

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS  
COM CAL: AVALIAÇÃO POR UM PROCESSO  
DE CURA ACELERADO**

**Aluna: Sandra Coura Villarim**

Dissertação submetida ao corpo docente do Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:**

João Batista Queiroz de Carvalho Ph.D.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Centro de Ciências e Tecnologia**

**CAMPINA GRANDE - PB  
Setembro/1995**



V719e Villarim, Sandra Coura.  
Estabilização de solos lateríticos com cal : avaliação por um processo de cura acelerado / Sandra Coura Villarim. - Campina Grande, 1995.  
82 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1995.  
Referências.  
"Orientação : Prof. Dr. João Batista Queiroz de Carvalho".

1. Solos Lateríticos - Engenharia Civil - Paraíba. 2. Mecânica dos Solos. 3. Geotécnica. 4. Cal. 5. Resistência do Solo. 6. Dissertação - Engenharia Civil. I. Carvalho, João Batista Queiroz de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 624.131.2(043)

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS COM CAL:  
AVALIAÇÃO POR UM PROCESSO ACELERADO DE CURA

SANDRA COURA VILLARIM

Dissertação Aprovada em  
22 de setembro de 1995

Aprovada  
Banca Examinadora

  
Prof. João B. Queiroz de Carvalho, Ph.D.

  
Prof. Carlos Alberto Marques dos Anjos, M.Sc.

  
Prof. Edna Celie Cunha Machado, M.Sc.

Campina Grande - Paraíba

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, cujo apoio financeiro, tornou possível a realização desta pesquisa.

Ao professor amigo, Dr. João Batista Queiroz de Carvalho, que ao orientar, nunca mediu esforços para transmitir conhecimentos e segurança.

Aos funcionários do Laboratório de Solos II, especialmente ao laboratorista, José Nivaldo Sobreira, cuja boa vontade e experiência foram de grande importância no bom andamento da pesquisa.

A Prof. Mônica de Amorim Coura, que nos momentos difíceis, sempre teve uma palavra de incentivo.

**AGRADECIMENTO ESPECIAL:**

A Deus, que pôs na minha vida pessoas como meus pais, meu marido e meus filhos.

# ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS COM CAL: AVALIAÇÃO POR UM PROCESSO DE CURA ACELERADO

## R E S U M O

Esta dissertação apresenta os resultados de uma pesquisa desenvolvida com o objetivo de avaliar o efeito da cal na resistência à compressão simples, (RCS) de vários solos lateríticos. Para tanto, foram selecionados cinco solos lateríticos do estado da Paraíba e, a RCS determinada com os solos no estado natural e após estabilizados com a percentagem ótima de cal, igual a 6%. Os solos foram submetidos ao processo de cura normal à temperatura de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade de 100% (câmara saturada), durante 3, 7 e 28 dias e, também submetidos ao processo de cura acelerado em câmara climatizada, sob diferentes combinações de temperatura, ( $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ) e, umidade de (80%, 95%) durante 4, 8 e 24 horas.

Os resultados obtidos permitiram concluir que as equações utilizadas para a definição da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima de compactação dos solos estabilizados, resultaram em corpos de prova, com ótima reprodutibilidade. Por outro lado, os solos responderam favoravelmente ao tratamento com cal, fortalecendo os resultados para a análise, inclusive servindo para definir um "pico" na curva tensão-deformação.

Com relação ao processo de cura acelerado os resultados mostraram que existe uma condição ótima de cura acelerada, uma vez que, os resultados em termos de RCS, foram compatíveis com aqueles obtidos com o processo de cura normal. Identificou-se que a condição ótima de cura acelerada para os solos estudados, correspondeu à 24 horas em câmara climatizada à  $40^{\circ}\text{C}$  e 80% de umidade.

## LIME STABILIZED LATERITIC SOILS: ASSESSMENT USING AN ACCELERATED CURING PROCESS

### ABSTRACT

This thesis presents the results of an investigation carried out to evaluate the stabilization with lime of lateritic soils, using an accelerated curing process. Five lateritic soils from Paraíba state were selected and their unconfined compressive strength (UCS) determined in the natural state and after stabilized with lime. The unconfined compressive strength were determined, using the traditional curing process of placing the soil-samples in a saturated room at  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  during 28 days and by a newly developed method of accelerated curing process in an oven with controlled and combined temperature ( $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ) and moisture (80%, 90%), during 4, 8 and 24 hours.

