seguir o material a ser compactado é colocado no interior de conjunto, ficando o complemento maior na parte superior e o menor encaixado na base metálica.

Utilizando um pistão metálico com diâmetro de 40,3 mm, acoplado à prensa, são transmitidos os esforços sobre a camada superior do solo, a uma velocidade de 0,16 pol/min, até que a altura do solo atinja 82,5 mm. Esta altura é controlada pela penetração do pistão, previamente calibrado para este fim.

Em seguida, o pistão é removido do interior do cilindro, retira-se o complemento superior e coloca-se em seu lugar, uma outra base metálica com saliência cilíndrica de 40,3 mm de diâmetro e 12,7 mm de altura (base 2).

É realizada então, sobre a outra face da amostra, uma nova etapa de compactação na mesma velocidade aplicada anteriormente, até que a amostra atinja uma altura de 76,2 mm, altura esta controlada pela penetração do pistão. Desliga-se então a prensa, permanecendo nesta condição, por um período de um minuto, de modo a proporcionar uma melhor acomodação das partículas do solo.

Detalhes das bases 1 e 2, utilizadas para executar

a compactação, são apresentadas na Figura 5.5.

Com o objetivo de evitar atrito entre o solo e as paredes do molde e dos complementos, aplicou-se, nas faces internas, uma fina camada de vaselina, antes de cada compactação. Esta orientação foi observada com base em técnicas desenvolvida anteriormente (Ferreira) (1976).

5.3.3.5 - Cura

As amostras, após compactadas, eram submetidas a um processo de cura por períodos de tempo previamente estabelecidos de 7, 14 e 28 d.

O sistema utilizado para curar as amostras era basicamente constituído de uma caixa de isonor de dimensões 100 cm de comprimento por 80 cm de largura por 60 cm de altura, contendo, em seu interior, uma grade de madeira de 25 cm de altura, onde eram colocados os moldes e água, até atingir a face inferior da grade, para assegurar uma umidade constante da caixa e aproximadamente igual a 100%. A tampa da caixa era devidamente perfurada em vários locais e mantinha-se, sobre a mesma, uma flanela permanentemente úmida, para assegurar uma circulação de ar úmido no interior da caixa. Assim todas as amostras foram curadas a uma umidade constante de aproximadamente 100% e sob a temperatura ambiente do laboratório de aproximadamente $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

5.3.3.6 - Saturação

Após a compactação e a cura, conforme o caso, as amostras eram então saturadas, para em seguida serem submetidas aos ensaios de permeabilidade e cisalhamento triaxial.

O processo de saturação utilizado foi anteriormente adotado por outros pesquisadores deste Centro e foi idealizado por Cabrera (1975). Consiste, basicamente, em imprimir vácuo através de uma bomba, aos corpos de prova, durante um certo período, criando uma subpressão nos vazios da amostra. Em seguida, coloca-se água sobre as amostras, até encobri-las totalmente. Neste ponto, permite-se que o conjunto fique em contato com o meio exterior, de modo que a pressão atmosférica, se encarregue de comprimir a água para o interior das amostras, preenchendo assim os seus vazios.

O tempo utilizado, após as amostras serem colocadas no dissecador, para que a bomba de vácuo retirasse o ar dos vazios, foi de uma hora e meia. Decorrido este tempo, fechava-se a válvula do dissecador, desligava-se a bomba e introduzia-se água destilada em quantidade suficiente para submergir totalmente os moldes. O dissecador era aberto e por um período igual, deixava-se o conjunto sujeito à pressão atmosférica, e sendo esta maior que a pressão nos vazios dos corpos de prova, a água penetrava no seu interior promovendo assim a saturação desejada.

5.3.4 - Ensaios de Permeabilidade

Após a saturação, as amostras eram conectadas ao permeâmetro múltiplo de carga constante, para o ensaio de per

meabilidade, onde existia uma pressão de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$, correspondente a um gradiente hidráulico de aproximadamente 65.

As amostras eram submetidas ao ensaio de percolação por períodos de tempo pré-estabelecidos de 3, 7, 14 e 28 d, para os diferentes teores de cal, e diferentes tempos de cura, sendo moldados três corpos de prova para cada uma destas combinações.

A água utilizada durante o ensaio era destilada e as leituras da água percolada, eram feitas medindo a quantidade recolhida em um recipiente sob as amostras, em intervalos de tempo iguais, de 12 h, sendo as perdas por evaporação consideradas desprezíveis.

Apresentamos na Figura 5.6, um detalhe em corte, de uma amostra submetida ao ensaio de percolação.

Tendo em vista a grande quantidade de amostras a serem ensaiadas, se fez necessária a adoção de um permeâmetro múltiplo de carga constante, com capacidade de operar simultaneamente com vários corpos de prova.

Este sistema foi idealizado, projetado e desenhado pelo professor A. M. Ferreira e executado nas oficinas do CCT, conforme aparece na Figura 5.7. O sistema tem capacidade de articular trinta amostras simultaneamente e consiste, basicamente, em um tubo de nitrogênio com válvula reguladora de pressão; depósito de água com válvulas para reabastecimento, entrada de nitrogênio pressurizado e saída da água; dois tubos de PVC com adaptações para conectar os moldes; dispositivo para sangria do ar, para quando o sistema for aberto para colocação ou retirada de uma amostra e manômetro calibrado para

conferência da pressão em cada haste do sistema.

O tubo de nitrogênio fornece a pressão necessária para que a água saia dos depósitos, entre nas hastes do permeâmetro e percole através das amostras, sendo então coletada em um recipiente colocado sob as amostras, em intervalos de tempo estabelecidos.

5.3.5 - Ensaios de Cisalhamento Triaxial Consolidado , não Drenado.

O procedimento adotado na realização dos ensaios de cisalhamento triaxial, foi o preconizado por Bishop e Henkel (1972).

O equipamento utilizado na execução dos ensaios foi da E.L.E. (Engineering Laboratory Equipment) (1972), constando de aparelho e célula triaxial devidamente preparada para medições de pressões neutras, possibilitando assim, a obtenção das características de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas.

Estes ensaios foram realizados com todos os corpos de prova após compactação, cura, saturação e percolação, sendo moldadas três amostras para cada combinação acima, e rompidas a pressões confinantes de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ e $3,0 \text{ kgf/cm}^2$, aplicadas usando o aparelho de pressões de Bishop.

A velocidade adotada para a realização dos ensaios, foi de $0,002 \text{ pol/min}$, de modo a permitir uma melhor distribuição das pressões neutras no interior das amostras, evitando gradientes que poderiam ocorrer em ensaios realizados a maio

res velocidades, implicando em imprecisão nas leituras das pressões neutras.

FIGURAS DO CAPÍTULO V

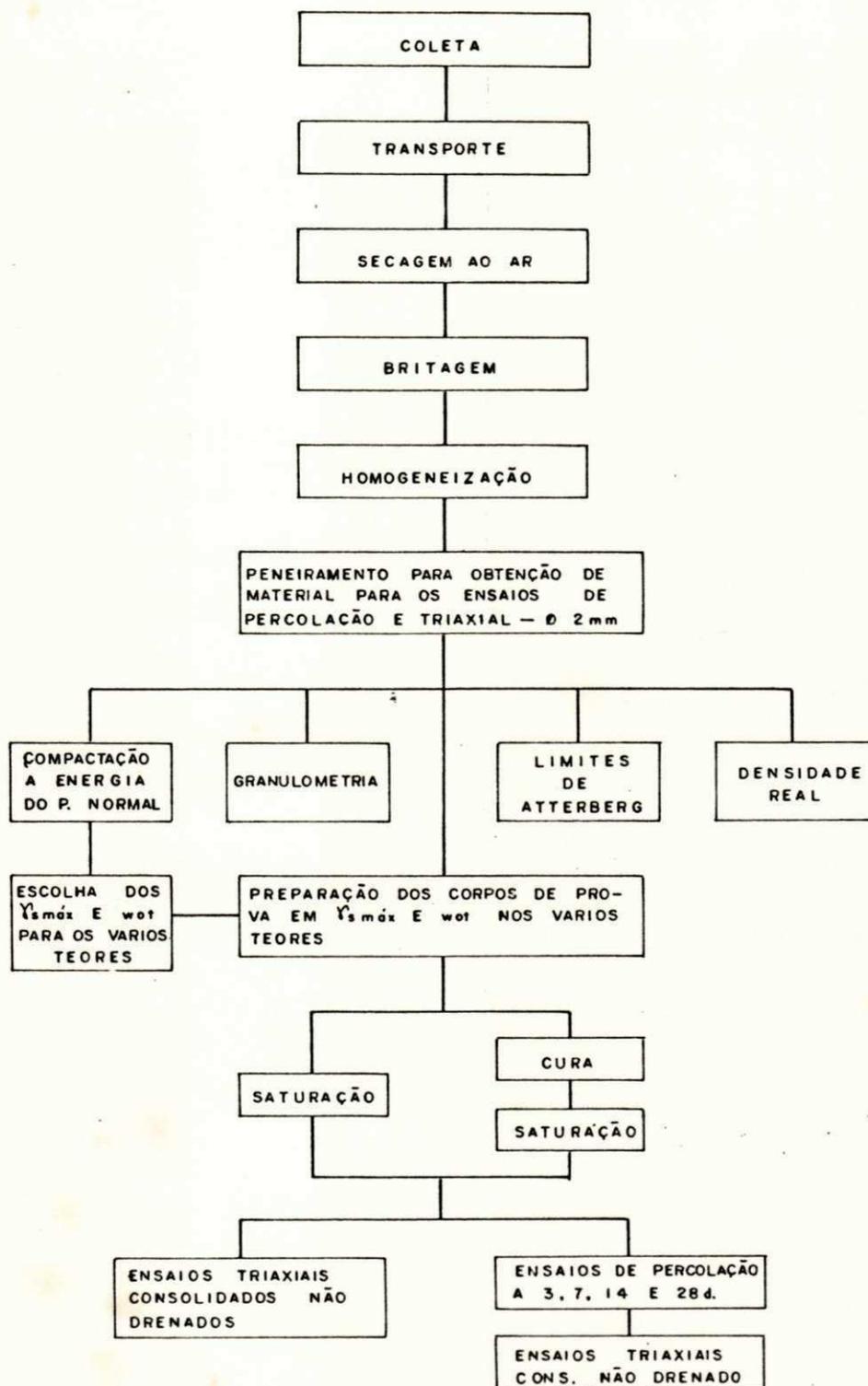


FIGURA 5.1

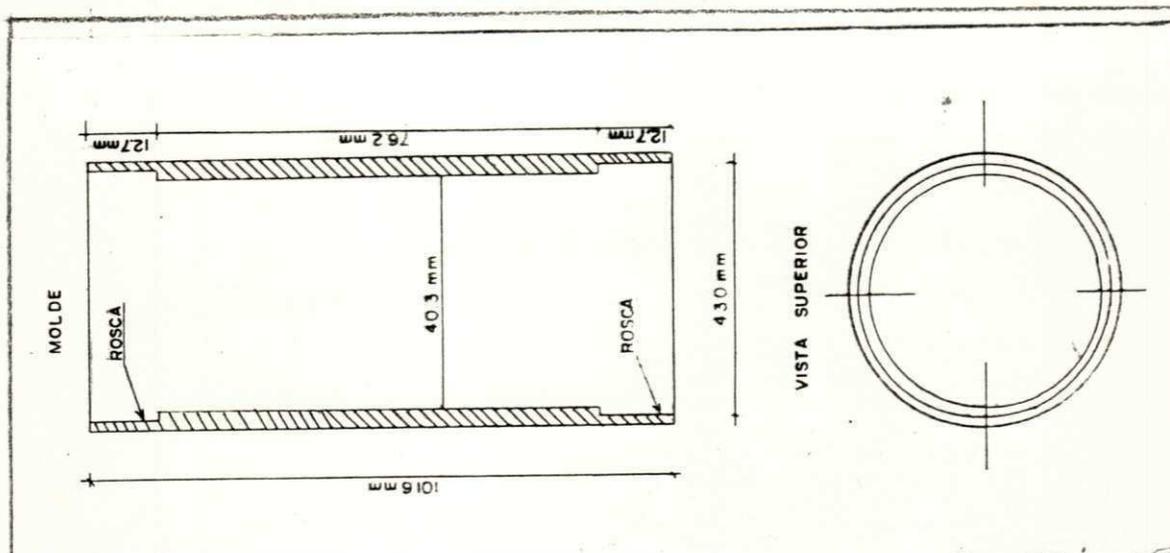


FIGURA 5.2
PROJETO DO MOLDE

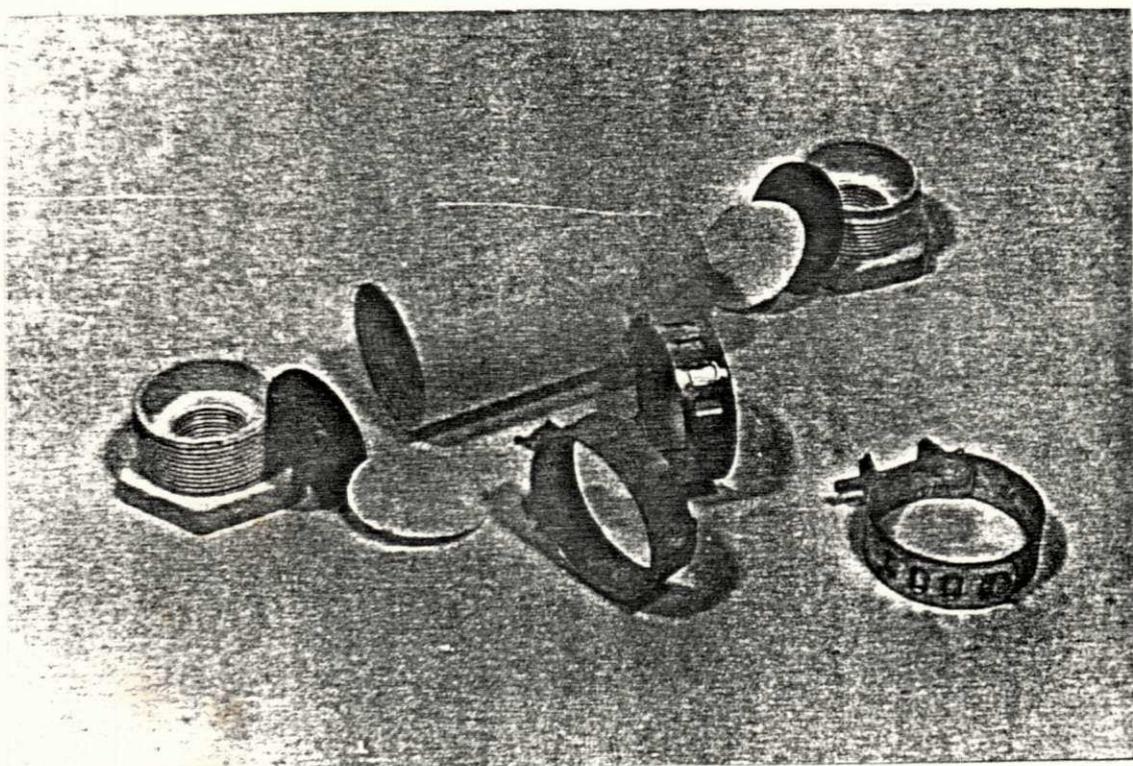


FIGURA 5.3
FOTOGRAFIA DO MOLDE E ACESSÓRIOS (ABRACADEIRAS, REDUÇÃO, PAPEL DE FILTRO E DISCO DE FIBRA PERFURADO)

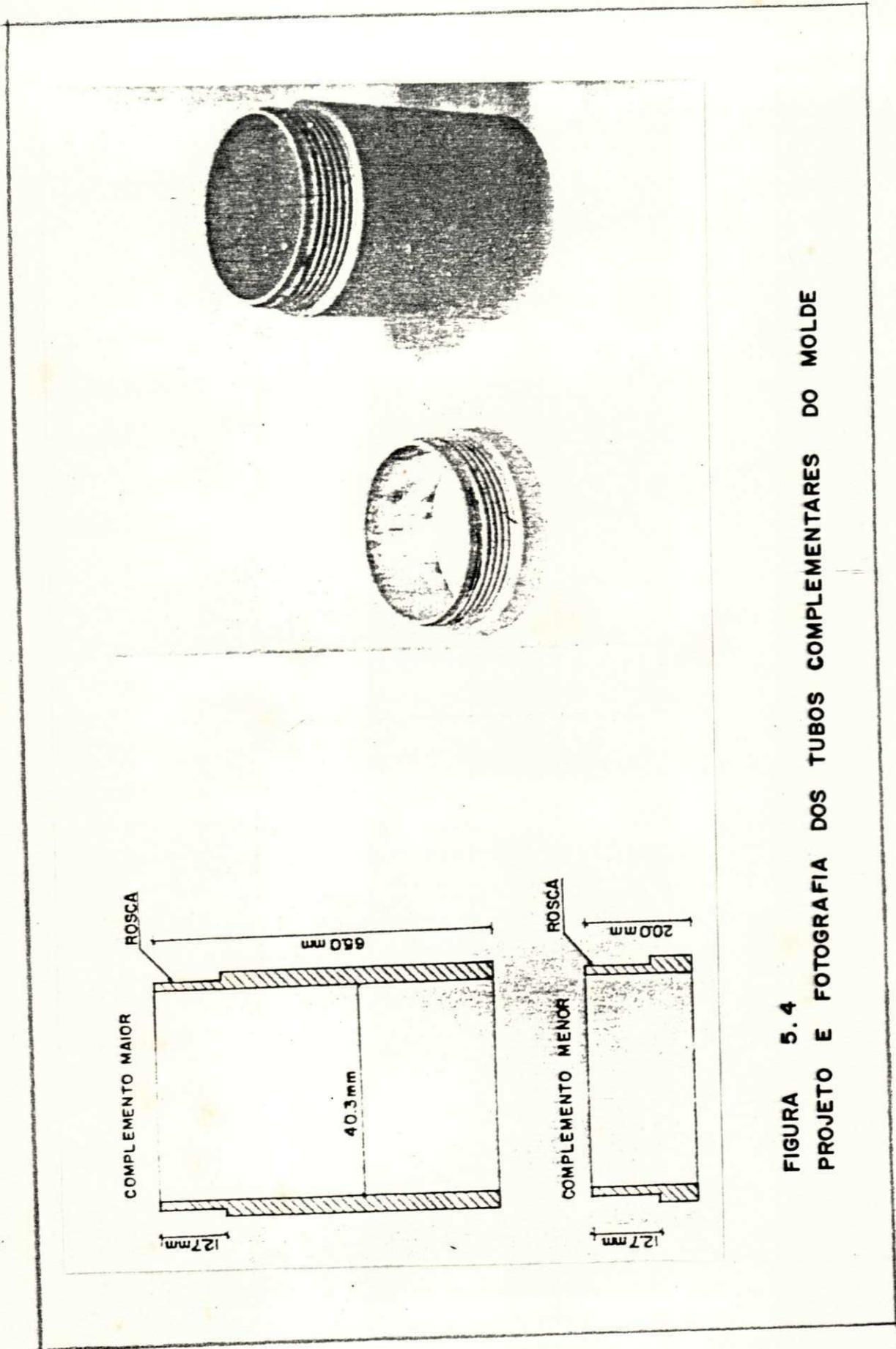


FIGURA 5.4
PROJETO E FOTOGRAFIA DOS TUBOS COMPLEMENTARES DO MOLDE

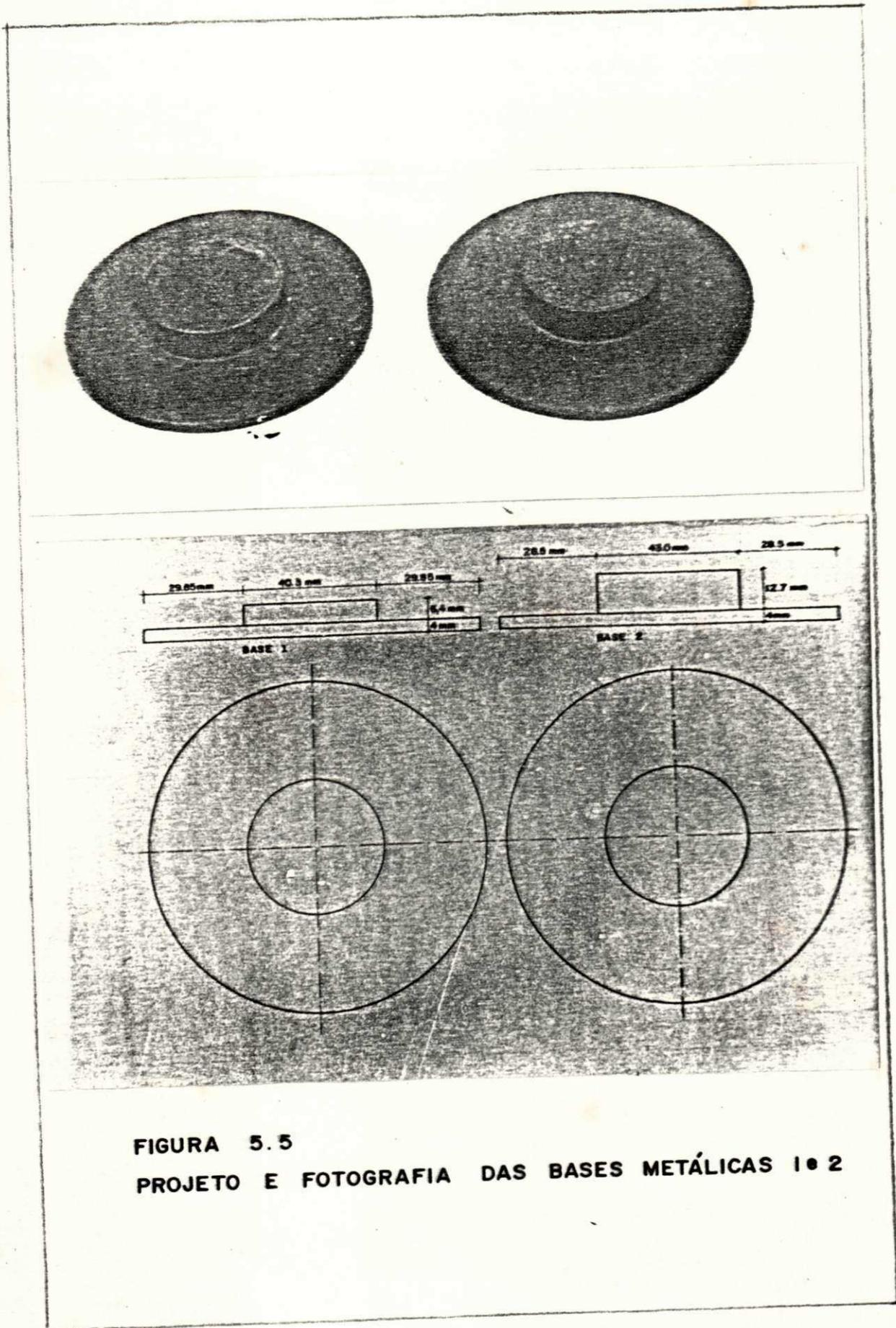


FIGURA 5.5
PROJETO E FOTOGRAFIA DAS BASES METÁLICAS 1 e 2

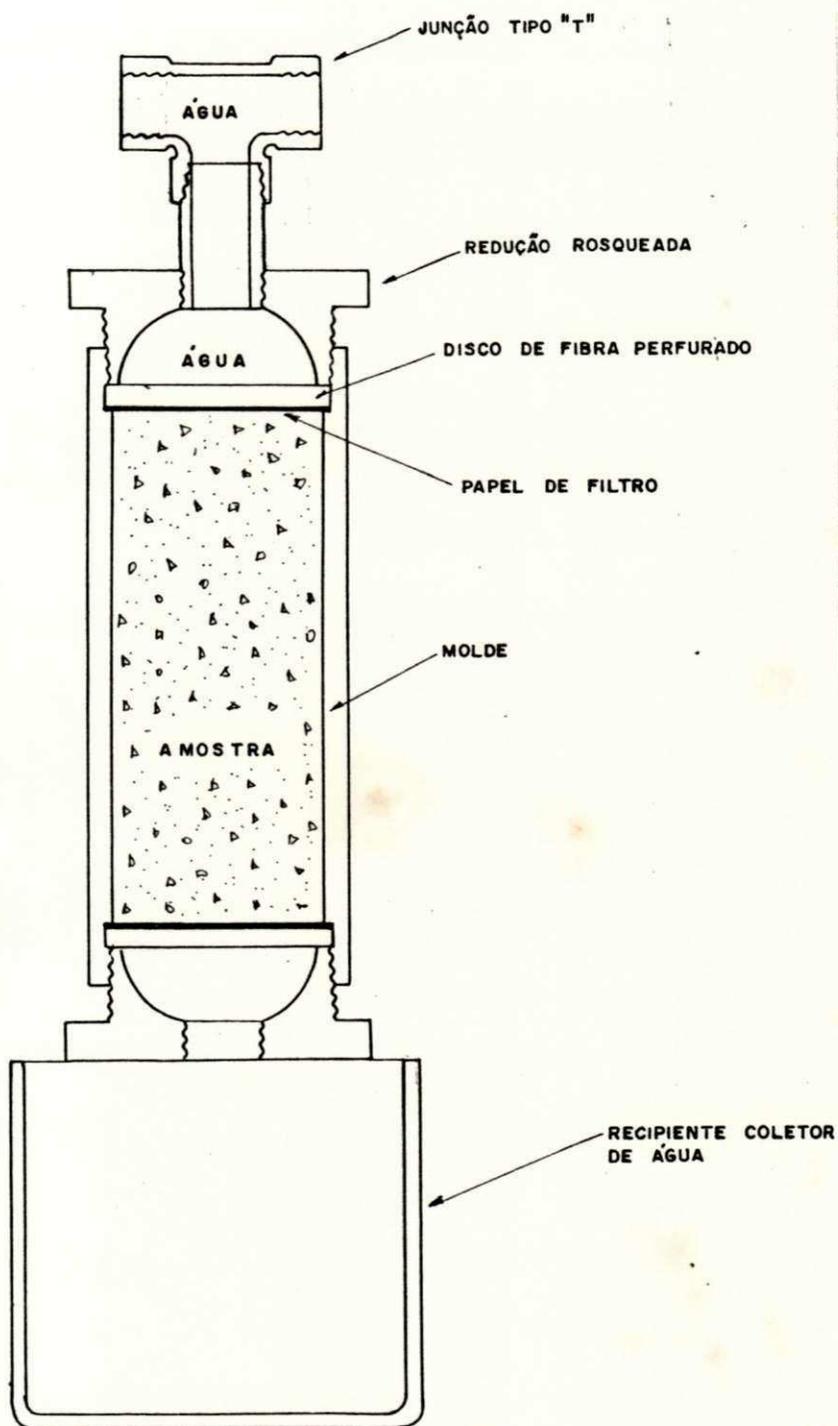


FIGURA 5.6

**DETALHE EM CORTE DE UMA AMOSTRA SUBMETIDA
AO ENSAIO DE PERCOLAÇÃO**

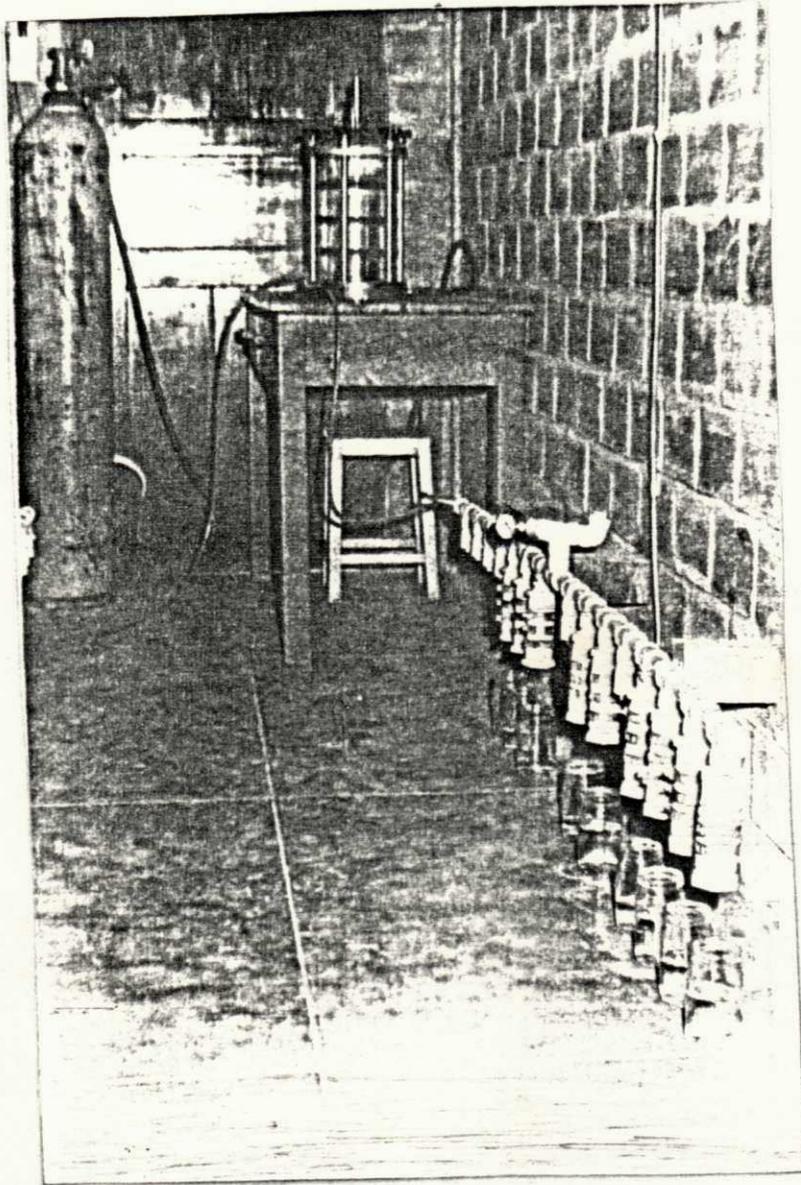


FIGURA 5.7
VISÃO COMPLETA DO PERMEÂMETRO

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 - INTRODUÇÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização e tecnológicos, realizados conforme foram descritos no capítulo anterior, serão aqui, apresentados, analisados e discutidos, de forma que proporcionem conclusões com base nos resultados determinados e os obtidos por outros pesquisadores em investigações realizadas com o solo em estudo.

6.2 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

6.2.1 - Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com as exigências anteriormente citadas e a curva de distribuição granulométrica (peneiramento e sedimentação) do material em estudo se encontra na Figura 6.1. Os quantitativos, em termos de porcentagem que passa através da série de peneiras e que nos proporcionam a composição granulométrica, estão apresentados na Tabela 6.1, onde pode-se observar que os percentuais de argila e silte mais argila são respectivamente 15% e 31%.

Embora os valores dos percentuais retidos nas peneiras, se encontrem um pouco distanciados dos encontrados por

Ferro (1976) e por Bezerra (1976), pode-se verificar que a configuração da curva granulométrica possui a mesma forma das aquelas por eles apresentadas.

Segundo Braga (1979), de acordo com a classificação da British Standard Institution - BS, temos um material que apresenta uma porcentagem de 15% de partículas tamanho argila e uma porcentagem de 31% de silte mais argila, possuindo assim, o material, uma quantidade de finos necessária para que sejam preenchidos os vazios do solo, aumentando os pontos de contato grão a grão e devendo, ainda, favorecer o desenvolvimento de compostos responsáveis por características de resistência do solo.

6.2.2 - Limites de Atterberg

Os ensaios visando à determinação dos limites de Atterberg para o solo em estudo, foram realizados de acordo como estabelecido anteriormente e apresentaram os resultados constantes na Tabela 6.2.

Os valores encontrados para LL e LP foram respectivamente 21,15% e 16,57%, proporcionando um $IP = 4,58\%$ o que caracteriza um material de baixa plasticidade e de boas qualidades de engenharia. O valor encontrado para o LP está bastante próximo da média (17,1) obtida por Marinho (1976) quando da realização deste ensaio por vinte diferentes laboratórios. O LL apresenta uma certa variação, quando comparado com a média dos valores obtidos no mesmo trabalho (26,3), o que é perfeitamente justificável, tendo em vista o conhecimento da baixa

ção parte constituinte desta tabela.

Com base nos resultados obtidos em termos de caracterização do solo, o método do HRB, proporciona uma classificação do solo em estudo, como um solo A-2-4, enquanto que o método de Casagrande, como um solo SM-SC. Os solos A-2-4 segundo o método do HRB são pedregulhos e areias siltosas e argilosas e os SM-SC fornecidos pelo método de Casagrande, são areias siltosas e argilosas. Observamos assim uma classificação bastante coerente para o solo em estudo, obtida através de dois critérios distintos de classificação de solos.

6.3 - ENSAIOS TECNOLÓGICOS

6.3.1 - Compactação

As determinações das características de compactação do solo, foram realizadas utilizando-se a energia de compactação do Proctor Normal e de acordo com as especificações descritas anteriormente.

Foram traçadas curvas de compactação para o solo sem aditivo e para o solo com teores de 2%, 4% e 6% de cal. A relação entre o teor de umidade e o peso específico aparente seco, para as diferentes concentrações de cal, pode ser observada nas Figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5. Nestas figuras, encontram-se também indicados os respectivos teores de umidade ótima e os pesos específicos aparente secos máximos.

Os valores do teor de umidade e peso específico aparente seco, obtidos quando da realização dos ensaios de com

pactação e utilizados no traçado destas curvas, são apresentados na Tabela 6.3.

As curvas de compactação apresentaram um comportamento já esperado, havendo um decréscimo do seu peso específico aparente sêco máximo e um aumento da correspondente umidade de ótima, após a adição da cal nas diferentes concentrações. Este fato já foi constatado e previsto dentre outros, por Ferro (1976) e Queiroz de Carvalho (1979) e deve-se às características floculantes da cal, que causam uma floculação nas partículas do solo, aumentando o índice de vazios e uma consequente redução do peso específico aparente sêco do material.

Após um visível aumento da umidade ótima e uma redução do peso específico aparente seco máximo, para uma adição de 2% de cal, verificou-se que, para incrementos maiores de cal (4% e 6%), estes valores não sofriam quase variação, levando-nos a afirmar que os mesmos são praticamente coincidentes, tendo em vista que as variações apresentadas estão dentro de uma faixa de incerteza, no que diz respeito à precisão do ensaio. Esta pequena variação nos teores de umidade ótima de compactação, para as diferentes concentrações de cal, nos levou a utilizar um único valor de umidade ótima para os diferentes teores de cal, quando das moldagens dos espécimes para a realização dos ensaios de percolação e cisalhamento triaxial ($W_{ot} = 15,4\%$).

6.3.2 - Permeabilidade

Com o objetivo de analisar a influência da percola

ção da água nas características da mistura, os corpos de prova foram submetidos a um processo de percolação, utilizando os sistemas e equipamentos descritos no capítulo anterior.

Amostras, nos vários teores de cal, foram colocadas no multi-permeâmetro e a quantidade de água percolada, recolhida em recipientes, era medida em intervalos de 12 horas. Os resultados obtidos foram agrupados em função da concentração de cal e do tempo de cura. A dispersão apresentada pelos resultados assim reunidos, era bastante reduzida, possibilitando o cálculo da média de cada grupo formado, em função do tempo de cura e dos diferentes teores de cal utilizado.

Definindo-se vazão acumulada como o somatório das leituras realizadas até aquela data, ou seja, como a quantidade total de água que atravessou a amostra até aquele instante, as Figuras 6.6, 6.7 e 6.8, mostram a sua variação, em relação ao tempo de percolação, para os vários teores de cal e tempos de cura. Estes gráficos mostram que, independentemente do tempo de cura (7, 14 e 28 dias), as amostras de solo-cal, para todos os teores (2, 4, 6 e 8%), tiveram um maior volume de água percolada que as amostras moldadas para o solo sem cal (0%). Este fato nos mostra que a fração fina das amostras de solo-cal, moldadas para diferentes concentrações de cal e submetidas a diferentes tempos de cura, sofreram um processo de flocculação. O material apresenta-se, então, mais granular, o que facilita a formação de canais de maiores dimensões, interligando os vazios do solo, tornando-o mais susceptível à percolação d'água.

Se analisarmos o material sob o aspecto de coefi

ciente de permeabilidade (K), fica evidenciado que o sistema solo-cal, para as diferentes concentrações, é mais permeável que o solo natural. A Figura 6.9 nos mostra as curvas de tempo de percolação "versus" coeficiente de permeabilidade, para o solo natural e para o solo-cal nos diferentes teores, para 7 dias de cura. Fato idêntico ocorre também para 14 dias e 28 dias de cura, conforme pode ser visto nas Figuras 6.10 e 6.11. Nota-se, em todos os casos, uma permeabilidade bastante elevada para as primeiras leituras realizadas, com uma tendência à estabilização após o sétimo dia de percolação. A este comportamento pode estar associado o fenômeno de carreamento de partículas finas do solo ou sistema solo-cal, bem como, a uma provável complementação da saturação das amostras, admitindo que o processo utilizado, não proporcionou uma saturação de 100%.

Segundo Braga (1979), a redução do coeficiente de permeabilidade com o aumento do tempo de percolação, associada ao fato de que a água de percolação sai límpida após atravessar o corpo de prova, sugere que o fluxo de água que é induzido pelo gradiente hidráulico a que a amostra está submetida, induz um carreamento e modificação de posição das partículas, dentro da amostra, o que, sem alterar o índice de vazios, provoca uma tendência de obstrução das canaletas através das quais o fluxo se realiza, em virtude da própria natureza deste fluxo.

Fica, portanto, evidenciado que em termos de permeabilidade, a cal adicionada ao solo em estudo, nas diferentes concentrações e para os diferentes tempos de cura, atua produ

zindo o fenômeno de floculação e agregação das partículas, transformando o solo em um material mais granular, o que favorece a percolação.

6.3.3 - Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Triaxial

Os ensaios triaxiais foram desenvolvidos para todos os corpos de prova submetidos aos diferentes tempos de percolação (0, 3, 7, 14 e 28 dias), diferentes tempos de cura (7, 14 e 28 dias) e para as várias concentrações de cal (0, 2, 4, 6 e 8%) utilizadas na investigação.

Escolheu-se o ensaio de resistência ao cisalhamento triaxial do tipo consolidado, não drenado, com medida de pressão neutra, de modo a possibilitar a obtenção de dados que levassem a uma análise da variação do comportamento da resistência do material, quando estivessem presentes fenômenos de percolação.

As curvas de deformação axial "versus" deviator ($\sigma_1 - \sigma_3$) para as diferentes concentrações de cal, estão apresentadas nas Figuras 6.12 a 6.29, grupadas por tensão confinante (1,0, 2,0 e 3,0 kgf/cm³), tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e para os tempos de percolação de 0 e 14 dias.

Observa-se, nestas figuras, que para um mesmo tempo de cura e tempo de percolação, as curvas deformação x deviator para cada pressão confinante não apresentam nenhuma sequência lógica quanto ao ganho ou não de resistência para as amostras de solo-cal, moldadas nas diferentes concentrações, comparadas com a resistência obtida para o solo no seu estado

natural (0% de cal).

Na Figura 6.21, por exemplo, aparecem as curvas de formação x deviator, para amostras ensaiadas a 7 dias de cura, 14 dias de percolação e para uma pressão confinante de 1,0 kgf/cm². Neste caso, observa-se que todas as amostras de solo-cal, nas diferentes concentrações, apresentaram uma resistência inferior à do solo natural. Fato semelhante pode ser observado na Figura 6.24, onde se apresentam as curvas para amostras ensaiadas para 14 dias de cura, 14 dias de percolação, a uma pressão confinante de 1,0 kgf/cm². Com exceção dessas duas situações, nada fica evidenciado quanto ao ganho ou não de resistência do sistema solo-cal, independente da concentração de cal, cura e tempo de percolação. Em todos os casos porém, ficou nítida a queda de resistência do sistema solo-cal, moldado a uma concentração de 2% de cal, independente das demais variáveis: cura, percolação e pressão de confinamento.

Uma análise em termos de ganho de resistência (Figuras de 6.12 a 6.29), para diferentes tempos de cura, mantendo fixas as demais variáveis (teor de cal, tempo de percolação e pressão confinante), nos mostra, mais uma vez, que não há ganho de resistência, quando decorridos maiores tempos de cura, havendo em alguns casos, variações, sem contudo existir nenhuma lei de formação para os resultados obtidos. Fato idêntico também ocorre, quando analisamos a variação do ganho de resistência em termos de tempo de percolação, mantendo fixos os demais fatores que poderiam influenciar a resistência, ficando evidenciado que, para o solo em estudo, não houve ganho efeti

vo de resistência, independentemente de todas as variáveis utilizadas na investigação.

Apresentamos na Tabela 6.4 os valores das tensões máximas, obtidas das curvas de deformação axial x deviator (Figuras 6.12 a 6.29), para uma deformação axial de 3%. Este critério foi utilizado, tendo em vista que, na maioria dos casos, não fica evidenciada a tensão de pico, já que o deviator tende a crescer dentro do intervalo de deformações utilizado nos ensaios. Assim, para todos os resultados obtidos dos ensaios triaxiais, utilizamos o critério de limitar a deformação a 3% e usar o deviator correspondente.

Os valores contidos na Tabela 6.4, evidenciam claramente, que não há consistência nos resultados obtidos em termos de ganho de resistência, independentemente das concentrações de cal, tempos de cura e de percolação e para todos os níveis de tensões confinantes utilizadas.

Os valores contidos na Tabela 6.4, nos proporcionam através do critério de ruptura de Mohr, os valores da coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ) para o solo e sistema solo-cal, os quais são apresentados na Tabela 6.5. Os resultados obtidos em termos de coesão e ângulo de atrito, mostram mais uma vez, que não há nenhuma tendência em termos de ganho ou não de resistência, independentemente das diferentes concentrações de cal e diferentes tempos de cura e de percolação utilizados.

Sendo a resistência ao cisalhamento obtida pela expressão $\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg}\phi$, apresentamos na Tabela 6.6, valores de tensões de cisalhamento (τ) para uma tensão normal (σ_n) arbitrária, igual a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, para ilustrar a inexistência de

qualquer tendência, quanto ao ganho de resistência ao cisalhamento do material estudado, para as condições e variáveis utilizadas no presente estudo.

Apresentamos nas Figuras 6.30 e 6.31, envoltórias típicas de tensão normal total x tensão de cisalhamento para 7 dias de cura e 0 e 14 dias de percolação respectivamente, obtidas através da expressão $\tau = C + \sigma_n \text{tg}\phi$, onde fica evidenciado, o comportamento de não reatividade do solo em estudo com cal. Fato idêntico, também ocorre para 14 e 28 dias de cura, o que caracteriza a não estabilização do solo estudado em termos de resistência ao cisalhamento, independentemente do teor de cal e tempos de cura e de percolação utilizados na investigação.

Apresentamos a seguir, um estudo em termos de parâmetros efetivos de resistência. Nas Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, encontram-se os valores de pressões neutras (u) e tensões efetivas (σ_1' e σ_3'), para os diferentes teores de cal, diferentes tempos de cura e de percolação e para os diferentes níveis de pressão confinantes utilizadas no estudo. Os valores de σ_1' e σ_3' contidos nas Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, através do critério de rutura de Mohr, nos proporcionam os valores de coesão efetiva (C') e ângulo de atrito efetivo (ϕ'), para o solo e sistema solo-cal, os quais são apresentados na Tabela 6.10. Estes resultados em termos de parâmetros efetivos de resistência, nos mostram mais uma vez, que não há nenhuma tendência em termos de ganho ou não de resistência, independente de todas as variáveis utilizadas na investigação.

Apresentamos nas Figuras 6.32 e 6.33, como ilustra

ção, envoltórias típicas de tensão normal efetiva x tensão de cisalhamento para 7 dias de cura e 0 e 14 dias de percolação respectivamente, obtidas através da expressão $\tau = C' + \sigma_n' \text{tg}\phi'$, evidenciando um comportamento idêntico ao já apresentado, obtido em termos de tensões totais.

Analisando todos os resultados obtidos em termos de resistência, para os diferentes teores de cal, diferentes tempos de cura e de percolação, ficou bastante claro que as amostras ensaiadas a uma concentração de 2% de cal, independentemente dos demais fatores, obtiveram resistência inferiores às das amostras de solo puro nas mesmas condições de ensaio, evidenciando o comportamento induzido ao solo pela cal na concentração de 2%. Para as demais concentrações de cal, nada fica perfeitamente definido, visto que em alguns casos, amostras ensaiadas para todas as concentrações, apresentaram resistências inferiores à do solo puro, dando ao solo um comportamento de não reatividade, enquanto que em outros casos, as amostras de solo-cal, nas diferentes concentrações, obtiveram resistências muito próximas ou um pouco acima da resistência do solo puro, sem contudo ficar evidente qualquer tendência para os resultados obtidos, em termos de concentração, tempo de cura ou tempo de percolação.

Os resultados obtidos, após uma análise completa em termos de ganho ou não de resistência para as diferentes concentrações de cal, diferentes tempos de cura e de percolação, nos induzem a concluir para as condições de ensaios utilizadas, que o solo laterítico de Nova Floresta, objeto desta investigação, parece ser um solo não reativo à cal.

Evidenciamos no entanto, que as análises e discussões aqui apresentadas, são válidas para as limitadas condições utilizadas no desenvolvimento do estudo em termos de ensaios de laboratórios.

É sabido, que a umidade de moldagem tem grande influência na resistência dos solos lateríticos e, no nosso estudo, utilizamos umidades diferentes para o solo puro e para o sistema solo-cal, já que foi utilizada a umidade ótima, obtida do ensaio de compactação, correspondente ao peso específico aparente seco máximo. É possível portanto, que uma umidade de moldagem única para o solo puro e para o sistema solo-cal, proporcione resultados e conclusões diferentes, das por nós obtidas na presente investigação.

Outro aspecto a se considerar, é o tempo de cura, tendo em vista que, para 28 dias de cura, já se pode observar que o sistema solo-cal apresenta um certo ganho de resistência, quando comparado entre si, ou seja, observa-se uma tendência de aumento da resistência em função do teor de cal. Contudo, esta tendência só se observa, quando não comparada com a resistência do solo puro, parecendo que o aumento do teor de umidade de moldagem do solo puro para o sistema solo-cal, em torno de 2%, tenha uma influência significativa, a ponto de neutralizar o pequeno ganho de resistência do sistema solo-cal, para as diferentes concentrações de cal utilizadas.