The results obtained, allowed it to be concluded that the soils stabilized well with lime, providing good results to evaluate the accelerated curing process and also providing stress-strength relationships with a defined peak. The theoretical equations used to determine the compaction parameters for the stabilized soils worked very well as the resulting soil-samples were within the established test variations. The most important conclusion is related to accelerated curing process used as the results for unconfined compressive strength for the selected soils, compared very well with those obtained from the traditional curing process. It was found that for the soils used in this investigation there exists an optimum accelerated curing condition set at 24 hours in an oven at the temperature of  $40^{\circ}\text{C}$  combined with a moisture atmosphere of 80%.

# Í N D I C E

Resumo .....	i
Abstract.....	ii

## CAPÍTULO.1

1. Introdução e Objetivos	
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos.....	2

## CAPÍTULO.2

2. Revisão Bibliográfica	
2.1. Introdução.....	3
2.2. Solos Lateríticos.....	4
2.2.1. Origem.....	4
2.2.2. Definição.....	7
2.2.3. Classificação.....	9
2.3. Estabilização de Solos com Cal.....	14
2.3.1. Efeito da Adição da Cal em Parâmetros de Solos Lateríticos.....	16
2.3.2. Processo de Cura Acelerado..	21
2.4. Conclusão.....	23

## CAPÍTULO.3

3. Materiais e Métodos	
3.1. Introdução.....	24
3.2. Materiais.....	24
3.2.1. Solos.....	24
3.2.1.1. Características Geoló- gicas dos Solos.....	26
3.2.2. Cal.....	29



3.3. Métodos de Ensaio e Preparação	
das Amostras.....	29
3.3.1. Análise Granulométrica Por	
Peneiramento.....	30
3.3.2. Teor de Umidade.....	30
3.3.3. Compactação Dinâmica.....	30
3.3.4. Preparação dos Corpos	
de Prova.....	32
3.3.4.1. Solo Natural.....	32
3.3.4.2. Solo Estabilizado...	33
3.3.4.3. Compactação Estática..	33
3.3.5. Cura.....	34
3.3.5.1. Cura em Câmara	
Climatizada.....	34
3.3.5.2. Cura em Câmara Úmida.	34
3.3.6. Ensaio para Determinação da	
Resistência à Compressão	
Simples, RCS.....	35
3.3.7. Determinação das Umidades nos	
Corpos de Prova.....	35
3.3.8. Comportamento Tensão x Deforma-	
ção.....	35

#### CAPÍTULO.4

4. Apresentação e Análise dos Resultados	
4.1. Introdução.....	36
4.2. Plasticidade e Granulometria.....	36
4.2.1. Características de	
Plasticidade.....	36
4.2.2. Granulometria.....	36
4.3. Análise dos Resultados Obtidos	
Nesta Pesquisa.....	38
4.3.1. Introdução.....	38
4.3.2. Resultados da Resistência à	
Compressão Simples Para o	
Solo Bananeiras.....	38

4.3.3. Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Sapé.....	42
4.3.4. Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Teixeira.....	46
4.3.5. Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Cuité.....	49
4.3.6. Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Areia.....	53
4.3.7. Representação da Evolução da Resistência à Compressão Simples.....	56
4.4. Resultados Obtidos no Estudo do Controle das Umidades dos Corpos de Prova....	57
4.5. Análise do Comportamento Tensão - Deformação.....	64
4.6. Resumo da análise dos Resultados Obtidos.....	65

CAPÍTULO.5

5. Conclusões.....	71
--------------------	----

CAPÍTULO.6

6. Sugestões.....	73
-------------------	----

CAPÍTULO.7

7. Referências Bibliográficas.....	74
------------------------------------	----

## ÍNDICE DAS TABELAS E QUADROS

Quadro 1. Características Geológicas da Jazida Bananeiras.....	27
Quadro 2. Características Geológicas da Jazida Sapé.....	27
Quadro 3. Características Geológicas da Jazida Teixeira.....	28
Quadro 4. Características Geológicas da Jazida Cuité.....	28
Quadro 5. Características Geológicas da Jazida Areia.....	28
Quadro 6. Composição Química da Cal Utilizada na Pesquisa.....	29
Tabela 4.1. Análise Granulométrica e Limite de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).....	38
Tabela 4.2. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Bananeiras Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.....	41
Tabela 4.3. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Bananeiras. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.....	41
Tabela 4.4. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Bananeiras. Processo de Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e, Umidade de 100%.....	41
Tabela 4.5. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Sapé. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.....	44

Tabela 4.6. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Sapé. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.....	44
Tabela 4.7. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Sapé. Processo de Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e, Umidade de 100%.....	44
Tabela 4.8. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Teixeira. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.....	48
Tabela 4.9. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Teixeira. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.....	48
Tabela 4.10. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Teixeira. Processo de Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e, Umidade de 100%.....	48
Tabela 4.11. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Cuité. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.....	51
Tabela 4.12. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Cuité. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.....	51
Tabela 4.13. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Cuité. Processo de Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e, Umidade de 100%.....	51
Tabela 4.14. Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Areia. Cura em Câmara	

	Climatizada (CC) à uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.....	54
Tabela 4.15.	Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Areia. Cura em Câmara Climatizada (CC) à uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.....	54
Tabela 4.16.	Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa). Para o Solo Areia. Processo de Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e, Umidade de 100%.....	54
Tabela 4.17.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e, Umidade Igual à 80%.....	59
Tabela 4.18.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e, Umidade Igual à 95%.....	59
Tabela 4.19.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura no Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado.....	59
Tabela 4.20.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Sapé: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e, Umidade Igual à 80%.....	60
Tabela 4.21.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Sapé: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e, Umidade Igual à 95%.....	60
Tabela 4.22.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do	

	Solo Sapé: Cura no Processo Normal (CN) à 22° ± 2°C e Ambiente Saturado....	60
Tabela 4.23.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Teixeira: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e, Umidade Igual à 80%.....	61
Tabela 4.24.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Teixeira: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e, Umidade Igual à 95%.....	61
Tabela 4.25.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Teixeira: Cura no Processo Normal (CN) à 22° ± 2°C e Ambiente Saturado..	61
Tabela 4.26.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Cuité: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e, Umidade Igual à 80%.....	62
Tabela 4.27.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos e Prova do Solo Cuité: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e, Umidade Igual à 95%.....	62
Tabela 4.28.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Cuité: Cura no Processo Normal (CN) à 22° ± 2°C e Ambiente Saturado.....	62
Tabela 4.29.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Areia : Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e, Umidade Igual à 80%.....	63
Tabela 4.30.	Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Areia: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e, Umidade Igual à 95%....	63

Tabela 4.31. Resultado do Estudo das Umidades (%) no  
Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do  
Solo Areia: Cura no Processo Normal (CN)  
à  $22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e Ambiente Saturado..... 63

Tabela 4.32. Resistência à Compressão simples (kPa) Para  
os Solos no Estado Natural (RCSN) e  
Estabilizados com Cal (RCSE)..... 66

## ÍNDICE DOS GRÁFICOS E FIGURAS

Fluxograma de Atividades realizadas na Pesquisa.....	25
Gráfico 1. Determinação da Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima Para o Solo Bananeiras Estabilizado.....	31
Gráfico 2. Determinação da Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima Para o Solo Sapé Estabilizado.....	31
Gráfico 3. Determinação da Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima Para o Solo Teixeira Estabilizado.....	31
Gráfico 4. Determinação da Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima Para o Solo Cuité Estabilizado.....	31
Gráfico 5. Determinação da Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima Para o Solo Areia Estabilizado.....	31
Figura 4.1. Curvas Granulométricas dos Solos Estudados.....	37
Figura 4.2. Relação entre a Resistência à Compressão Simples Para os Solos no Estado Natural (RCSN) e Após Estabilizados com Cal Pelo Processo Normal de Cura (RCSE).....	56
Figura 4.3. Curvas Representativas Tensão x Deformação Para o Solo Bananeiras.....	67
Figura 4.4. Curvas Representativas Tensão x Deformação Para o Solo Sapé.....	68
Figura 4.5. Curvas Representativas Tensão x Deformação Para o Solo Teixeira .....	69
Figura 4.6. Curvas Representativas Tensão x Deformação Para o Solo Areia.....	70



# C A P Í T U L O 1

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 - Introdução

Os solos lateríticos, são largamente empregados nas mais diversas construções da engenharia civil, principalmente nas construções de estradas e barragens de terra. Em algumas regiões, e dependendo da aplicação, estes solos não podem ser empregados no mesmo estado em que são encontrados nas jazidas. Por outro lado, algumas vezes estes solos não satisfazem a determinadas especificações de obras, fazendo-se necessário recorrer à prática da estabilização. Para tanto, usa-se aditivos como o asfalto, o cimento e mais comumente a cal. Quando do uso da cal, o processo de cura é feito em câmara úmida durante 28 dias à uma temperatura de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Todavia, devido a urgência nas obras, é fundamental, o conhecimento do desempenho do solo, quando estabilizado, em um tempo menor do que aquele de 28 dias. Assim sendo, necessário se faz estudar um processo acelerado de cura de forma a diminuir o tempo de 28 dias, o qual é normalmente utilizado pelo processo de cura tradicional. Até os dias de hoje, somente poucas experiências foram feitas nesta área, todavia em número bastante limitado e, além do mais, considerando somente a variação de temperatura no processo de cura.