Fazendo-se uma comparação dos resultados obtidos e da conclusão a que se pode chegar neste estudo, com resultados obtidos por outros pesquisadores quanto à reatividade à

cal envolvendo o solo de Nova Floresta, conforme foi apresentado no Capítulo referente a Revisão Bibliográfica, conclui-se que daqueles pesquisadores os que apresentam resultados i dênticos aos obtidos no presente estudo, são Cabrera e Nwakanma (1979) onde concluem que o solo de Nova Floresta é não pozolânico. Os resultados obtidos por Queiroz de Carvalho e Cabrera (1979) relativos à diferença de capacidade de troca de C â tions (DCTC), onde eles concluem que o solo de Nova Floresta é um solo reativo e próprio para sub-base e sub-leito, requer uma maior reflexão quanto a esta afirmação visto que a DCTC obtida para o solo em estudo foi igual a 1,08 meq/100g, valor este muito próximo do limite inferior (1,00 meq/100g) da fai xa de classificação para os solos reativos. Sendo este valor limite, uma fronteira entre as faixas de classificação dos solos reativos e não reativos, valores de DCTC muito próximos deste limite, tornam, naturalmente, de pouca precisão, a afir mação de que o solo é ou não reativo. Em virtude da grande pro ximidade do valor da DCTC obtida para o solo de Nova Floresta (DCTC = 1,08 meq/100g) deste valor de fronteira, poder-se-ia, em última análise, dizer que o solo em estudo, seria de muito baixa reatividade à cal, ou talvez não reativo. Uma análise mais detalhada, se faz necessária para o solo em estudo, em termos de DCTC, já que o mesmo apresentou um valor muito pró ximo do valor de fronteira, o que sem dúvida viria confirmar os resultados e conclusões aqui obtidos, através de ensaios de resistência ao cisalhamento triaxial.

Uma análise comparativa dos resultados obtidos no presente trabalho e os encontrados por Ferro (1976), utilizando

do ensaios de resistência CBR, como também, com os apresentados por Queiroz de Carvalho (1979), obtidos através de resistência à compressão simples (RCS), mostram uma divergência nas conclusões quanto à reatividade à cal, para o solo em estudo. Ferro (1976), utilizando o ensaio CBR como parâmetro de avaliação da reatividade à cal de solos lateríticos, conclui que o solo de Nova Floresta é um solo reativo e próprio para bases, na estrutura de pavimento. Por outro lado, Queiroz de Carvalho (1979), apresenta um sistema de avaliação de reatividade à cal dos solos lateríticos, através do parâmetro de reatividade de Thompson, obtido em função do ensaio de RCS, onde conclui que o solo de Nova Floresta é de baixa reatividade. Assim, fica evidenciado o conflito existente entre os resultados por eles apresentados e os por nós obtidos através do ensaio de resistência ao cisalhamento triaxial, o que confirma que, dos critérios de avaliação da reatividade à cal envolvendo processos de resistência mecânica, o ensaio de cisalhamento triaxial, parece ser mais eficiente, embora seja mais trabalhoso e demorado que o CBR e RCS.

Em última análise, conclui-se que o solo de Nova Floresta, objeto deste estudo, com base nos resultados obtidos neste trabalho, parece ser um solo não reativo à cal.

FIGURAS DO CAPÍTULO VI

GRANULOMETRIA

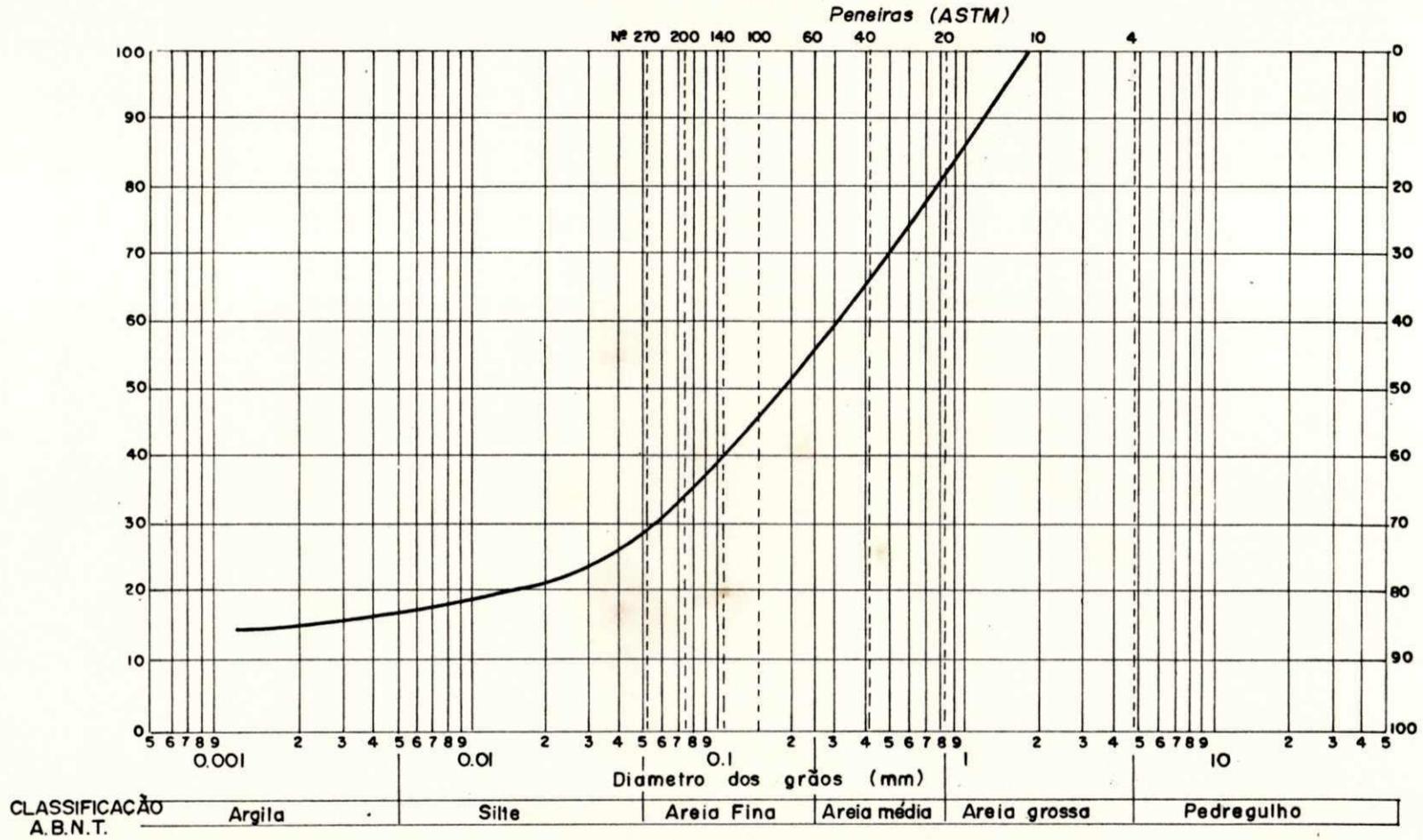


FIGURA 6.1

GRANULOMETRIA DO MATERIAL PENEIRADO

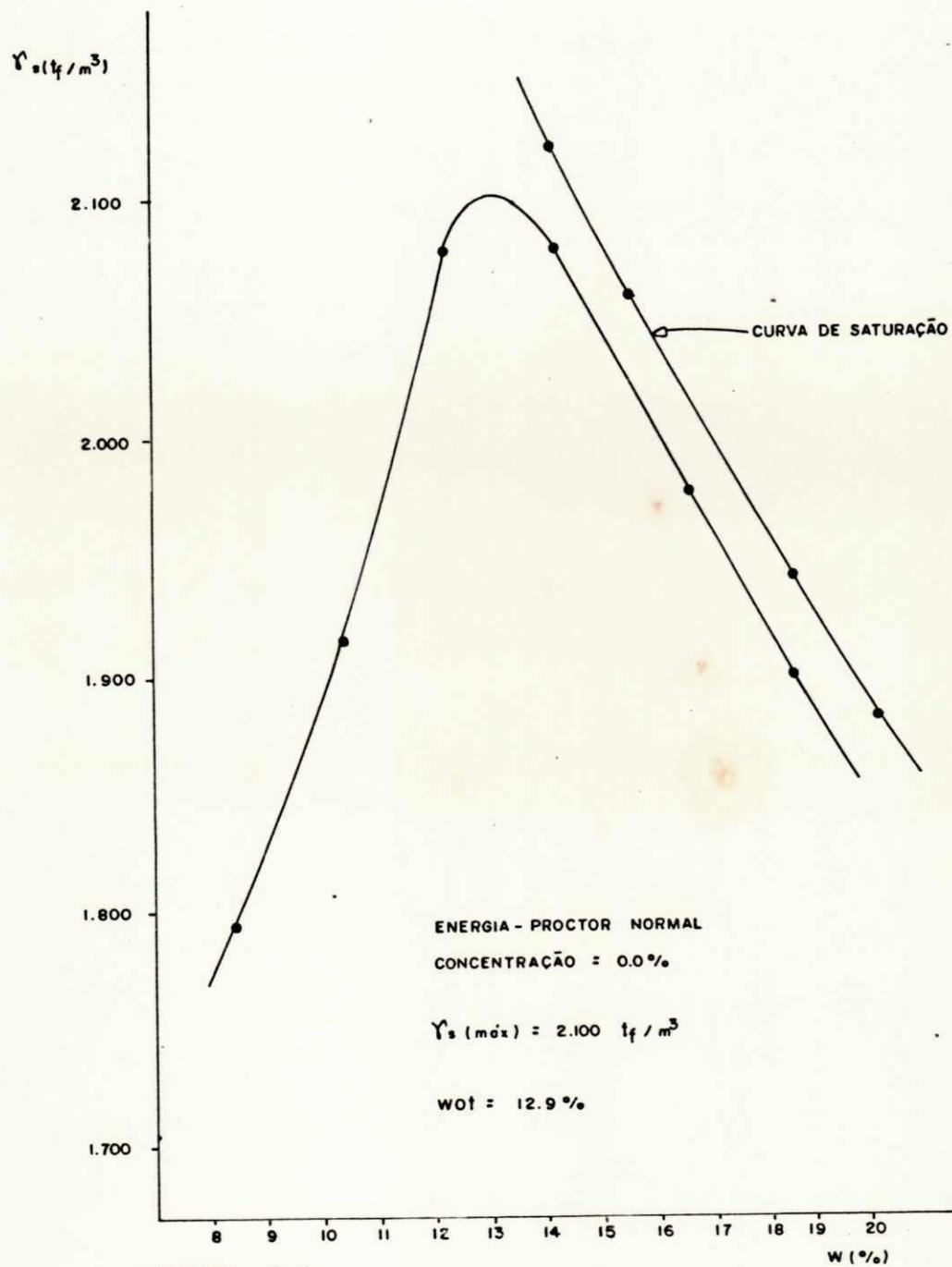


FIGURA 6.2
CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO NATURAL

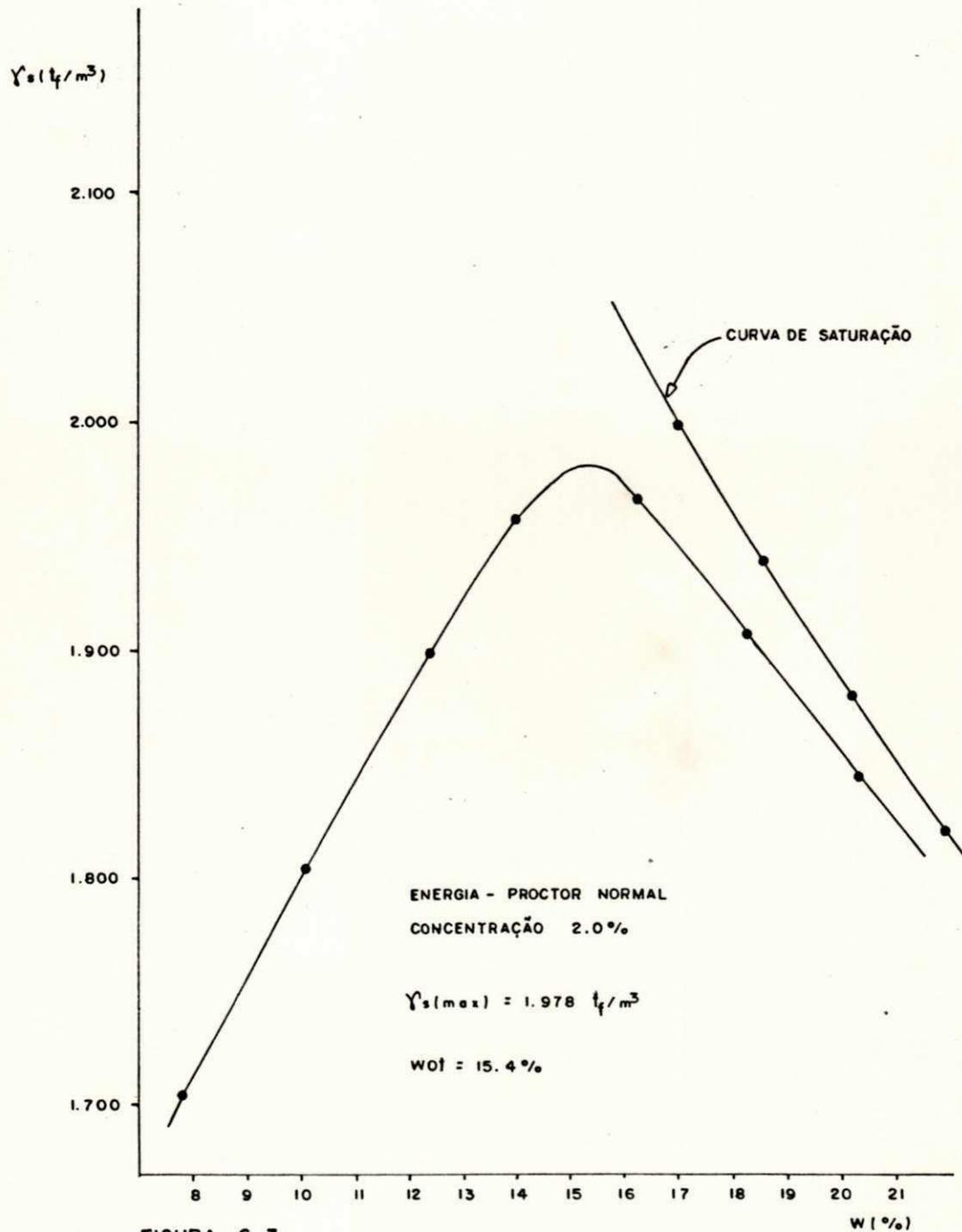


FIGURA 6.3
CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO-CAL - (2.0%)

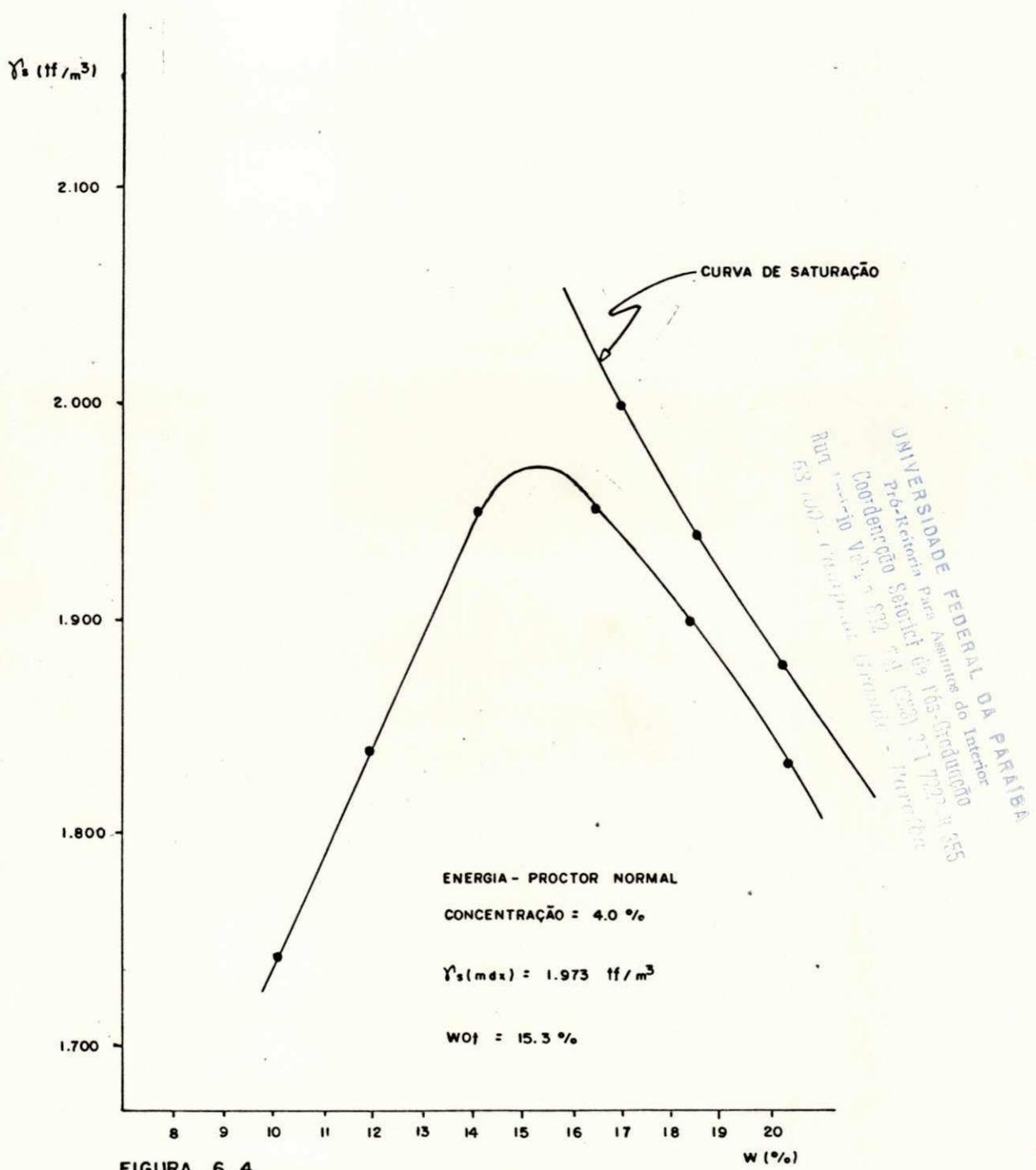


FIGURA 6.4
CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO-CAL (4.0%)

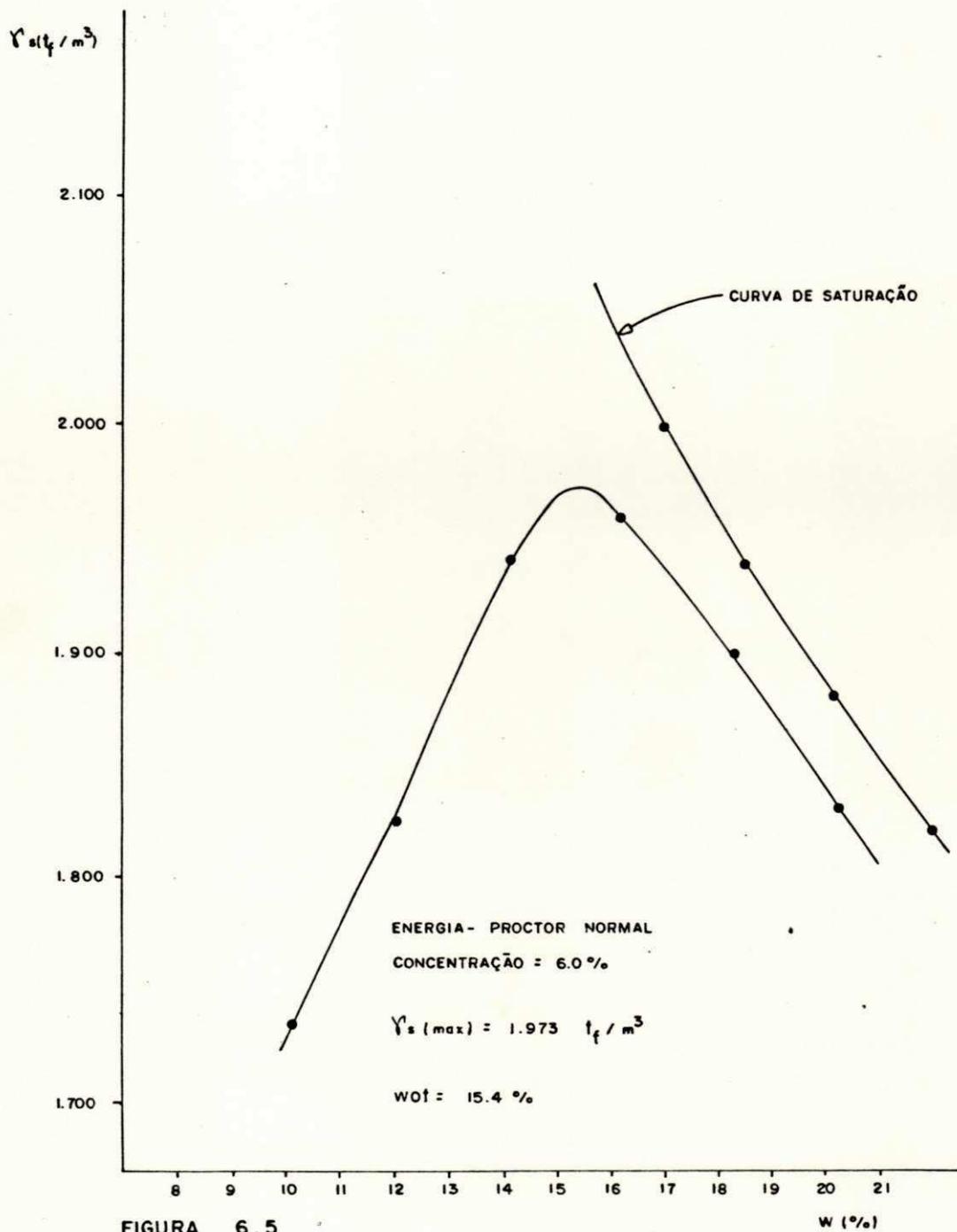


FIGURA 6.5
 CURVA DE COMPACTAÇÃO PARA O SOLO-CAL -(6.0%)

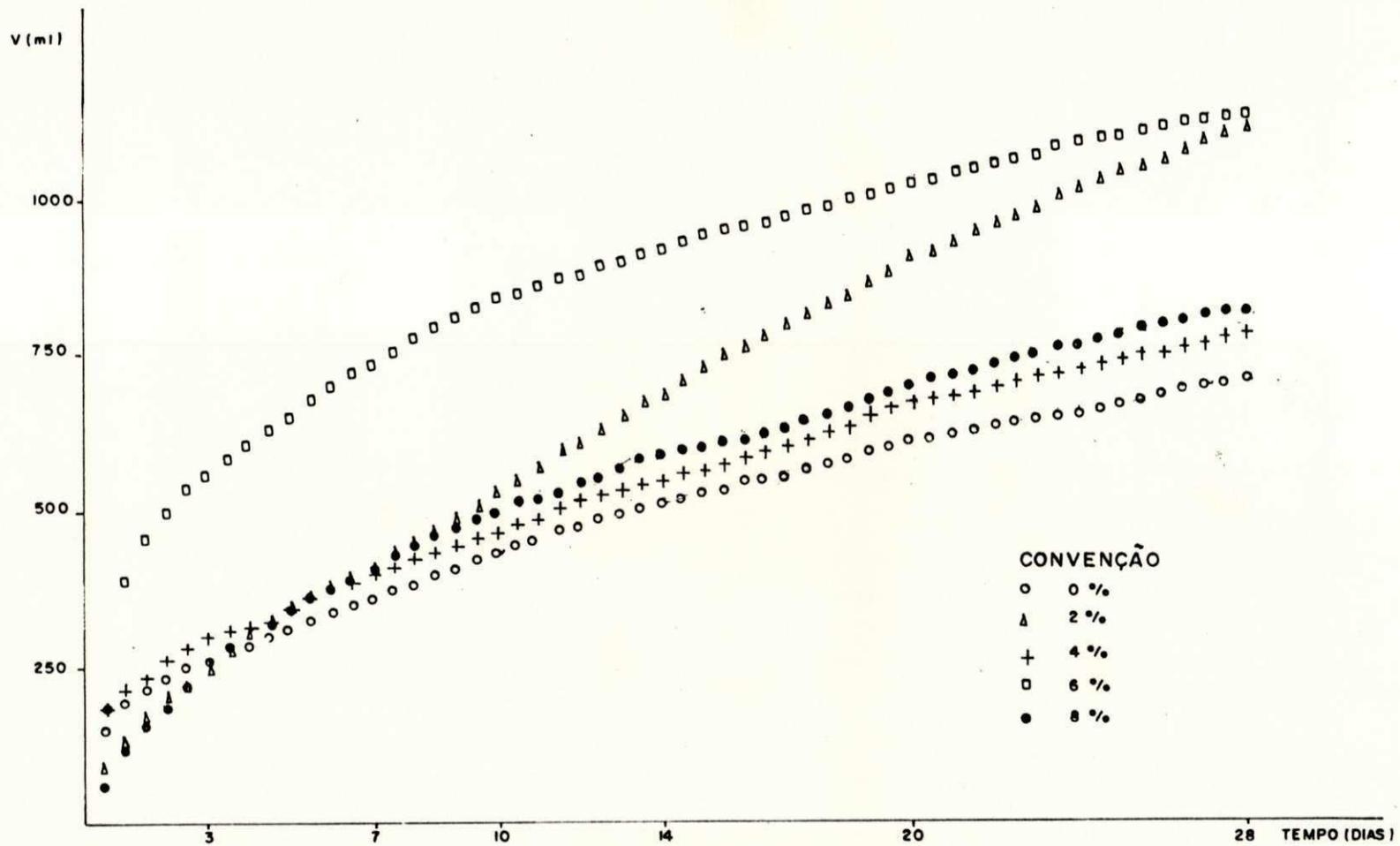


FIGURA 6.6
 CURVA DE TEMPO DE PERCOLAÇÃO x VAZÃO ACUMULADA, PARA O SOLO NATURAL E PARA O SOLO-CAL
 NAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES - 7 DIAS DE CURA

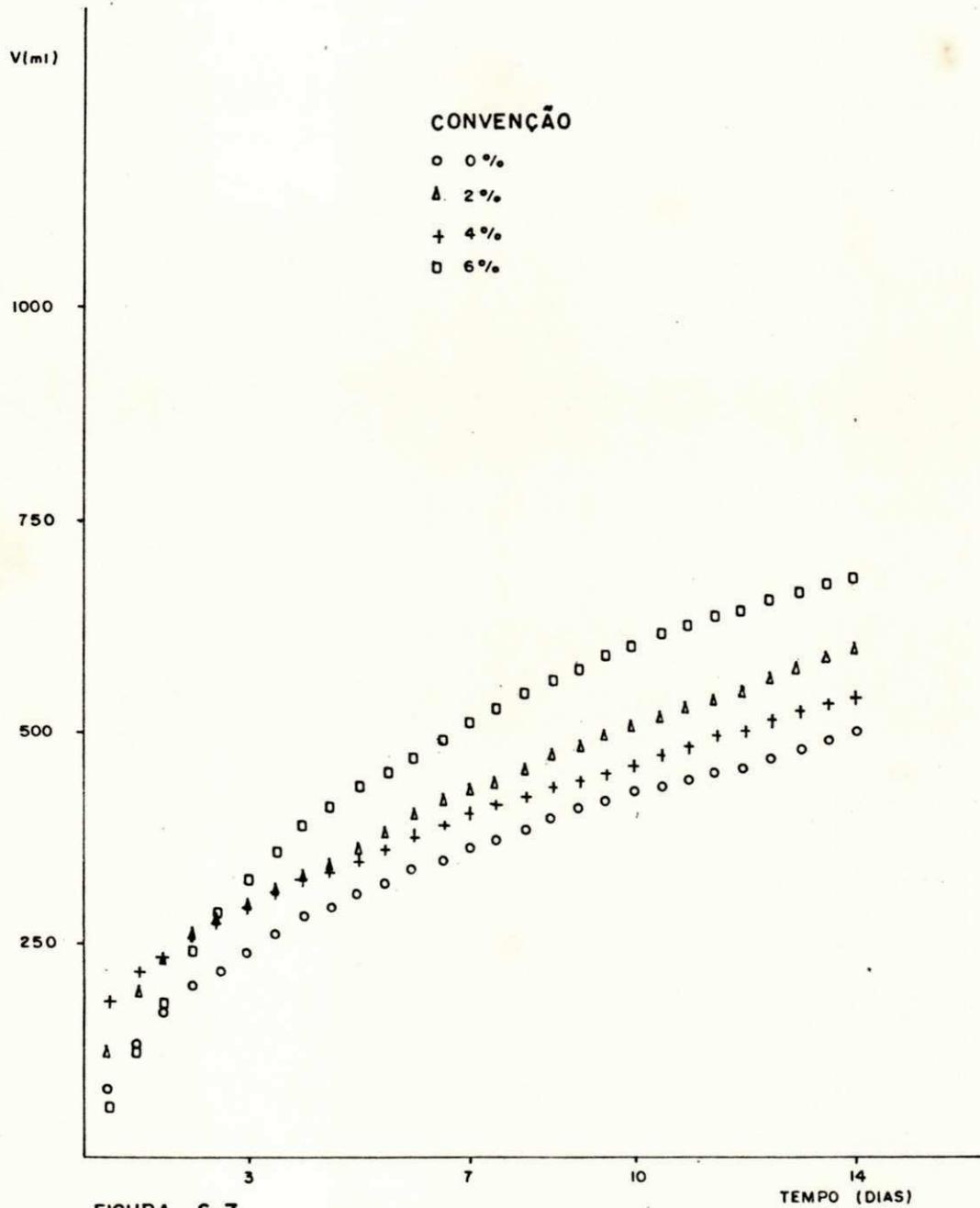


FIGURA 6.7

CURVAS DE TEMPO DE PERCOLAÇÃO x VAZÃO ACUMULADA, PARA O SOLO NATURAL E PARA O SOLO-CAL NAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES 14 DIAS DE CURA

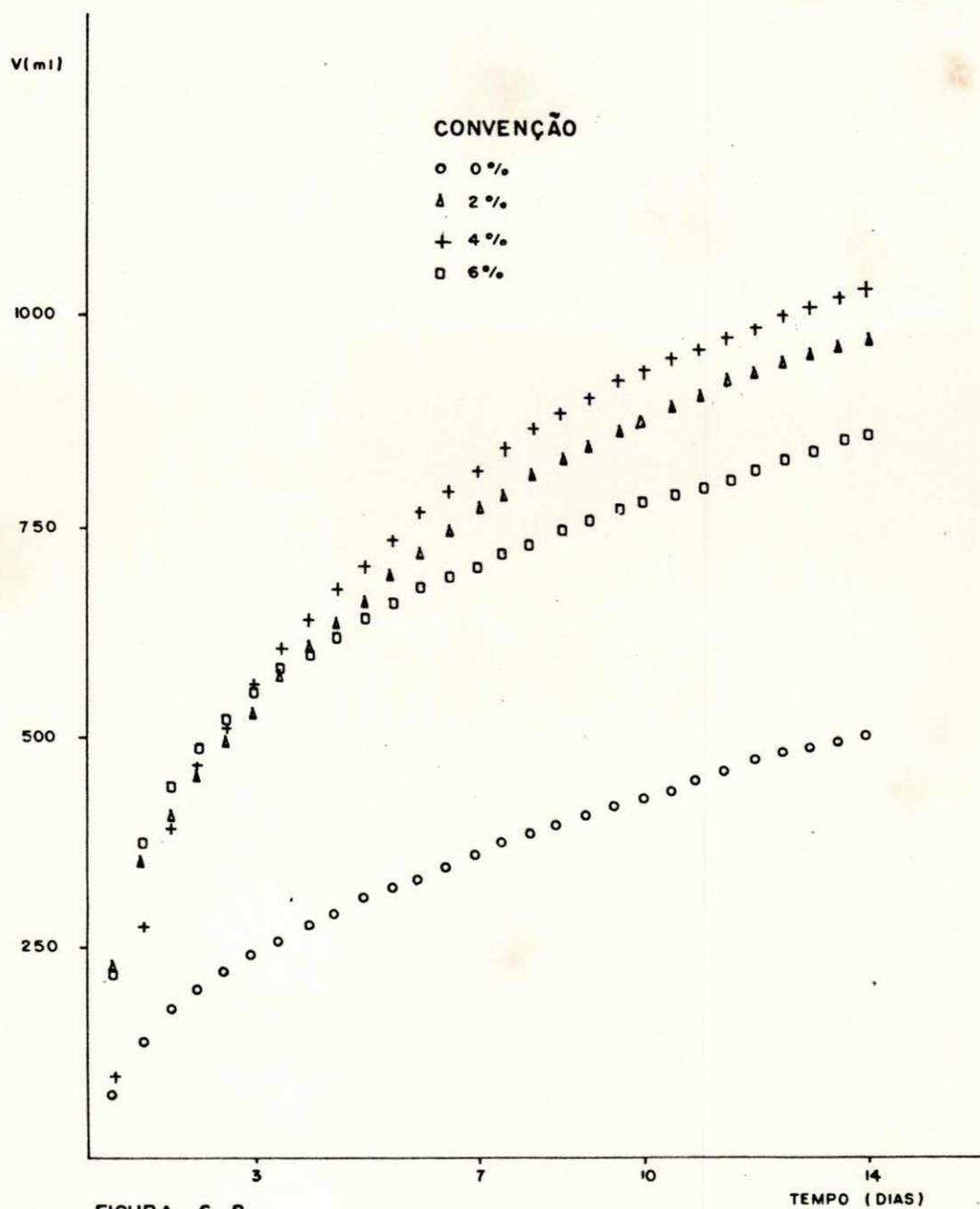


FIGURA 6.8

CURVAS DE TEMPO DE PERCOLAÇÃO x VAZÃO ACUMULADA, PARA O SOLO NATURAL E PARA O SOLO-CAL NAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES 28 DIAS DE CURA

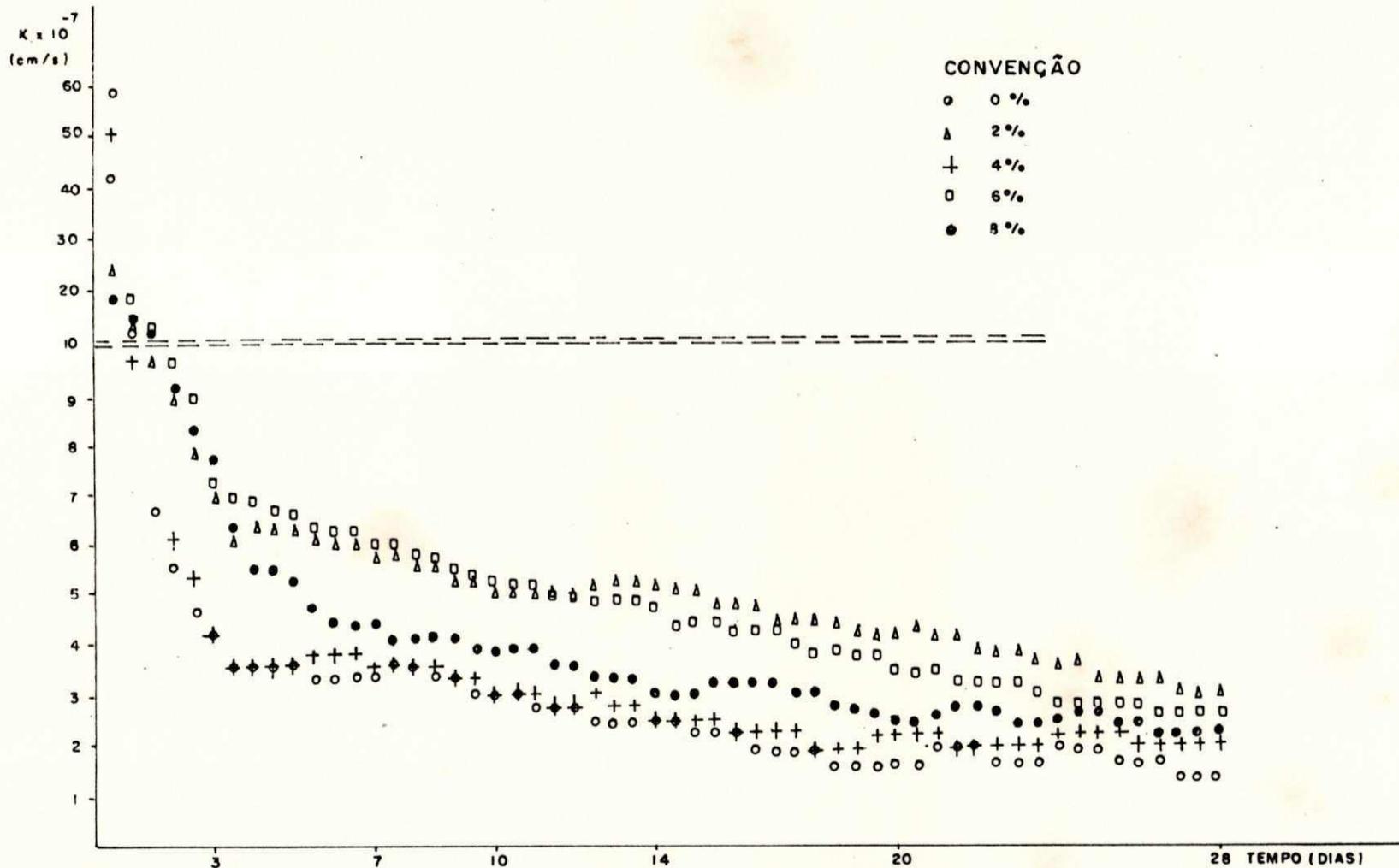
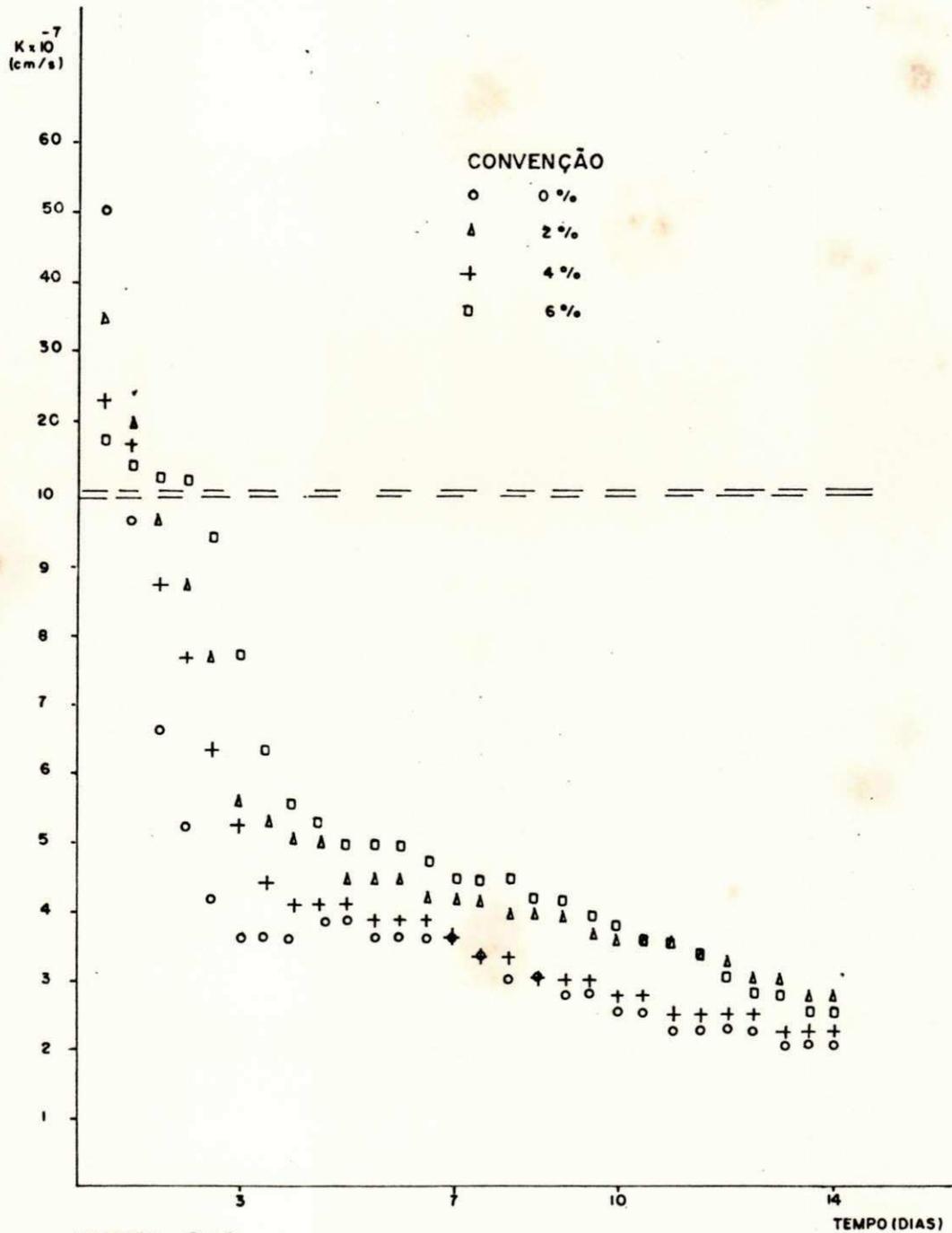


FIGURA 6.9
 CURVA DE TEMPO DE PERCOLAÇÃO x COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, PARA O SOLO NATURAL E PARA O SOLO-CAL NAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES - 7 DIAS DE CURA



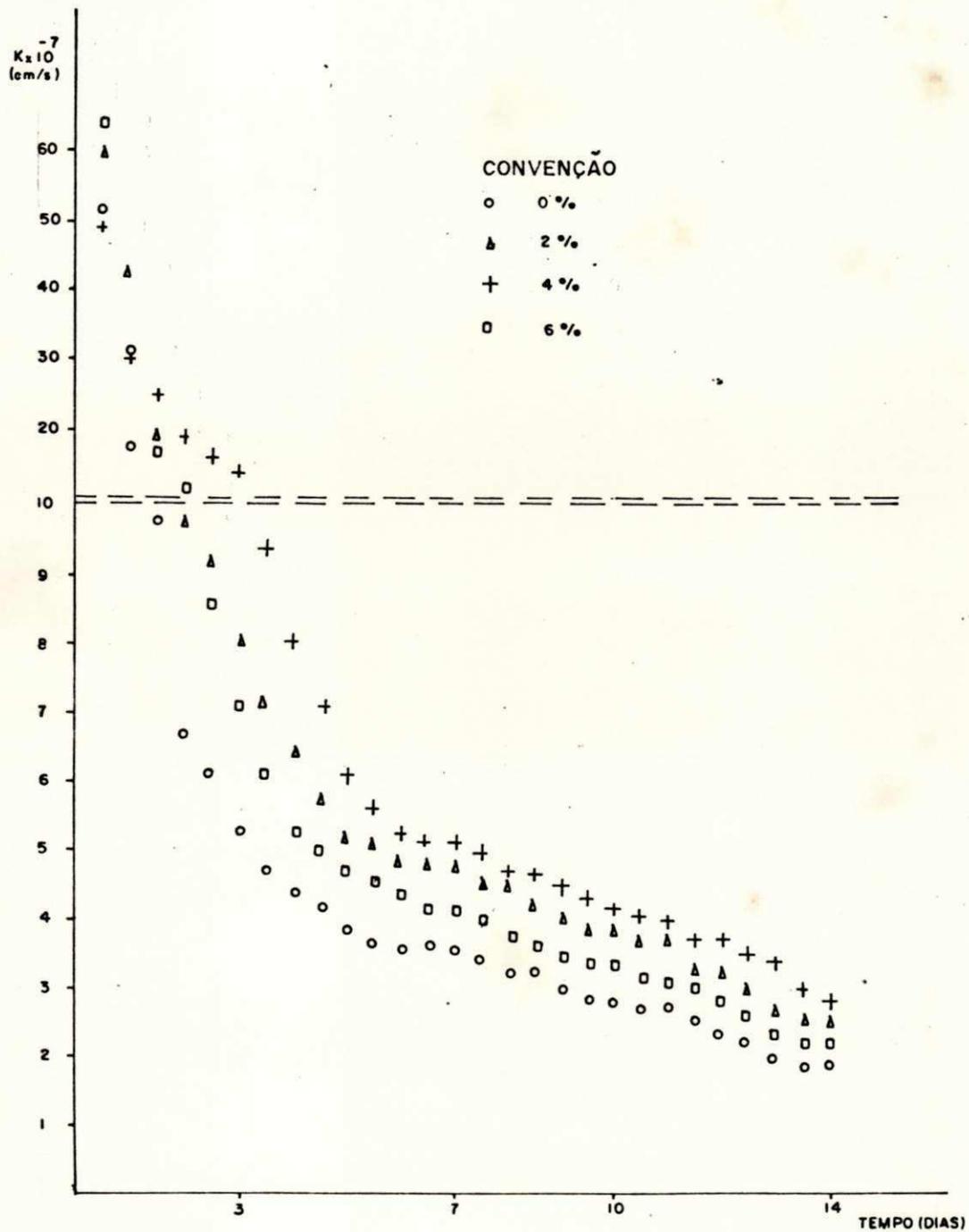


FIGURA 6.11

CURVA DE TEMPO DE PERCOLAÇÃO x COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE, PARA O SOLO NATURAL E O SOLO-CAL NAS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES-28 DIAS DE CURA.