## 1.2 - Objetivos

Esta pesquisa visa analisar a resistência à compressão simples, de alguns solos lateríticos no estado natural e após estabilizados com cal e, com cura pelo processo normal e em câmara climatizada, sob diferentes condições de temperatura e umidade e, submetidos à diferentes tempos de cura acelerada. Também, serão analisados os resultados da relação tensão-deformação, dos solos no estado natural e após estabilizados com cal.

## C A P Í T U L O 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Introdução

A finalidade desta revisão bibliográfica, é fazer um levantamento sobre os assuntos relacionados com o desenvolvimento desta pesquisa, principalmente no que se refere ao processo de estabilização de solos lateríticos com cal. Com o intuito de obter-se uma maior objetividade, esta revisão bibliográfica inicia-se com uma breve revisão da origem, definições e classificações dos solos lateríticos, a fim de caracterizar os solos utilizados nesta pesquisa. Esta revisão será apresentada da seguinte maneira:

- Origem, definição e classificação dos solos lateríticos;
- Estabilização de solos lateríticos com cal;
- Efeito da adição da cal, em parâmetros de solos lateríticos;
- Processo de cura acelerada.

## 2.2 - Solos Lateríticos

### 2.2.1 - Origem

Segundo Lucena (1976), a origem e formação dos solos lateríticos, é um assunto dos mais discutidos. A seguir, apresenta-se algumas teorias com o objetivo de facilitar um melhor entendimento sobre o assunto.

De acordo com Martins (1983), a formação dos solos lateríticos se dá por um processo denominado de laterização, que compreende essencialmente uma série de alterações que são de ordem química e físico-química e/ou transformações dos minerais constituintes da rocha de origem em materiais ricos, principalmente, em argilo-mineral 1:1 e constituintes lateríticos (Fe, Al, Ti e Mg). Ainda segundo Martins (1983), estas alterações ocorrem devido a lixiviação da sílica combinada e bases, e a acumulação relativa de óxidos, hidróxidos e sesquióxidos de ferro, alumínio e titânio provenientes de outras fontes. A teoria de acumulação relativa afirma haver a remoção dos materiais solúveis provindos da rocha de origem, inicialmente rica em constituintes de ferro e alumínio. Há também a teoria da acumulação absoluta, onde considera-se que inicialmente, há a remoção do ferro em solução, depois a migração desta solução e a imediata fixação no solo laterítico. D'Hoore (1964), agrupou as principais teorias de alteração e concluiu o que pode ser resumido em dois processos:

1 -Acumulação relativa- Concentração de sesquióxidos, pela remoção de sílica e bases;

2- Acumulação absoluta- Concentração de sesquióxidos, pela acumulação do perfil ou entre perfis.

Gidigasú (1971,1976), na sua teoria de laterização dos solos, cita que a estrutura e as propriedades de engenharia de um solo, estão diretamente ligados à sua laterização, aos fatores de formação, às características morfológicas e ainda à sua composição química e mineralógica. Afirma também, que a gênese dos solos lateríticos está compreendida em três estágios, a saber:

1 - Intemperismo primário, intemperismo físico e químico, fase na qual ocorre uma total ou parcial liberação de partículas primárias de ferro e alumina com o carregamento de sílica combinada e bases;

2 - Intemperismo secundário, laterização, fase onde ocorre a lixiviação, sob condições ideais de drenagem total ou parcial de sílica e bases combinadas e a acumulação relativa ou o enriquecimento superficial de óxidos e sesquióxidos (principalmente  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ ) oriundos de outras fontes. Loughnan (1969), afirma que o pH da água de superfície e as condições de drenagem influem diretamente no estado sob o qual os vários elementos do solo são encontrados. Nas condições semi-tropicais de baixa atividade química, o produto final da ação do intemperismo, que não passa da formação argila (solo fino), consiste essencialmente de argilo-minerais representados por caulinita e óxidos hidratados (ou não) de ferro/alumina, sob condições climáticas quente e úmida, com vegetação

densa, chega-se a estágios onde até mesmo os argilos-minerais sofrem decomposição e a sílica é lixiviada. O material final é composto de óxidos de alumínio, ou óxidos hidratados de ferro, isto devido a alta intensidade do intemperismo;

3 - Intemperismo terciário, desidratação ou dissecação, consiste na desidratação total ou parcial, algumas implicando em endurecimento de materiais ricos em sesquióxidos e minerais secundários. Grant (1974) sintetizou os mecanismos de formação das lateritas como: mobilização por lixiviação, transporte em solução e precipitação sob condições críticas.