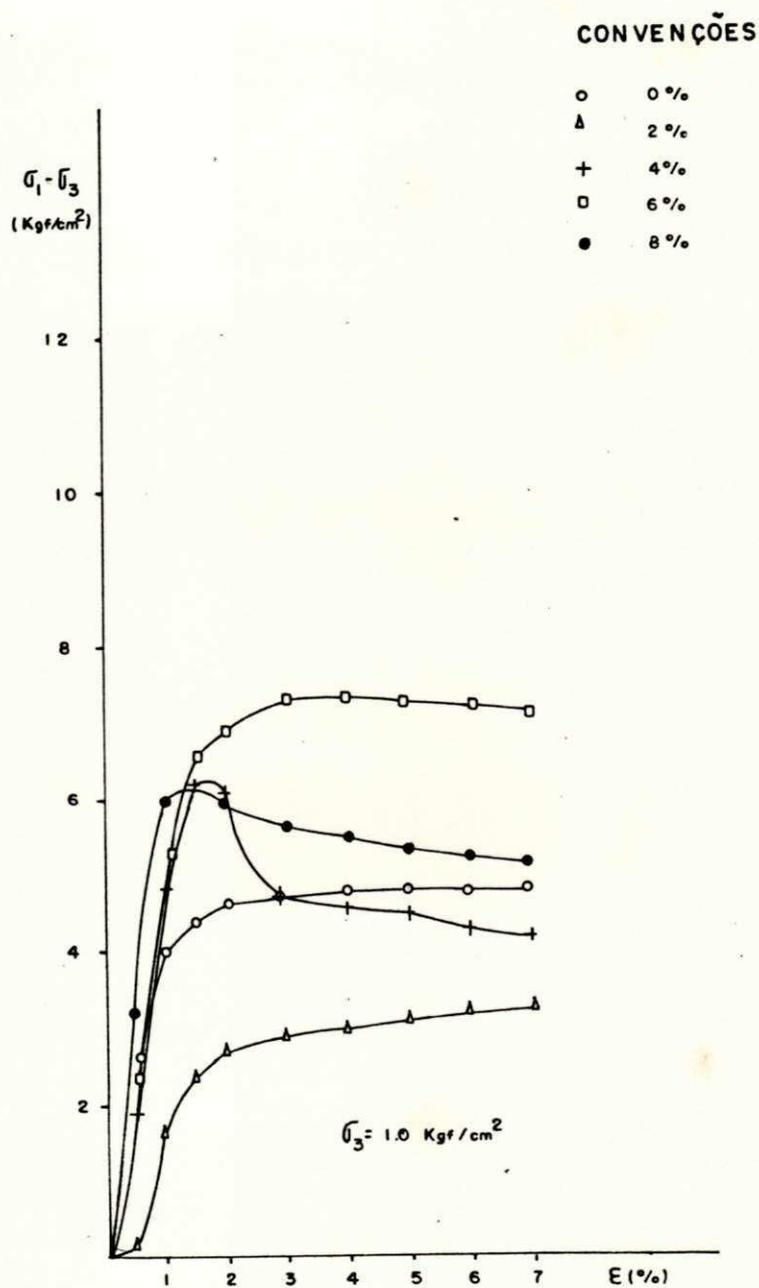


FIGURA 6.12

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 7 DIAS DE CURA
E O DIA DE PERCOLAÇÃO

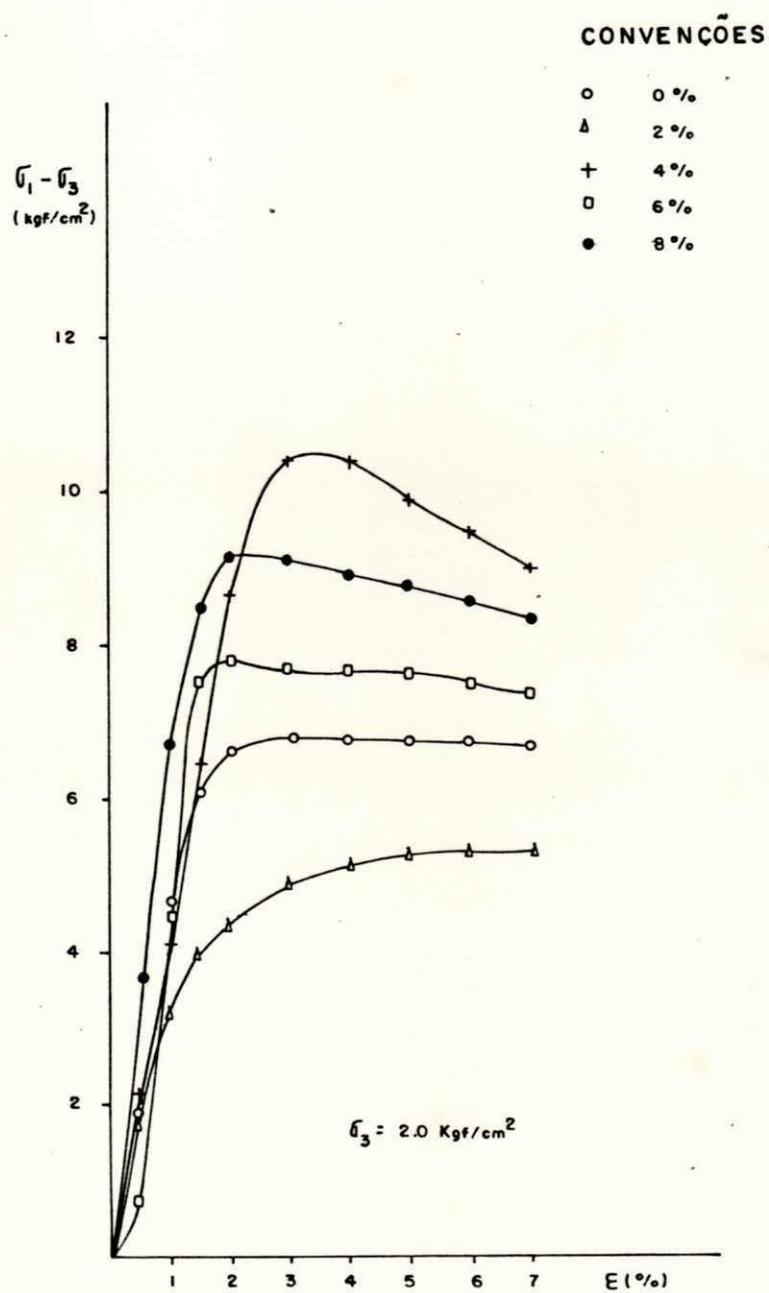


FIGURA 6.13

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 7 DIAS DE CURA
E O DIA DE PERCOLAÇÃO

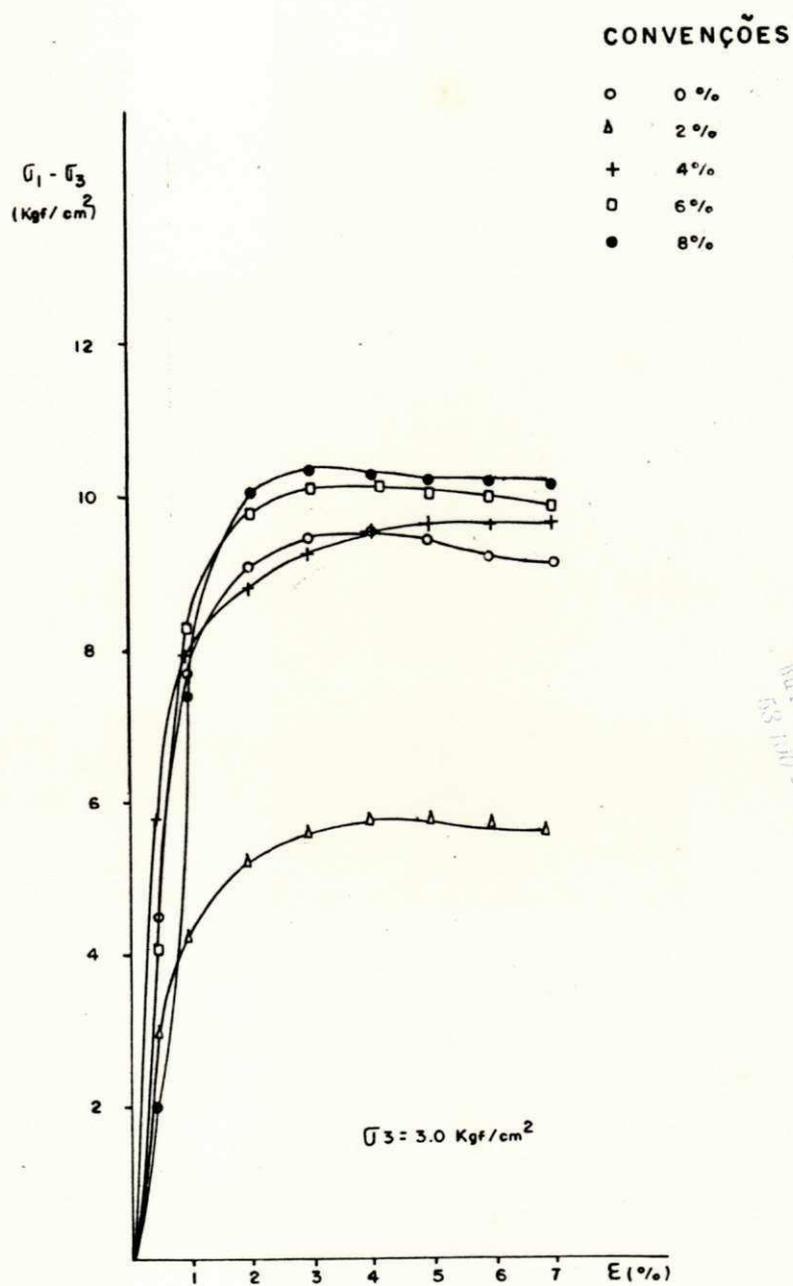


FIGURA 6.14

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 7 DIAS DE CURA
E O DIA DE PERCOLAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Prof. Rectoria Para Assuntos do Interior
 Caixa de Correio Setorial de Pós-Graduação
 Rua João Vitorino 899 - 1º andar - 51722-2
 Rua 170 - 1º andar - 51722-2 - Paraíba

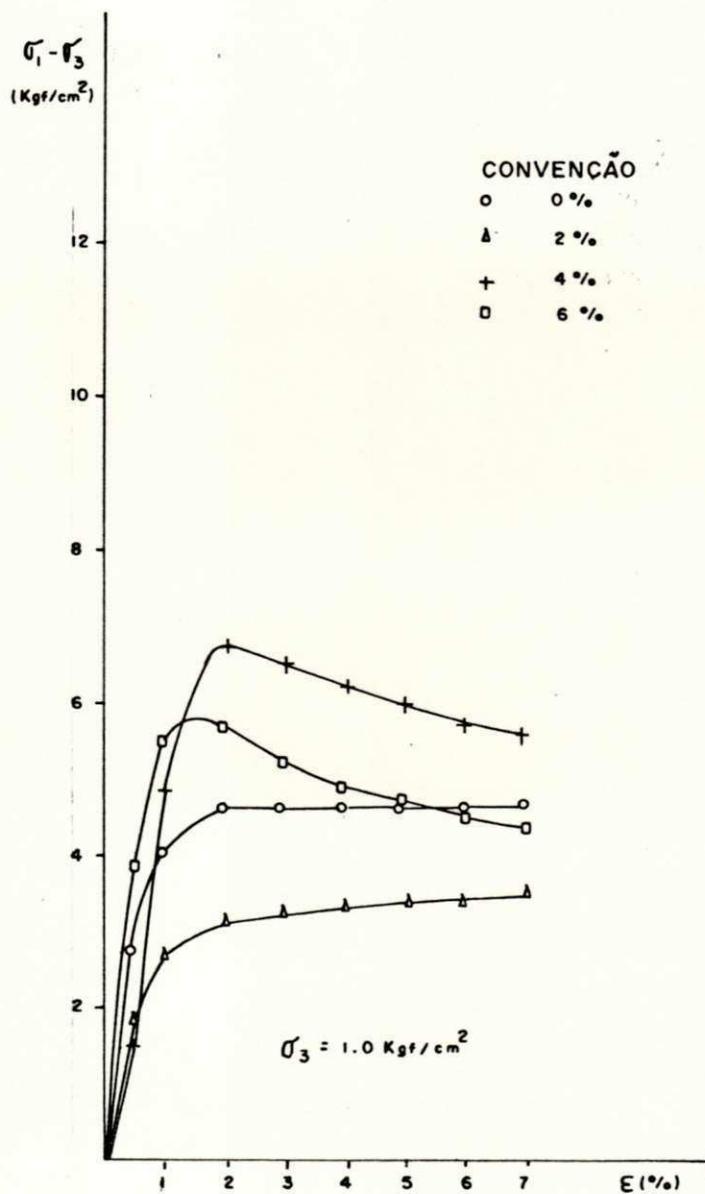


FIGURA 6.15

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIADOR, PARA 14 DIAS
 DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

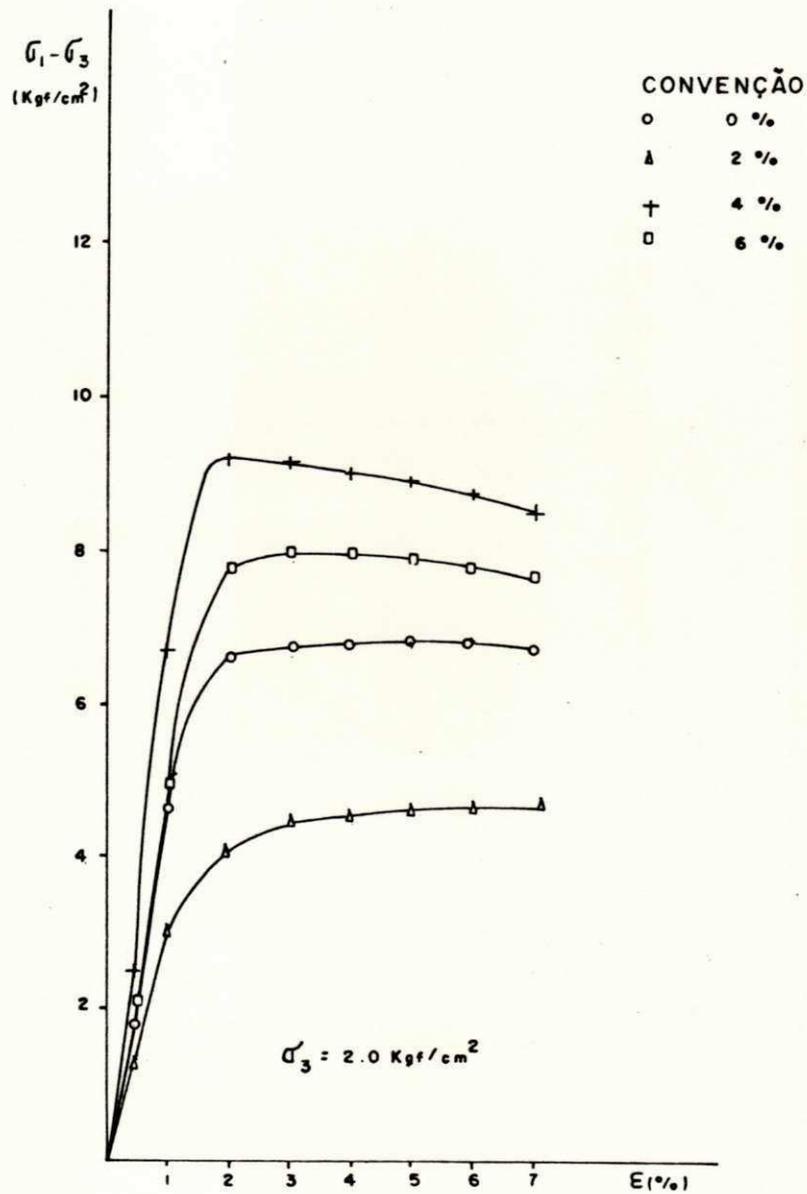


FIGURA 6.16

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIADOR, PARA 14 DIAS
 DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

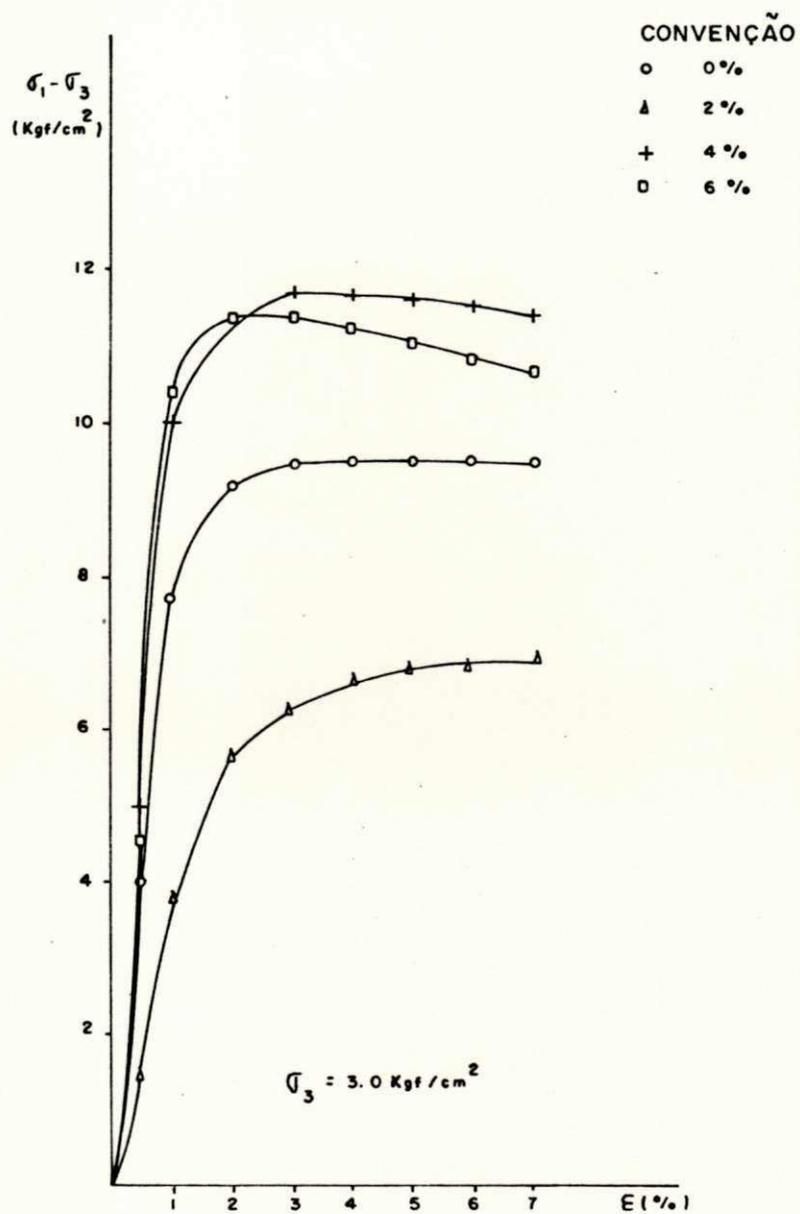


FIGURA 6.17

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIADOR, PARA 14 DIAS DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