Do que foi analisado nesta revisão bibliográfica, pode-se afirmar que as lateritas ou solos lateríticos são oriundos de regiões de clima tropical, devido a grande intensidade da hidrólise, juntamente com o ataque dos silicatos das rochas e posteriormente com liberação das bases solúveis como ferro, magnésio, alumínio, potássio e sílica. Nas regiões de clima tropical a lixiviação contribui para o empobrecimento do solo em relação a sílica, no entanto tem-se um solo rico em óxidos de ferro e alumina.

## 2.2.2 - Definição

Em 1807, um engenheiro inglês chamado Francis Buchanan, encontrou em Malabar na Índia, um material avermelhado e pétreo natural que quando umedecido tornava-se trabalhável e, quando exposto ao ar em blocos, endurecia ficando com as propriedades de um tijolo, o qual em latim designa-se como *later*. Buchanan chamou este material/solo de laterita. Esta caracterização de Buchanan, era simplesmente baseada no aspecto visual (cor) e, na propriedade de endurecimento ao ar. Começou então a surgir a necessidade de se uniformizar as definições, uma vez que, todo material vermelho e que poderia endurecer quando exposto ao solo era chamado de laterita. Assim, inicia-se um período de definições que usavam as propriedades básicas, principalmente, a composição química, para se definir laterita, uma vez que estes solos apresentavam uma certa variação nas suas características de engenharia, oriundas das influências de fatores ligados ao meio ambiente, rocha de origem, umidade, temperatura e, precipitação pluviométrica.

Mallet (1833), anunciou que os elementos químicos ferro e alumínio seriam os responsáveis pela natureza da laterita. Foi mais um ponto a favor de que se procurassem definições baseadas na composição química. Glinka (1899), afirma que do ponto de vista pedológico, o intemperismo químico existente nos trópicos, favorece a permanência de uma quantidade razoável de alumínio hidratado nos resíduos. Holland (1899), afirma que durante o intemperismo dos silicatos aluminosos nos trópicos, a sílica, os álcalis e os alcalinos terrosos são removidos na solução. No entanto, a alumina e os óxidos de ferro continuam na solução de forma hidratada. Hirashima (1948), Terzaghi (1958) e Millard (1926), afirmaram que os solos lateríticos

caracterizam-se por um teor de umidade natural alto, alto limite de liquidez, baixa massa específica e friabilidade e/ou estrutura destorroável. Gidigasú (1976), considerou que os solos lateríticos são identificados como um solo residual, intemperizado, formado em regiões de recente atividade vulcânica e/ou com um clima cuja pluviometria geralmente atinge 212,4mm. Hirashima (1948) e Terzaghi (1958), referindo-se a estes solos encontrados nas Ilhas Havaianas e Kenya observaram que são de alta permeabilidade, alto ângulo de atrito e baixa compressibilidade.

Outra definição com base na relação molecular sílica-sesquióxidos de ferro e alumínio da fração tamanho argila, foi proposta por Winterkorn (1951). Baseado no valor da relação sílica/sesquióxidos ( $K_i$ ), os solos são classificados como laterita quando  $K_i < 1,33$ . Para  $1,33 < K_i < 2$ , o solo é classificado como solo laterítico. Quando  $K_i > 2,0$ , o solo é classificado como solo não laterítico. A definição de que laterita é um solo tropical no qual o processo de meteorização resulta em um acúmulo de sesquióxidos, foi adotada pelo Road Research Laboratory. Por outro lado, segundo Little (1969), laterita são rochas ígneas tropicais desgastadas "in situ", que estão parcial ou totalmente decompostas, com uma concentração de sesquióxidos de ferro ou alumínio, em detrimento da sílica.

Uma definição considerada precisa e suscinta foi lançada por Grant (1974), onde afirma que nem todo solo de coloração vermelha é laterita. Quando este exposto ao sol não endurece é apenas solo vermelho, afirma também que existe uma considerável acumulação e, muitas vezes, segregação de óxidos de ferro, secundários (algum óxido de alumínio está também invariavelmente presente) e, é capaz de endurecer a si mesmo, para formar material concrecionado, com oxidação e/ou posterior desidratação.



Martin e Doyne (1927,1930), após estudos realizados, destacaram a importância da fração coloidal e do processo de laterização. Ressaltaram que se a relação sílica-alumina da fração tamanho argila fosse  $< 1,33$ , o solo seria uma laterita, os demais classificados como solos lateríticos ou não lateríticos.

Braga (1979), apresentou outra definição proposta por Harrassowitz (1926), que baseada nos componentes químicos, salientava uma maior importância da relação sílica-alumina e uma menor importância do ferro, sendo esta relação representada por  $K_i$ , que no caso das lateritas devia ser inferior a 2,0. Ultimamente, os estudiosos no assunto se concentraram no intuito de ter-se uma definição definitiva do que seriam as lateritas, no entanto, desde 1971, no Brasil adotou-se a definição proposta pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), que baseada na definição de Winterkorn (1951), afirma terem os solos lateríticos relação molecular sílica-sesquióxidos ( $K_i$ ) menor que 2,0 e, em paralelo, apresentam propriedades tais como: presença apreciável de sesquióxidos de ferro, tendência ao endurecimento e concrecionamento, quando exposto ao ar, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica.

### 2.2.3 - Classificação

Um sistema de classificação tem como finalidade organizar as propriedades e características de um solo desconhecido, através da comparação de suas propriedades conhecidas, com as de outros solos que se lhes assemelham, Terzaghi e Peck,

(1967). A classificação de um solo, seja ele laterítico ou não, é de fundamental importância, uma vez que quando da realização de um projeto, a previsão das propriedades e características das quais se dispõe, podem conduzir à um bom ou mau aproveitamento do solo considerado. Normalmente, os solos são classificados, com base na granulometria, limite de liquidez e, limite de plasticidade. No entanto, os solos lateríticos, não tem o seu comportamento dependendo única e exclusivamente da distribuição granulométrica das partículas e da plasticidade mas também depende de fatores como a gênese, história, geologia, e reais condições de umidade. Estas características, influenciam as propriedades dos solos, modificando, inclusive, a granulometria e plasticidade, tornando ineficientes os sistemas de classificação existentes, Harrassowitz (1926).

Queiroz de Carvalho (1979), ressalta que a maioria dos métodos baseiam-se nos critérios de granulometria e limites de liquidez e plasticidade e, são desenvolvidos para solos de regiões temperadas, tornando-se limitados ou até mesmo, inadequados para solos de regiões tropicais. As considerações acima, justificam as varias tentativas de classificação que tem sido feitas. Com o intuito de sintetizar esta revisão bibliográfica, serão apresentadas a seguir algumas classificações consideradas representativas.

Em 1911, Fermor classificou os solos de acordo com o teor de constituintes lateríticos, agrupando-os e denominando-os de:

-Verdadeiras lateritas, quando contém 98% ou mais de constituintes lateríticos (óxidos de Fe, Al, Ti e Mg).

-Lateritas litomárgicas, quando contém entre 50 e 90% dos óxidos.

-Litomargas lateríticas, quando contém entre 25 e 50% de constituintes lateríticos.

Segundo propôs Harrassowitz (1926), Martin e Doyne (1930), classificaram as lateritas segundo a relação molecular sílica-alumina (ki), nos seguintes grupos:

- ki menor do que 1,33 - Solo de Laterita
- ki entre 1,33 e 2 - Solo Laterítico
- ki maior do que 2 - Solo não Laterítico.

Como se pode observar, a classificação de Martin e Doyne leva em consideração apenas os sesquióxidos de alumínio, sem dar a devida importância aos sesquióxidos de ferro e outros, por este motivo, Lucena (1976), afirma ter a mesma sofrido muitas críticas.

Dunbleton (1963), citou que do ponto de vista de engenharia, a composição mineralógica da fração argilosa, pode ser usada como um meio de classificação e identificação. Cita como exemplo que pode-se chamar de solos lateríticos problemáticos, aqueles portadores de altas percentagens de haloisita hidratada, goetita ou gibsita. Já os que contém montmorilonita e illita podem ter baixa resistência e apresentar pressões neutras importantes na fase de construção, alto potencial de inchamento e outras propriedades indesejáveis, que não estão presentes naqueles solos lateríticos cuja fração argila é constituída predominantemente de caulinita e clorita.

Estudiosos como Vallerga e Van Til (1970), consideram o sistema unificado de classificação como o que mais se adequa aos solos lateríticos, contanto que sejam adicionados símbolos que permitam definir as características de durabilidade das partículas de pedregulho e areia, e a plasticidade dos materiais finos, encontrados nas areias e pedregulhos lateríticos. Desta forma foram propostos os seguintes símbolos:

-L, I e H usados para classificar os solos de acordo com a plasticidade, sendo que o limite menor do limite de liquidez de 35% seria para baixa plasticidade (L), entre 35% e 50% para os solos de média plasticidade (I) e, maior que 50% para os solos de alta plasticidade (H).