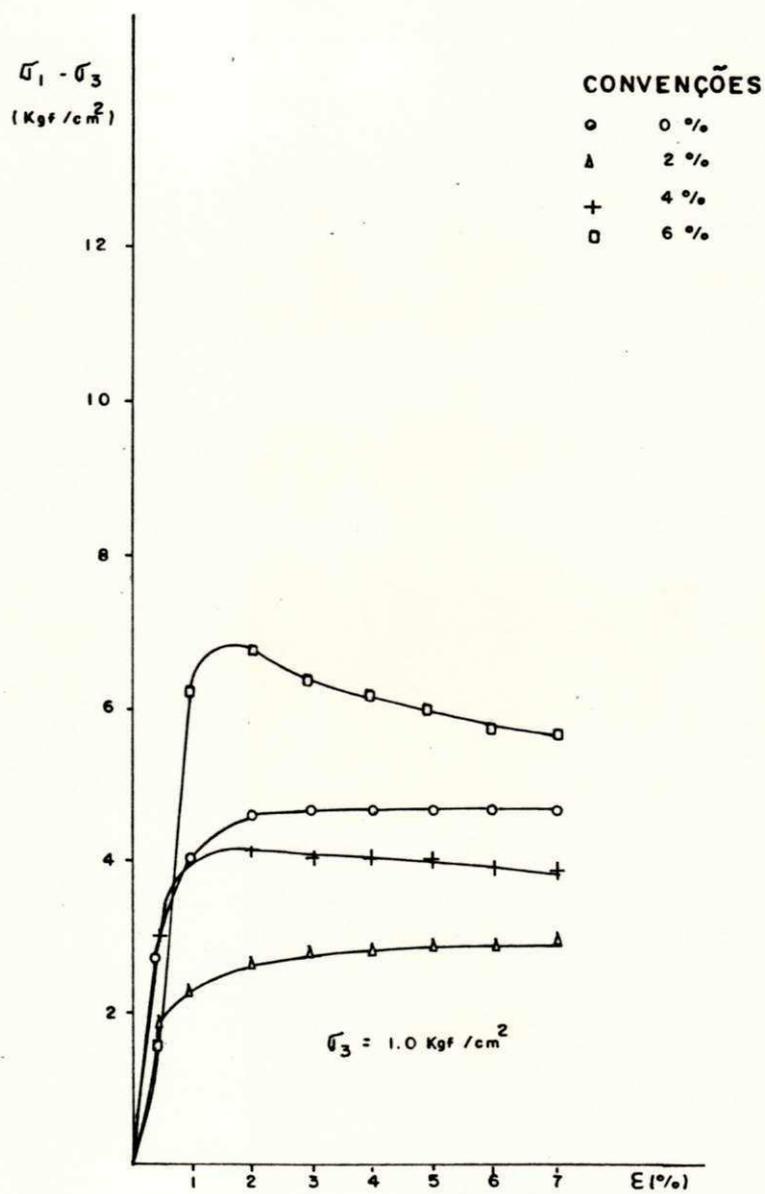


FIGURA 6.18

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

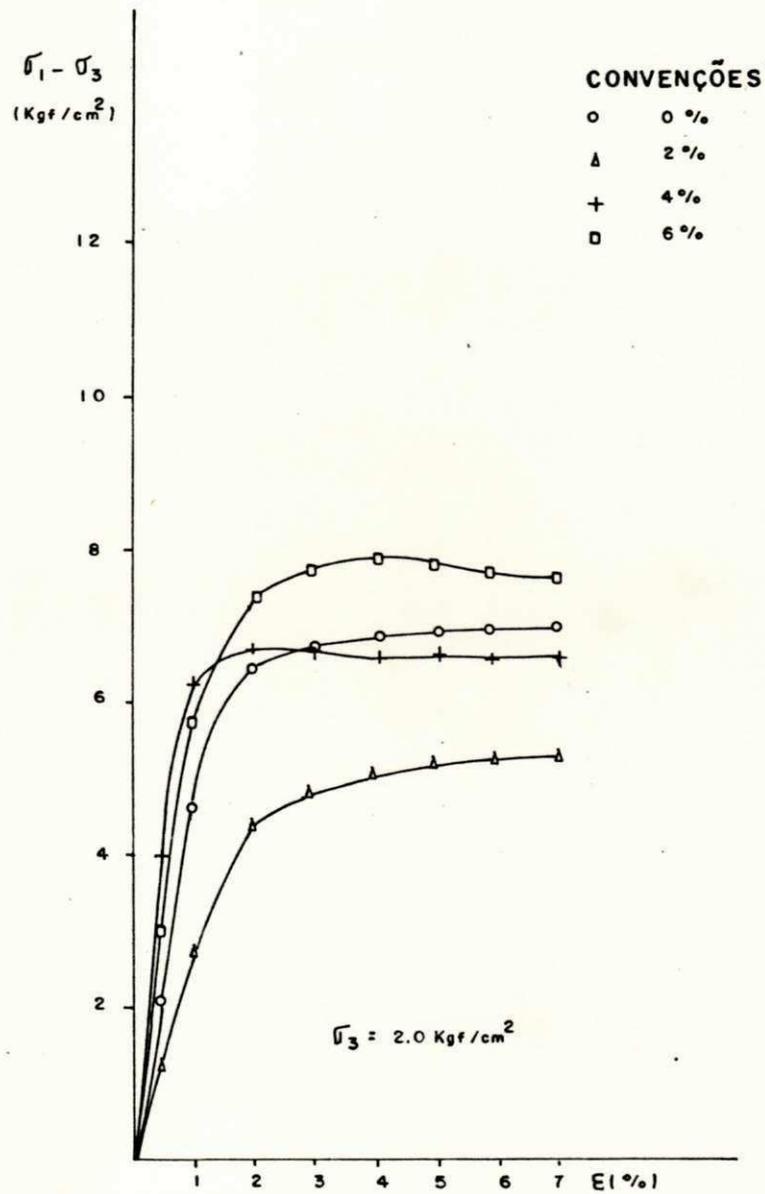


FIGURA 6.19

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

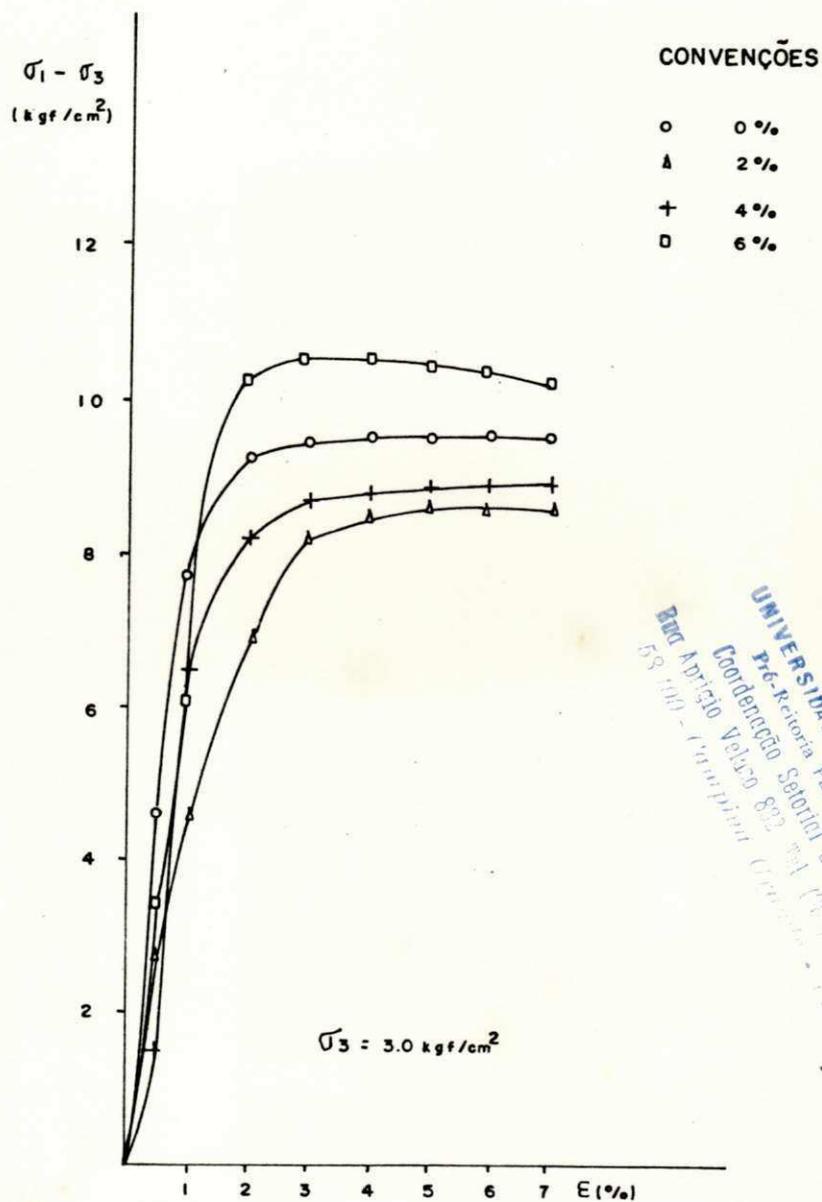


FIGURA 6.20

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

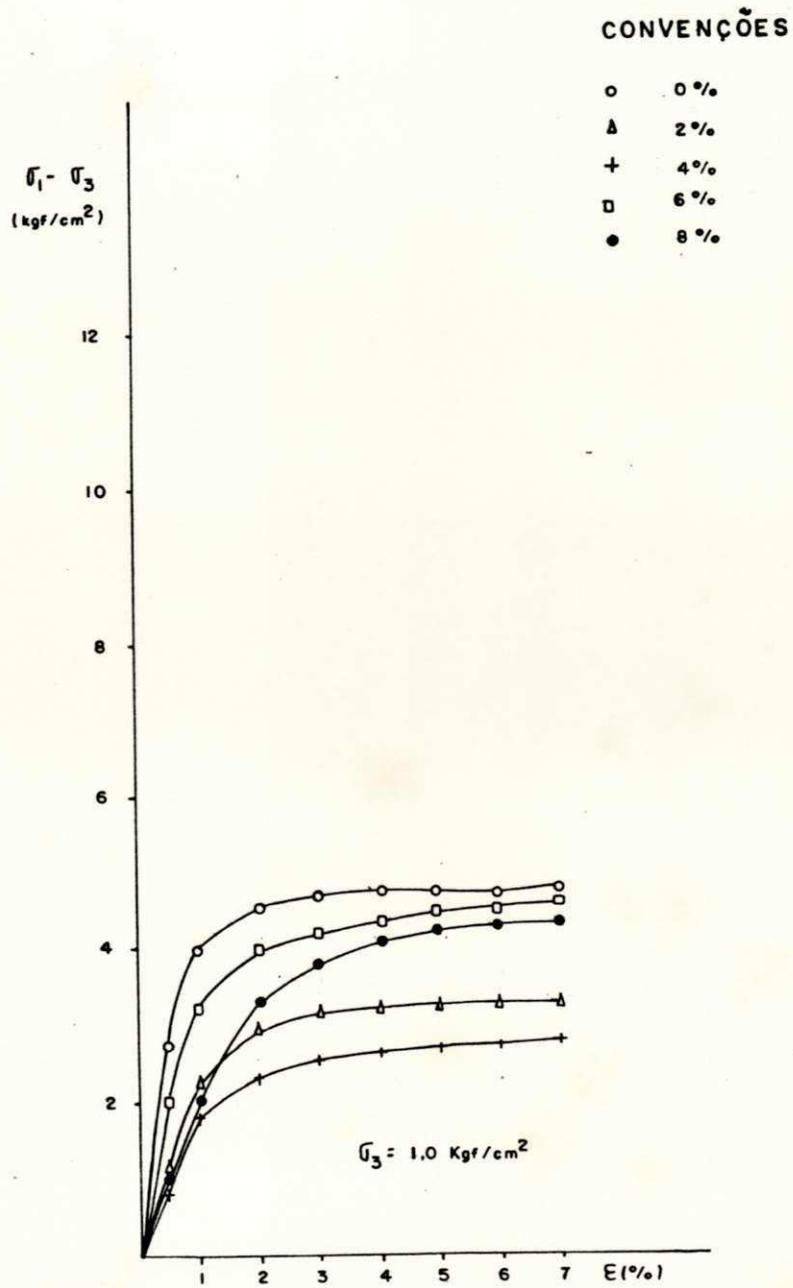


FIGURA 6.21

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 7 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

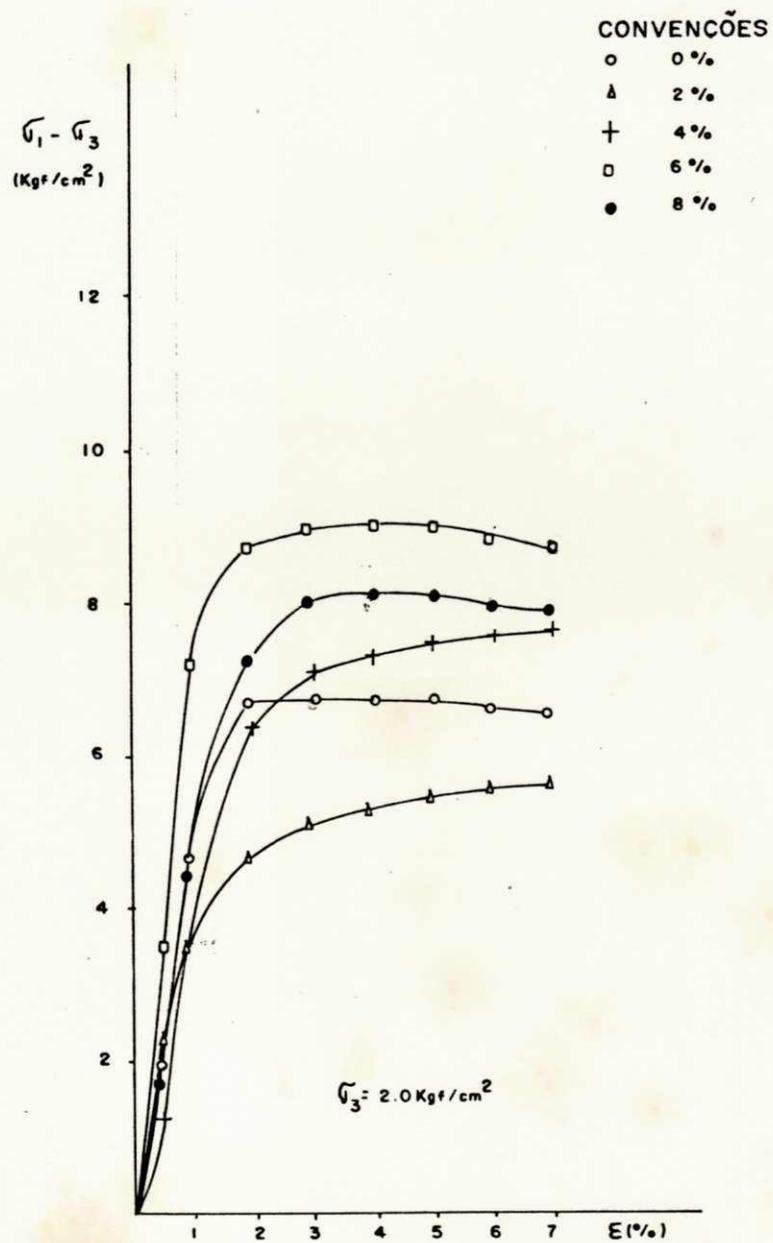


FIGURA 6.22

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIADOR, PARA 7 DIAS DE CURA E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

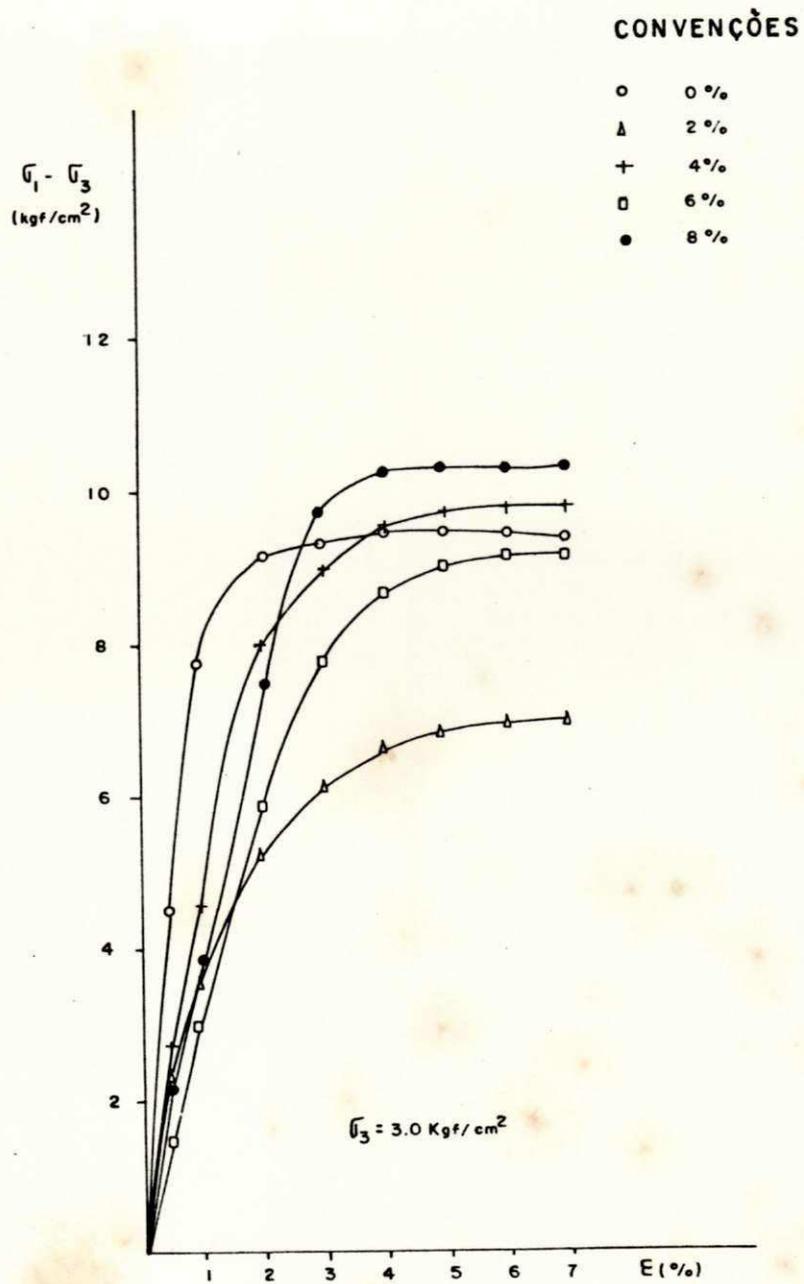


FIGURA 6.23

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 7 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

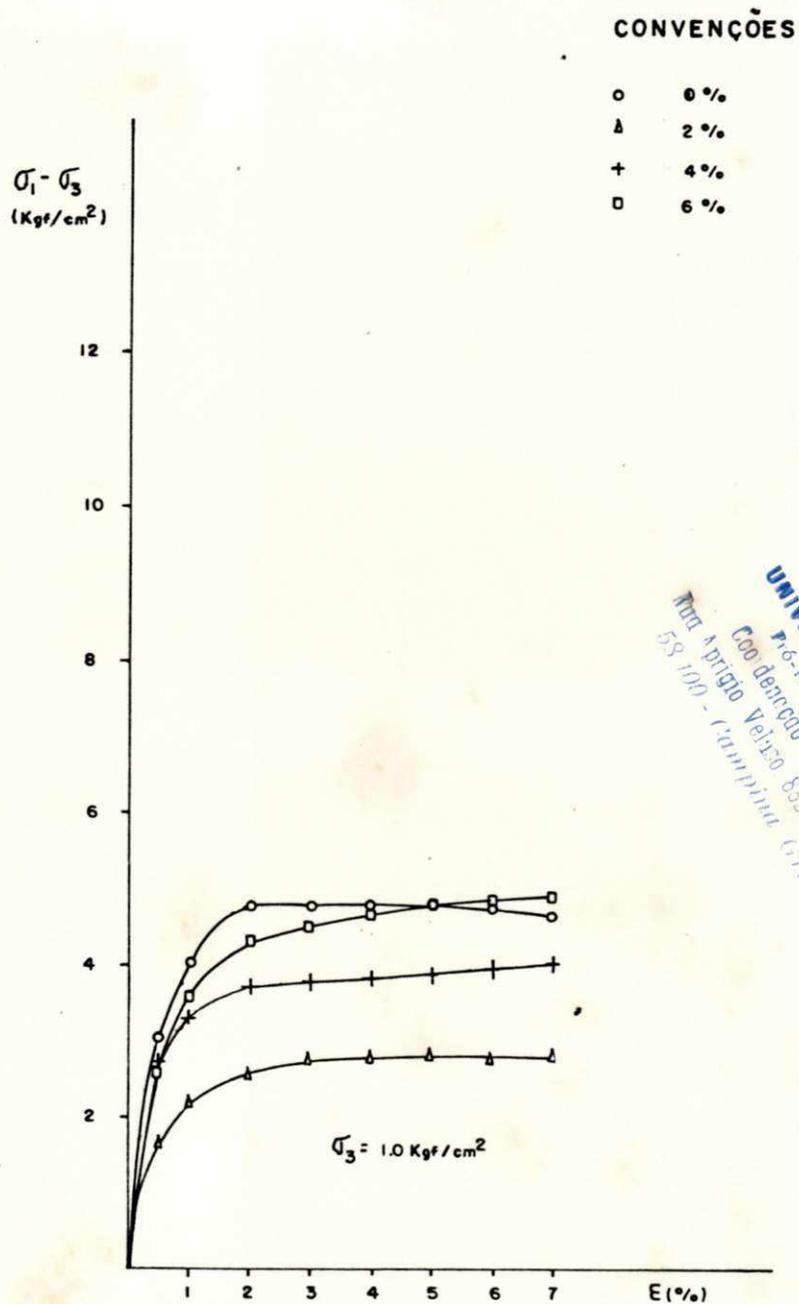


FIGURA 6.24

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 14 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso 882 Tel (083) 321 7222 - R. 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

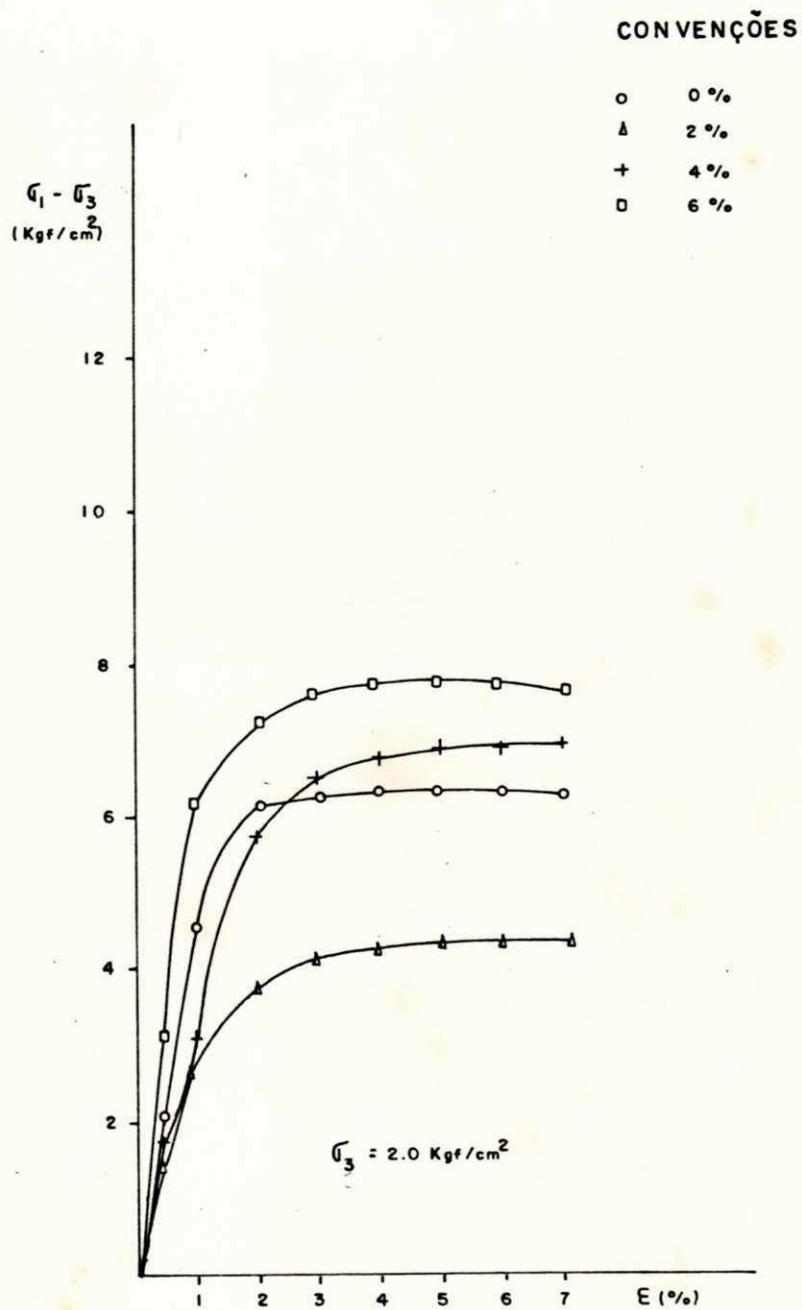


FIGURA 6.25

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 14 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

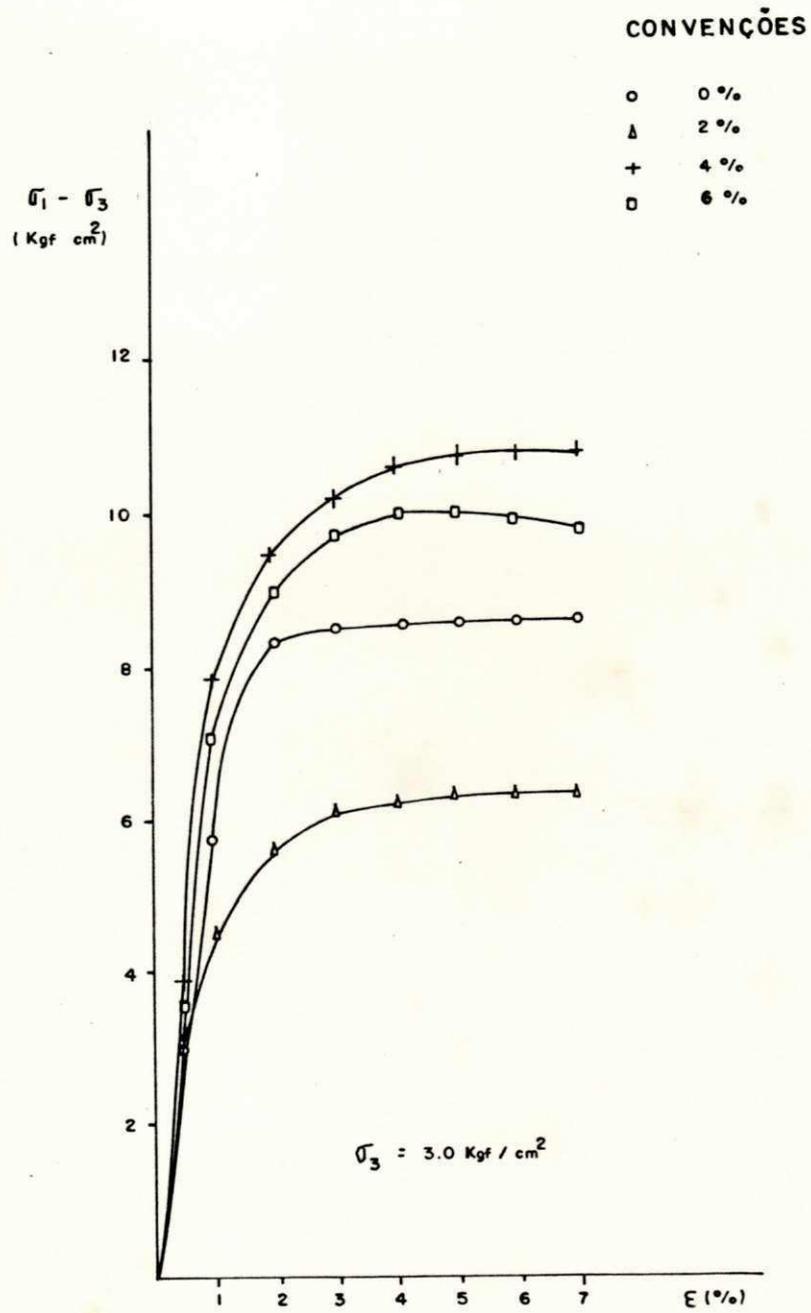


FIGURA 6.26

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 14 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