-SF usado para materiais relativamente incompressíveis (não plástico).

- 1, 2 e 3 para referir-se a durabilidade, sendo que, 1 usado para alta durabilidade, com valores de Dc e Df maiores que 35, 2 para média durabilidade com Dc e Df entre 35 e 20, e 3 para baixa durabilidade com Dc e Df menores que 20. Estes parâmetros Dc e Df são definidos pelos valores dos ensaios California Coarse e Fine Durability, respectivamente.

Gidigasú (1971), através de seus trabalhos com solos lateríticos, tem discutido exaustivamente o problema da classificação desses solos, como se pode ver em (Gidigasú 1970, 1971, 1972, 1974, 1976). Embora o sistema de classificação seja muito simples e tenha sido originalmente baseado nas percentagens relativas das frações areia, silte e argila, Gidigasú (1971), afirmou que apenas as porções finas de um solo, não refletem as características de interesse da engenharia civil. Considerando esta peculiaridade, Gidigasú (1976), propôs alguns parâmetros usados para classificar os solos lateríticos de granulometria fina de Ghana. Não há questionamento à cerca da validade desta proposta que considera vários fatores extremamente relacionados com estes solos, por exemplo, rocha de origem, grau de laterização, condições climáticas retração linear, etc.

A Unified Soil Classification (USCS) e a Highway Research Board Classification (HRB), são as classificações mais usadas para os solos lateríticos e saprolíticos para propósitos de engenharia. Entretanto, estas duas

classificações baseiam-se na distribuição granulométrica e limite de liquidez e índice de plasticidade, o que leva à certas limitações, como já foi discutido por outros estudiosos, Lumb (1962), Mello (1972), Lyon Associates (1971), Gidigasú (1980), Nogami e Villibor (1981), Mitchell e Sittar (1982), levando as seguintes considerações :

1. argilas lateríticas de alta plasticidade (CH, MH, A-7), quando compactadas com energia de compactação normal e teor ótimo de umidade, não devem ser expansivas e podem apresentar uma pequena perda de capacidade de carga quando compactada;

2. solos saprolíticos contendo mica e/ou caulinita, podem apresentar pouca ou nenhuma plasticidade mas ter uma expansão relativamente alta e uma grande perda da capacidade de carga na compactação.

Uma classificação proposta por Lal e Bindra (1981), acrescentava a USCS o teste do teor de umidade centrifugado equivalente, alegando ser este um ensaio que independe do operador, ao contrário dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade, que apresentam certas limitações devido a sua baixa reprodutibilidade.

Como resultado de estudos extensivos das características de solos lateríticos, Medina e Preussler (1980 e 1982), Preussler e outros (1981) e Medina e outros (1982), surgiu um proposta que tentava classificar os solos para propósitos de pavimentos, onde os solos eram agrupados de acordo com a sua distribuição granulométrica, plasticidade e valores de CBR. Esta é considerada uma classificação muito interessante, embora alguns outros testes devam ser necessários para reforçar esta aplicação.

Com a ideia de considerar que a natureza mineralógica da fração argila não é afetada durante a manipulação para a realização de ensaios, Vargas (1988), propôs que a atividade de um solo pode ser ligada a sua plasticidade.

Queiroz de Carvalho (1983), cita Eklun-Natei e Muller (1981), que após estudos com solos lateríticos, lançaram uma classificação para propósitos geotécnicos, que sugeria o uso das características representativas dos solos lateríticos.

Conforme citado no início desta revisão bibliográfica, o objetivo de se fazer uma análise da origem, definição e classificação dos solos lateríticos, era o de se obter subsídios para se caracterizar os solos utilizados nesta pesquisa. Assim, baseado nas informações obtidas e, utilizando-se a relação sílica/sesquióxidos (ki), pôde-se definir os solos selecionados para esta pesquisa, como solos resultantes do processo de intenso intemperismo. Os solos selecionados para esta pesquisa, tem o valor de ki em torno de 1,5, podendo-se então afirmar que são solos lateríticos.

### 2.3 - Estabilização de Solos Com Cal

A adição da cal aos solos, é uma técnica muito utilizada, uma vez que através do seu uso pode-se tornar viável um solo, que no estado natural não corresponde as condições de projeto. Desta forma, necessário se faz, estudar esta técnica capaz de melhorar certas propriedades de engenharia de um solo, tornando-o capaz de corresponder as especificações recomendadas.