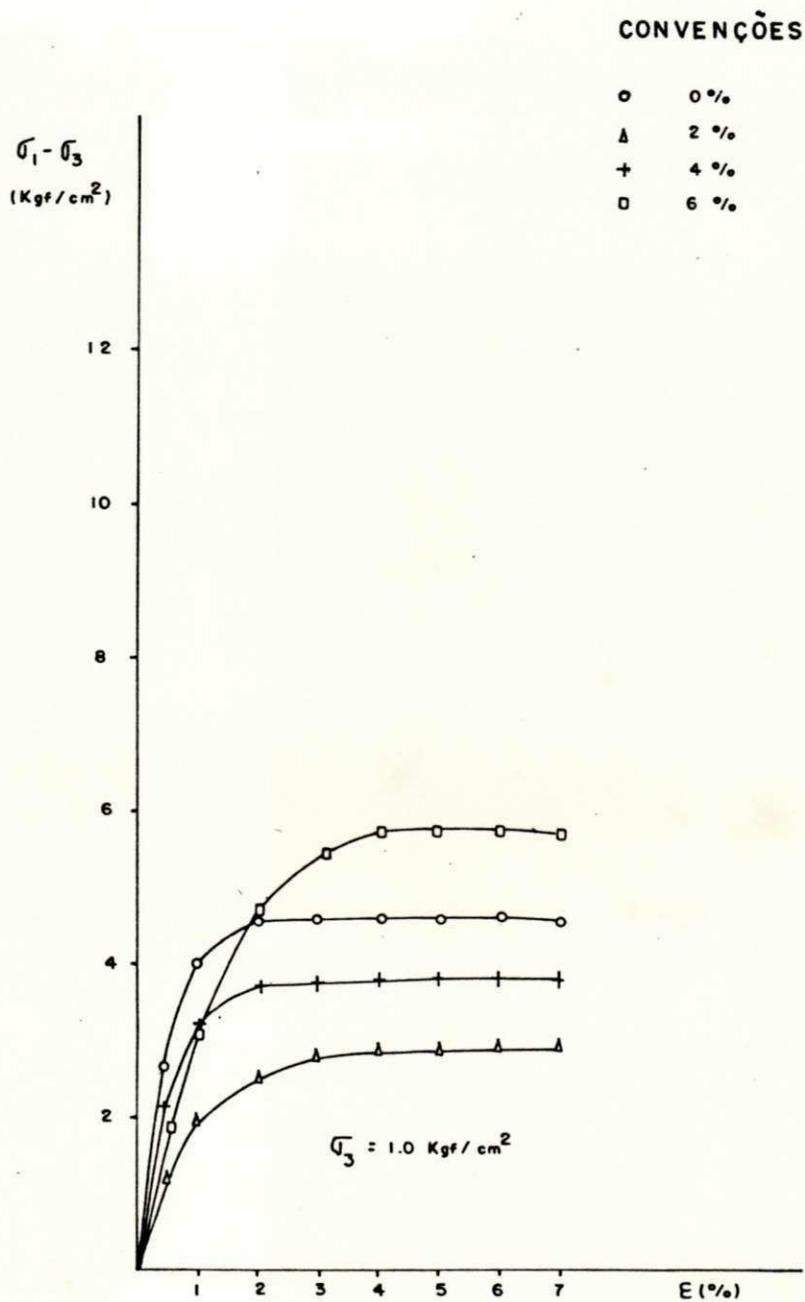


FIGURA 6. 27

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

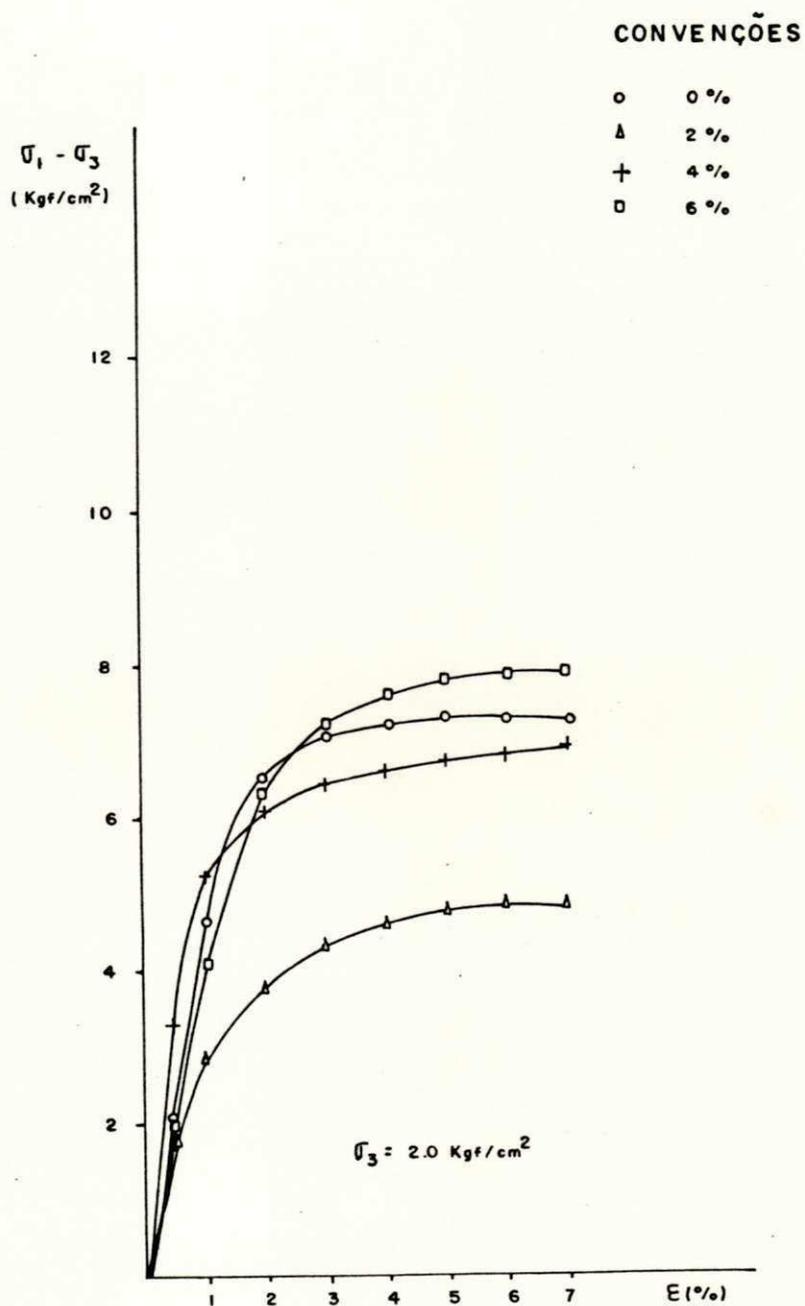


FIGURA 6.28

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

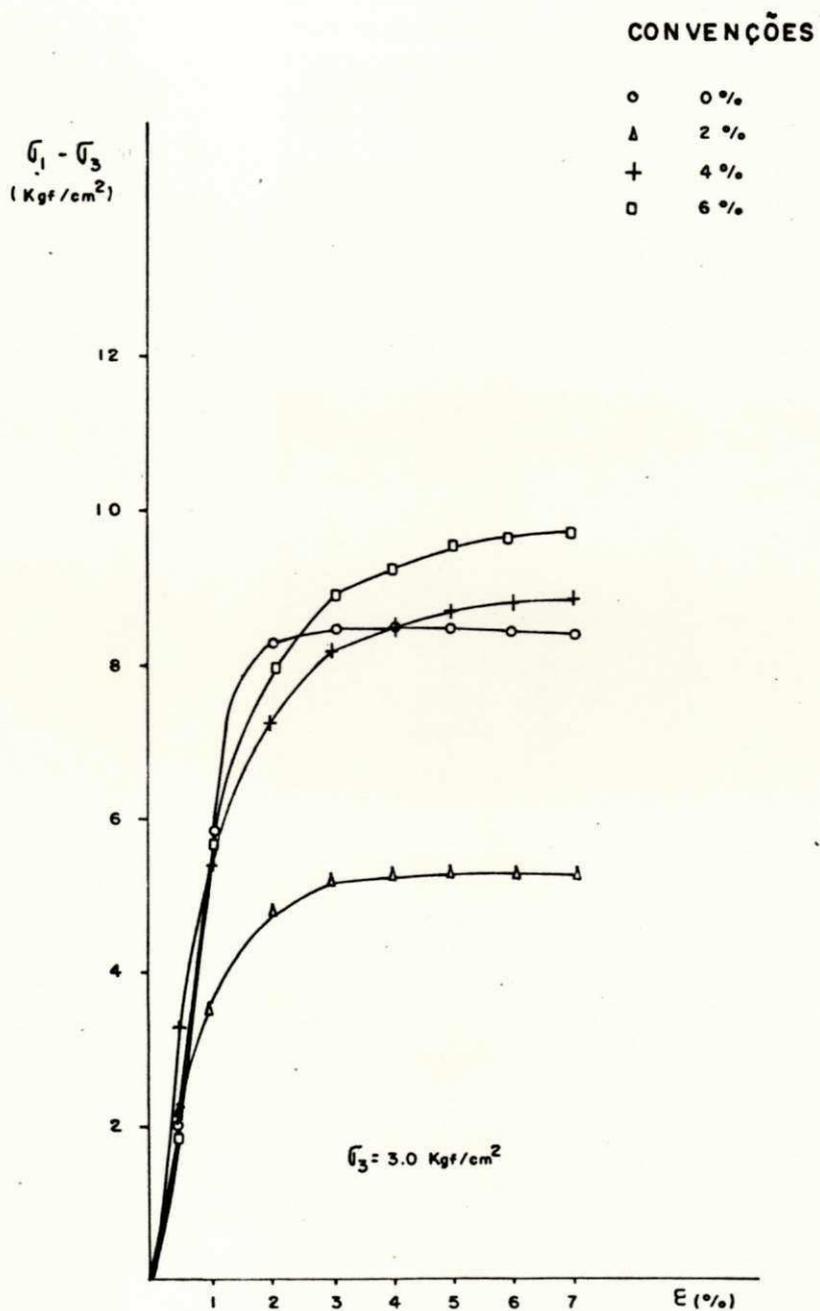


FIGURA 6.29

CURVA DEFORMAÇÃO AXIAL x DEVIATOR, PARA 28 DIAS DE CURA
E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

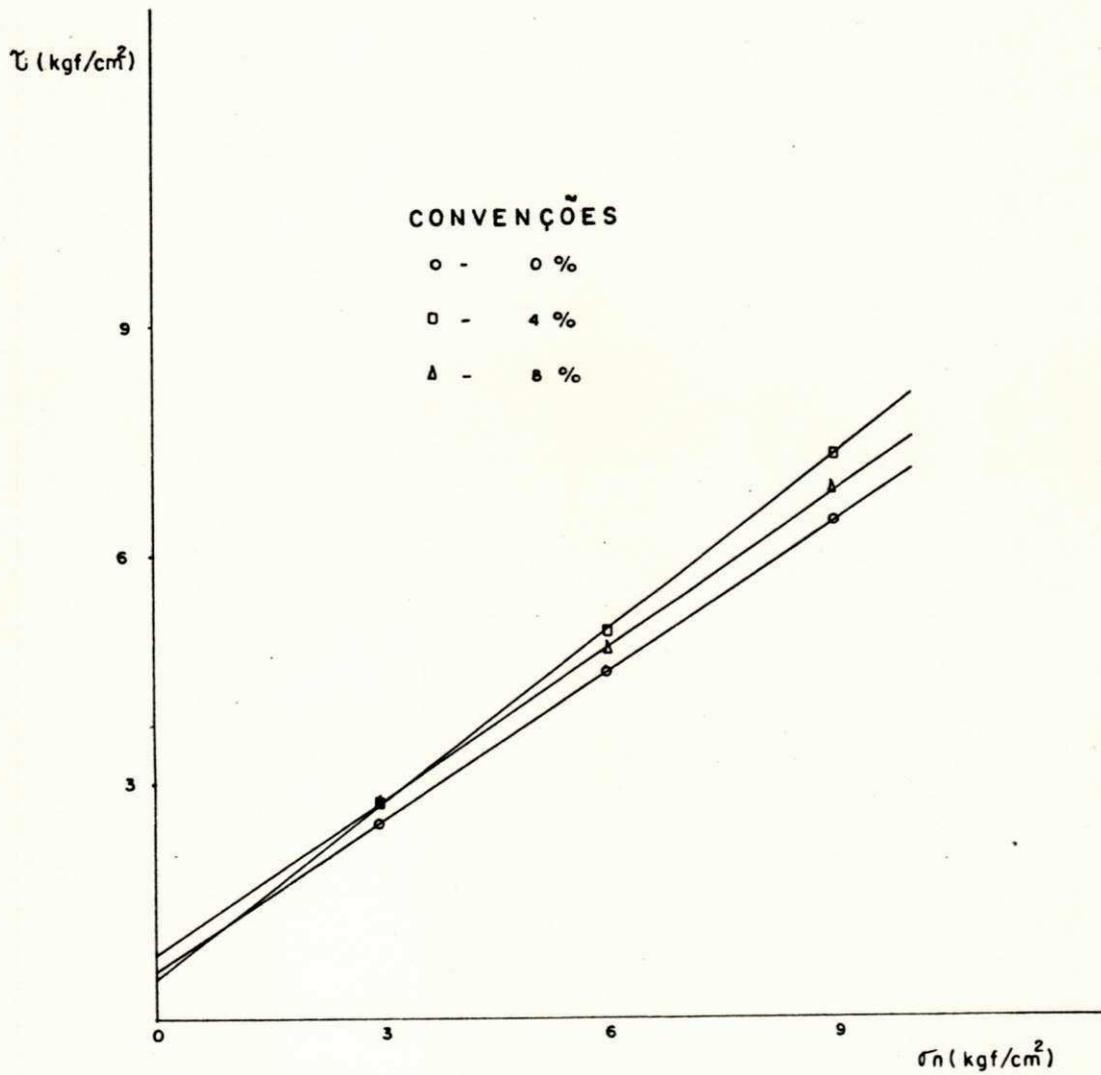


FIGURA- 6.30
TENSÃO NORMAL TOTAL x TENSÃO DE CISALHAMENTO PARA 7
DIAS DE CURA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

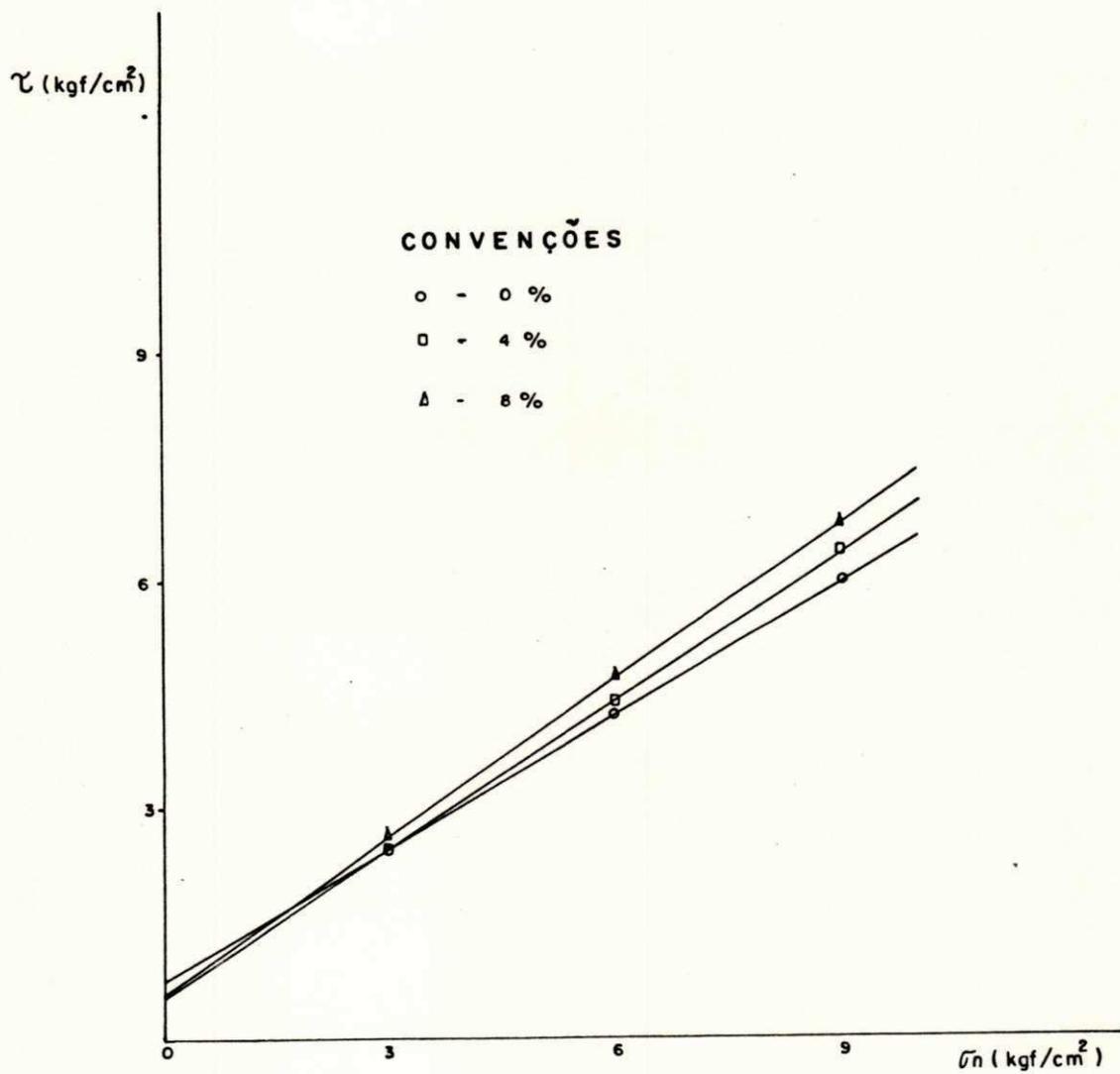


FIGURA - 6.31

TENSÃO NORMAL TOTAL x TENSÃO DE CISALHAMENTO PARA 7 DIAS DE CURA E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

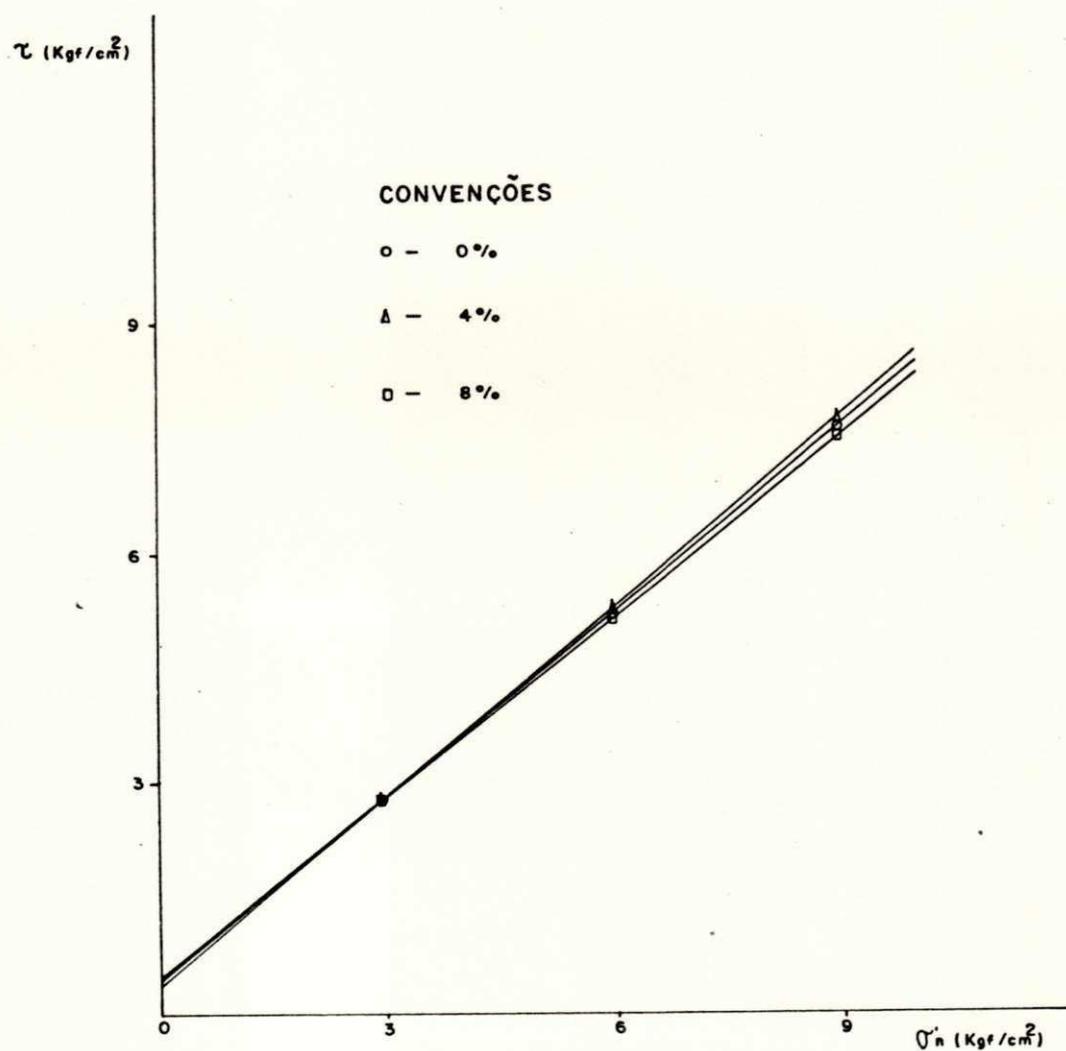


FIGURA - 6.32

TENSÃO NORMAL EFETIVA x TENSÃO DE CISCALHAMENTO PARA 7 DIAS DE CURVA E O DIA DE PERCOLAÇÃO

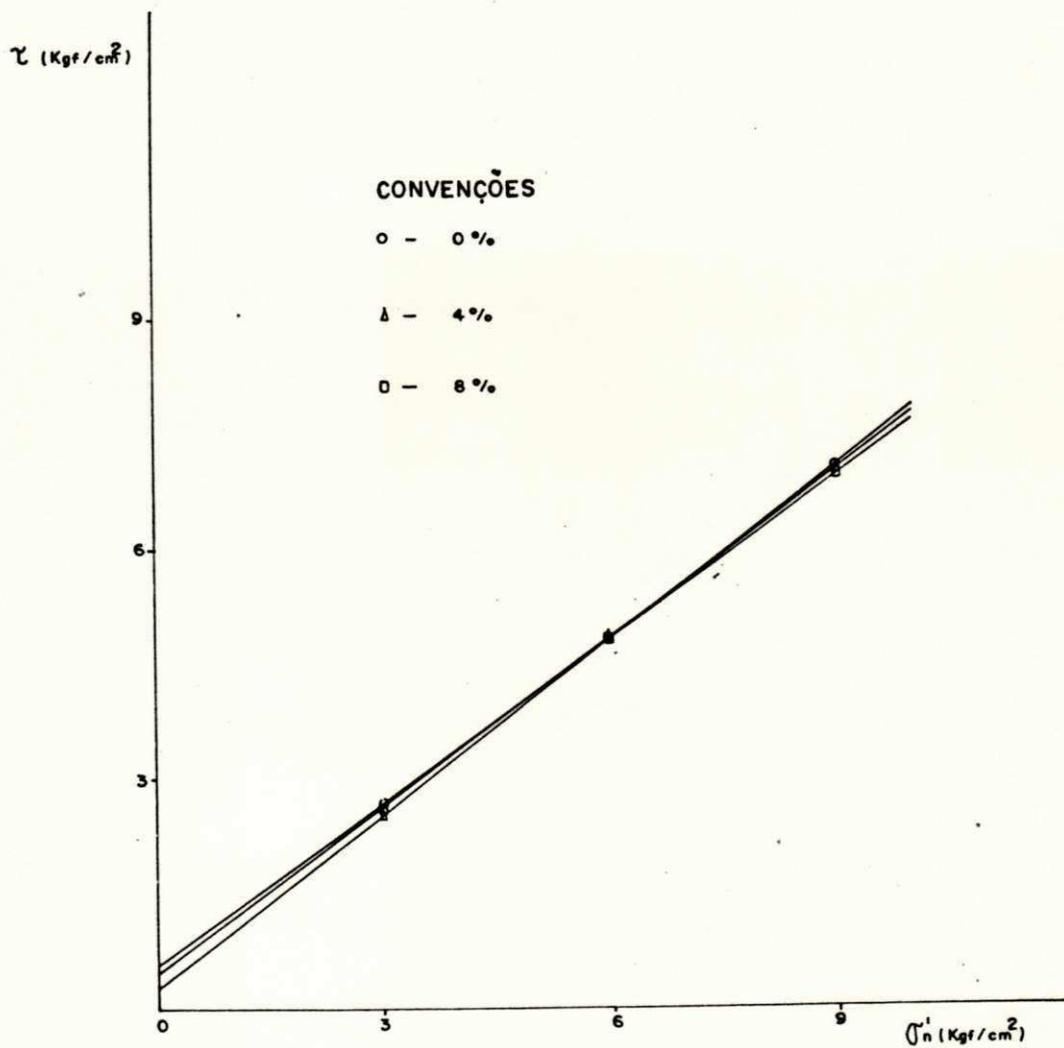


FIGURA - 6.33

TENSÃO NORMAL EFETIVA x TENSÃO DE CISALHAMENTO PARA 7 DIAS DE CURVA E 14 DIAS DE PERCOLAÇÃO

TABELAS DO CAPÍTULO VI

Peneiras	Diâmetro em mm	% que passa da Amostra Total
10	2,0	100,00
16	1,2	90,65
30	0,6	73,03
40	0,42	66,55
50	0,30	58,66
100	0,15	45,61
200	0,074	34,64
	0,04564	25,01
	0,03249	23,44
	0,02267	21,89
	0,01614	20,32
	0,01186	18,76
	0,00839	18,76
	0,00590	17,51
	0,00415	16,26
	0,00289	15,47
	0,00204	15,47
	0,00122	14,33

TABELA 6.1 - Composição Granulométrica.

Composição Granulométrica (%)		
Pedregulho	(> 2,0 mm)	-
Areia	(2,0 - 0,06 mm)	69,00
Silte	(0,06 - 0,002 mm)	16,00
Argila	(< 0,002 mm)	15,00
Limites de Atterberg (%)		
Limite de Liquidez		21,15
Limite de Plasticidade		16,57
Índice de Plasticidade		4,58
Densidade Real		
1º ensaio		3,033
2º ensaio		3,033
3º ensaio		3,035
Densidade Real Média		3,033
Classificação do Solo		
H R B		A - 2 - 4
Casagrande		SM - SC

TABELA 6.2 - Composição Granulométrica, Limites de Atterberg, Densidade Real e Classificação do Solo.

Solo Natural		Solo com Cal					
		2%		4%		6%	
ω (%)	γ_s (tf/m ³)						
8,5	1,795	7,8	1,746	10,1	1,741	10,1	1,735
10,4	1,925	10,1	1,821	11,9	1,840	12,1	1,825
12,3	2,078	12,5	1,900	14,1	1,951	14,2	1,945
14,3	2,079	14,1	1,958	16,5	1,952	16,3	1,961
16,6	1,970	16,3	1,968	18,4	1,901	18,4	1,895
18,4	1,900	18,4	1,970	20,2	1,831	20,3	1,832
--	--	20,3	1,845	--	--	--	--

TABELA 6.3 - Valores de Umidades de Compactação e respectivos Pesos Específicos Aparentes Secos do Solo, com e sem Cal.

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação					
		0 dia			14 dias		
		Pressões Confinantes (kgf/cm ²)			Pressões Confinantes (kgf/cm ²)		
		$\sigma_3 = 1,0$	$\sigma_3 = 2,0$	$\sigma_3 = 3,0$	$\sigma_3 = 1,0$	$\sigma_3 = 2,0$	$\sigma_3 = 3,0$
7 dias	0	5,70	8,80	12,50	5,60	9,00	11,60
	2	4,00	7,00	8,60	4,20	7,20	9,20
	4	5,75	12,30	12,80	3,50	9,15	12,00
	6	7,30	9,80	13,15	5,20	11,00	12,40
	8	6,70	11,15	13,35	4,80	10,00	12,80
14 dias	0	5,70	8,80	12,50	5,60	9,00	11,60
	2	4,25	6,50	9,30	3,70	6,20	9,10
	4	7,50	11,20	14,70	4,80	8,55	13,30
	6	6,30	10,00	14,30	5,60	9,60	12,80
28 dias	0	5,70	8,80	12,50	5,60	9,00	11,60
	2	3,80	7,10	11,20	3,80	6,40	8,25
	4	5,10	8,70	11,70	4,80	8,50	11,30
	6	7,40	9,80	13,50	6,50	9,20	12,00

TABELA 6.4 - Valores de Tensões Máximas, σ_1 (máx), para 3% de deformação, para os diferentes teores de cal e diferentes tempos de cura e de percolação.

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação			
		0 dia		14 dias	
		C (kgf/cm ²)	ϕ (Grau)	C (kgf/cm ²)	ϕ (Grau)
7 dias	0	0,59	33,1	0,73	30,5
	2	0,60	23,8	0,57	25,6
	4	0,45	37,8	0,52	33,2
	6	0,78	33,2	0,53	29,2
	8	0,79	34,1	0,57	34,8
14 dias	0	0,59	33,1	0,73	30,5
	2	0,51	25,7	0,48	27,4
	4	0,63	37,6	0,40	35,8
	6	0,55	36,9	0,56	34,5
28 dias	0	0,59	33,1	0,73	30,5
	2	0,42	30,0	0,56	22,5
	4	0,52	32,4	0,71	30,3
	6	0,60	34,7	0,69	31,6

TABELA 6.5 - Valores de Coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ) para diferentes concentrações de cal e diferentes tempos de cura e de percolação.

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação	
		0 dia	14 dias
		τ (kgf/cm ²)	τ (kgf/cm ²)
7 dias	0	1,24	1,32
	2	1,04	1,05
	4	1,22	1,18
	6	1,44	1,09
	8	1,46	1,27
14 dias	0	1,24	1,32
	2	0,99	1,00
	4	1,40	1,12
	6	1,30	1,24
28 dias	0	1,24	1,32
	2	1,00	0,97
	4	1,15	1,29
	6	1,29	1,30

TABELA 6.6 - Valores de Tensões de Cisalhamento (τ) para tensão normal (σ_n) arbitrária igual a 1,0 kgf/cm².

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação					
		0 dia			14 dias		
		u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)	u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)
7 dias	0	0,14	5,56	0,86	0,15	5,45	0,85
	2	0,14	3,86	0,86	0,12	4,08	0,88
	4	0,18	5,57	0,82	0,09	3,41	0,91
	6	0,11	6,19	0,89	0,17	5,03	0,83
	8	0,07	6,63	0,93	0,14	4,96	0,86
14 dias	0	0,14	5,56	0,86	0,15	5,45	0,85
	2	0,16	4,09	0,84	0,18	3,52	0,82
	4	0,07	7,43	0,93	0,13	4,67	0,87
	6	0,08	6,22	0,92	0,11	5,49	0,89
28 dias	0	0,14	5,56	0,86	0,15	5,45	0,85
	2	0,18	3,62	0,82	0,16	3,64	0,84
	4	0,08	5,02	0,92	0,18	5,52	0,82
	6	0,16	7,24	0,84	0,08	6,42	0,92

TABELA 6.7 - Valores de pressões neutras (u) e tensões efetivas (σ_1' e σ_3'), para diferentes teores de cal, diferentes tempos de cura e de percolação, para 3% de deformação - $\sigma_3 = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação					
		0 dia			14 dias		
		u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)	u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)
7 dias	0	0,29	8,51	1,71	0,32	8,68	1,68
	2	0,31	6,69	1,69	0,20	7,00	1,80
	4	0,33	11,97	1,67	0,22	8,98	1,78
	6	0,14	9,66	1,86	0,27	10,73	1,73
	8	0,19	10,96	1,81	0,18	9,92	1,82
14 dias	0	0,29	8,51	1,71	0,32	8,68	1,68
	2	0,51	5,99	1,49	0,44	5,76	1,56
	4	0,29	10,91	1,71	0,35	8,20	1,65
	6	0,14	9,86	1,86	0,26	9,34	1,74
28 dias	0	0,29	8,51	1,71	0,32	8,68	1,68
	2	0,36	6,44	1,64	0,28	6,12	1,72
	4	0,27	8,43	1,73	0,26	8,24	1,74
	6	0,31	9,49	1,69	0,24	8,96	1,76

TABELA 6.8 - Valores de pressões neutras (u) e tensões efetivas (σ_1' e σ_3'), para diferentes teores de cal, diferentes tempos de cura e de percolação, para 3% de deformação. - $\sigma_3 = 2,0 \text{ kgf/cm}^2$

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação					
		0 dia			14 dias		
		u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)	u (kgf/cm ²)	σ_1' (kgf/cm ²)	σ_3' (kgf/cm ²)
7 dias	0	0,71	11,79	2,29	0,71	10,89	2,29
	2	0,81	7,79	2,19	0,57	8,63	2,43
	4	0,70	12,10	2,30	0,39	11,61	2,61
	6	0,29	12,86	2,71	0,52	10,28	2,48
	8	0,24	13,11	2,76	0,23	12,57	2,27
14 dias	0	0,71	11,79	2,29	0,71	10,89	2,29
	2	0,72	8,58	2,28	0,72	8,38	2,28
	4	0,51	14,19	2,49	0,48	12,82	2,52
	6	0,35	13,95	2,65	0,38	12,42	2,62
28 dias	0	0,71	11,79	2,29	0,71	10,89	2,29
	2	0,55	10,65	2,45	0,82	7,43	2,18
	4	0,48	11,22	2,52	0,36	10,94	2,64
	6	0,48	13,02	2,52	0,29	11,71	2,71

TABELA 6.9 - Valores de pressões neutras (u) e tensões efetivas (σ_1' e σ_3'), para diferentes teores de cal, diferentes tempos de cura e de percolação, para 3% de deformação. - $\sigma_3 = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$

Tempos de Cura	Teores de Cal	Tempos de Percolação			
		0 dia		14 dias	
		C' (kgf/cm ²)	ϕ' (Grau)	C' (kgf/cm ²)	ϕ' (Grau)
7 dias	0	0,37	38,9	0,58	35,5
	2	0,38	30,2	0,44	29,7
	4	0,38	39,4	0,28	37,3
	6	0,48	37,4	0,41	37,8
	8	0,48	38,2	0,44	36,7
14 dias	0	0,37	38,9	0,58	35,5
	2	0,40	31,0	0,34	30,7
	4	0,44	41,7	0,28	39,3
	6	0,45	39,4	0,48	37,2
28 dias	0	0,37	38,9	0,58	35,5
	2	0,21	35,4	0,30	30,2
	4	0,39	36,2	0,50	34,3
	6	0,48	38,7	0,54	34,9

TABELA 6.10 - Valores de Coesão efetiva (C') e ângulo de atrito efetivo (ϕ'), para diferentes concentrações de cal e diferentes tempos de cura e de percolação.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados, analisados e discutidos no presente trabalho, sobre um processo de estabilização com cal dolomítica, de um solo laterítico de Nova Floresta, permitem apresentar as seguintes conclusões:

1. A adição da cal ao solo em estudo, mesmo em pequena quantidade (2%), influencia visivelmente as propriedades de compactação do solo, reduzindo o seu máximo peso específico aparente seco, aumentando a correspondente umidade ótima, face ao fenômeno de floculação induzido ao solo pela cal.
2. Com relação ao aspecto de permeabilidade, a adição de cal torna o solo mais granular, face ao fenômeno de floculação induzido ao solo pela cal, proporcionando às amostras de solo-cal maior susceptibilidade à percolação d'água que as amostras de solo puro.
3. A permeabilidade tanto para o solo natural, quanto para o solo-cal, diminui com o tempo de percolação, tendendo a estabilizar após o sétimo dia de percolação.
4. A adição de 2% de cal, independentemente dos tempos de cura e de percolação, proporcionou às amostras ensaiadas com este teor, uma resistência inferior

àquela obtida para o solo puro, evidenciando um comportamento típico induzido ao solo pela cal.

5. A adição de cal ao solo, nas várias concentrações estudadas, não proporcionou nenhuma tendência para os resultados obtidos em termos de ganho de resistência ao cisalhamento, quando comparada a resistência do solo puro.
6. Os tempos de cura e de percolação não influenciaram a resistência do sistema solo-cal, mesmo para concentrações elevadas de cal (6% e 8%).
7. Observa-se que a adição de cal ao solo, nas diferentes concentrações estudadas, para 28 dias de cura, apresenta uma tendência de ganho de resistência, quando comparada entre si, ou seja, a resistência do sistema solo-cal, cresce em função do teor de cal. Esta tendência deixa de existir contudo, quando comparamos a resistência do sistema solo-cal com a resistência do solo puro.
8. A inexistência de qualquer tendência para os resultados obtidos em termos de resistência ao cisalhamento do sistema solo-cal comparada a resistência do solo puro, independentemente da concentração de cal, tempo de cura e de percolação, nos induz a concluir que o solo de Nova Floresta, objeto desta pesquisa, para as condições utilizadas, parece ser um solo não reativo à cal.

Estas conclusões referem-se aos resultados obtidos para o solo estudado nas condições aqui ensaiadas, e são portanto limitadas, não devendo serem extrapoladas sem análises mais consistentes.

CAPÍTULO VIII

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa e da amplitude deste campo de conhecimento, supomos que seria de grande importância a realização de futuras pesquisas, com a finalidade de melhor se compreender os complexos processos de estabilização de solos lateríticos com cal, tentando naturalmente, preencher as várias lacunas existentes neste campo de pesquisa. Desta forma, apontaríamos especialmente:

1. Realizar uma pesquisa nos mesmos padrões desta, utilizando contudo, uma diferente energia de compactação, de modo a permitir uma análise da influência da energia de compactação nas características mecânicas e de permeabilidade do solo.
2. Realizar a mesma pesquisa com solos de outras jazidas e regiões, de modo a propiciar, através de correlações com métodos já existentes, um sistema de avaliação de reatividade à cal, com base no ensaio de resistência a cisalhamento triaxial.
3. Realizar um estudo similar, envolvendo um maior número de solos, utilizando as mesmas técnicas constantes deste trabalho e uso de cais calcícas e magnesianas.
4. Realizar uma pesquisa sobre as características

químicas da água após percolação, tendo por objetivo verificar quais os materiais que são carreados no processo de percolação.

5. Realizar uma pesquisa similar, estudando o aspecto de estabilização no que se refere as características de plasticidade e granulometria.
6. Realizar um estudo nos mesmos padrões deste, utilizando contudo, um teor único de umidade de moldagem para o solo puro e sistema solo-cal.
7. Realizar uma pesquisa similar, utilizando maiores tempos de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1967.
- BEZERRA, R.L., A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento e Aditivos, Tese de M.Sc., CCT/UFPb, 1976.
- BISHOP, A.W. and HENKEL, D.J., The Measurement of Soil Properties in Triaxial Tests, Edward Arnold, London, 1972.
- BISZEWSKI, E., The Effect of Lime on the Strength of Lateritic Clayey Gravel Stabilized with Hidrated Lime, Proc. Third Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. 1, Salisbury, Southern Rhodesia, 1963.
- BORBA, G.R., Propriedades de Resistência de um Solo Vermelho do Estado da Paraíba, Tese M.Sc., CCT/UFPb, 1976.
- BRAGA, C.C.A., Contribuição ao Estudo da Permeabilidade e das Características Mecânicas de um Solo Laterítico Estabilizado com Cimento, Tese M.Sc., CCT/UFPb, 1979.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION, Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes, The Institutions, London, 1967.
- CABRERA, J.G., The Effects of Vacuum Saturation on the Strength

Behaviour of Fine Grained Soils, Presented to Geotechnique, 1975.

CABRERA, J.G. and NWAKANMA, C.A., Pozzolanic Activity and Mechanism of Reaction of Red Tropical Soil.Lime Systems, 2nd International Conference on How - Volume Roads, Transportation Research Board, Iowa, USA, 1979.

CARTMELL, H.S. and BERGH, A.O., Lime Stabilization of Soils for Use as Road Foundations in Northern Rhodesia, Overseas Bull, nº 9, Road Research Laboratory, 1969.

DANIELS, D.J., The Modifying Effects of Additive Quantities of Lime on Various Clay Soils, Tese M.Sc., Universidade de Leeds, Inglaterra, 1971.

DAVIDSON, D.T. and HILT, C.H., Lime Fixation in Clayey Soils, Highway Research Board: Bull, nº 262, 1960.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER, Especificações Gerais para Obras Rodoviárias, 1971.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER, Método de Ensaio, Divisão de Pesquisas Tecnológicas, Rio de Janeiro, Brasil.

DIAMOND, S. and KINTER, E.B., Mechanism of Soil-Lime Stabilization: an Interpretative Review, Highway Research Record,

nº 92, 1965.

EADES, J.L. and GRIM, R.E., A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization, Highway Research Record, nº 139, 1966.

ENGINEERING LABORATORY EQUIPMENT, A Comprehensive Catalogue of Materials Testing and Site Investigation Equipment, England, 1972.

FERREIRA, A.M., Influência do Tempo de Percolação e da Acidez da Água nas Características de Resistência ao Cisalhamento e Permeabilidade de um Solo Vermelho do Estado da Paraíba, Tese M.Sc., CCT/UFPb, 1976.

FERREIRA, H.N., O Conceito da Laterita na Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Angola, Luanda, 1963.

FERRO, J.G.O., A Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos, Dissertação M.Sc., CCT/UFPb, 1976.

HARTY, J.R. and THOMPSON, M.R., Lime Reactivity of Tropical and Subtropical Soils, Highway Research Record, nº 442, 1973.

HAYTER, M.A. and CAIRNS, H., A field and Laboratory Investigation into the Strength of a Trial Stretch of Lime, Stabili

- zed Soil Pavement in Eastern Nigeria, Overseas Bulletin ,
nº 20, Boad Research Laboratory, 1966.
- HERRIN, M. e MITCHEL, H., Mistura de Solo Cal, Instituto de
Pesquisa Rodoviária, Publicação nº 126, 1968.
- KASSIFF, G., A Comparison of the Behaviour of Cement-Stabili-
zed and Lime-Stabilized Lateritic Soil in Secondary Road
Construction, United Nations Conference on the Application
of Science and Technology for the Less Developed Areas ,
1962.
- LAMBE, T.W., Soil Testing for Engineers, New York, 1951.
- LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V., Soil Mechanics, John Wiley and
Sons, Nova York, 1969.
- LUCENA, F.B., A Natureza e Propriedades de Solos Vermelhos do
Estado da Paraíba, Tese M.Sc., Universidade do Rio de Ja-
neiro, 1976.
- MARINHO, M.R., Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaíos
de Classificação de Solos, Tese M.Sc., CCT/UFPb, 1976.
- MARTIN. F.D. and DOYNE, H.C., Laterite and Lateritic Soil in
Sierra Leone, Journal of Agriculture Science, Vol. 20 ,
1930.

Mc DOWELL, C., Evaluation of Soil-Lime Stabilization Mixtures, Highway Research Record, nº 139, 1966.

ORMSBY, W.C. and KINTER, E.B., Strength Development and Reaction Products in Lime, Montmorillonite, Water Systems Public Roads, nº 4, Vol. 37, 1973.

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B., Soil Properties Affecting the Lime Stabilization of Red Tropical Soils from North East Brasil, Ph.D., Thesis, Universidade de Leeds, Leeds, Inglaterra, 1979.

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. e CABRERA, J.G., Um Método Simples para Avaliar a Reatividade à Cal dos Solos Vermelhos Tropicais, VI Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Lima, Perú, 1979.

SCHOFIELS, A.N., Consolidação pela Cal de uma Concreção de Laterita Granular Argilosa na Niassalândia, LNEC, Tradução do Overseas Bulletin, nº 3, Road Research Laboratory, 1962.

SHEN, C.K. and LI, S.K., Lime Stabilization of Clay, Sand Mixtures, Highway Research Record, nº 315, 1970.

SOCAL, Indústria e Comércio de Cal e Inseticidas Ltda, Campina Grande, Pb, Fornecedores de Cal Socal.

SOUSA SANTOS, P., Tecnologia das Argilas, Volumes I e II, São

Paulo, 1975.

TERZAGHI, K. e PECK, R.B., Mecânica dos Solos na Prática de Engenharia, Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, Brasil, 1962.

THOMPSON, M.R., Lime Reactivity of Illinois Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1966.

THOMPSON, M.R., Shear Strength and Elastic Properties of Lime-Soil Mixtures, Highway Research Record, nº 139, 1966.

TOWNSEND, F.C., MANKE, P.G. and PARCHER, J.V., The Influence of Sesquioxides on Lateritic Soil Properties, Highway Research Record, nº 374, 1971.

TOWNSEND, D.L. and KLYM, T.W., Durability of Lime-Stabilized Soils, Highway Reserch Record, nº 139, 1966.

UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT, Laterite and Lateritic Soils and Other Problem Soils of Africa, Report Prepared by Lyon Associates Inc., Building and Road Research Institute, Kumasi, Ghana, 1971.

VARGAS, M., Introdução a Mecânica dos Solos, Mc Graw-Hill, Brasil, 1977.

WINTERKORN, H.F. and CHANDRASEKHARAN, C., Laterite Soils and Their Stabilization, Highway Research Board, Bull, nº 44, 1951.