Em regiões de clima temperado, um dos aditivos mais usados na estabilização é a cal. No caso dos solos de regiões tropicais, também usam-se aditivos como betume, cimento ou mesmo cal. Sendo que um dos mais utilizados é a cal.

A maioria dos estudiosos como, Eades, Nichols e Grim (1962), Diamond e Kinter (1965), e Queiroz de Carvalho (1979), concordam que a adição da cal, normalmente aumenta a resistência, há uma redução na plasticidade e uma melhoria na trabalhabilidade. Concordam ainda que as reações responsáveis por estas mudanças podem ser as seguintes :

- troca de cátions/floculação: quando da adição da cal, ao sistema solo-água, há a substituição do cátion cálcio da cal, pelo íon metálico ( $Mg^{+}$ ,  $K^{+}$ ...). Desta forma os cátions se aglomeram na superfície do argilo-mineral causando a floculação;

- carbonatação: o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal formando carbonato de cálcio ou de magnésio, é considerado um processo prejudicial ao ganho da resistência, uma vez que este carbonato é um agente cimentante muito fraco;

- reação pozolânica: a adição da cal a um solo, promove um meio alcalino muito alto, que provoca a destruição da estrutura do argilo mineral, com a consequente liberação de Si e/ou Al para a reação com a cal.

Segundo Cabrera e Nwakanma (1979), além das reações básicas que ocorrem nos solos lateríticos tratados com cal, podem ser formados compostos de ferro como por exemplo: cálcio aluminato de ferro ou cálcio silicato de ferro.

### 3.1 - Efeito da Adição da Cal, em Parâmetros de Solos Lateríticos

A literatura pesquisada mostra que o resultado das misturas de solo-cal dependem de muitas variáveis como: tipo de solo, tipo de cal, percentagem de cal e condições de cura. Condições estas que se referem a tempo e temperatura, pouco ou quase nada há sobre as condições de umidade. Sabe-se também que apesar de seu pequeno efeito em solos altamente orgânicos ou com baixo teor da fração tamanho argila, a cal é o melhor agente estabilizante nos solos argilosos, nestes a cal produzirá imediatamente uma estrutura mais friável, proporcionando uma melhor trabalhabilidade, melhor grau de compactação e redução da plasticidade. As propriedades que podem ser alteradas devido a estabilização são: aumento da resistência e capacidade de suporte, aumento na durabilidade e diminuição da permeabilidade, que são na realidade fatores primordiais quando da utilização de um solo em obras de engenharia.

Winterkorn e Chandrasekharan (1951), pesquisando sobre a estabilização com cal em solos tropicais, alertaram para a importância do efeito do grau de intemperismo, e da composição química, e concluíram que na maioria dos solos a resposta dos solos lateríticos à estabilização com cal aumenta com o incremento do grau de laterização, como é mostrado pela relação sílica /sesquióxidos (Ki).

Anday (1963), após estudos desenvolvidos com seis solos da Virgínia, concluiu que amostras de solo-cal submetidas a cura no campo, em pavimento experimental, apresentaram aumento na sua resistência à compressão simples. Entretanto, a quantidade, e a taxa de ganho desta



resistência dependem do tipo de solo e das condições climáticas.

Estudando as características das argilas estabilizadas com cal, Fosseberg (1965), concluiu que a cal aumenta de imediato o ângulo de atrito e a resistência à compressão simples, sofre um incremento a longo prazo, atribuído essencialmente a um aumento na coesão.

De Graft-Johnson e Bhatia (1970), afirmaram que devido ao alto teor de sesquióxidos, os solos lsteríticos podem ser efetivamente estabilizados com cal. Por outro lado, Townsend e outros (1971), analisando a presença de sesquióxidos (óxidos de ferro e alumínio), afirmaram que superfícies de argila cobertas por sesquióxidos inibem a reação argila-cálcio e, conseqüentemente, a estabilização do solo.

Alexander (1972), analisando o efeito da estabilização de algumas amostras de solos da Califórnia, com diferentes tipos de cal, sendo algumas hidratadas e outras virgens, ou vivas, concluiu que um solo estabilizado com cal virgem apresenta um maior ganho de resistência à compressão simples que os solos estabilizados com cal hidratada, isto porque, a cal virgem apresenta um maior potencial de hidróxido de cálcio.

O efeito da estabilização de solos com cal, foi avaliado por Garcia (1973), através de ensaios triaxiais do tipo consolidado drenado (CD), onde ele observou que a cal aumentou a coesão em 641% e o ângulo de atrito em 17,5%.

O'Flaherty (1974), analisando as misturas solo-cal do ponto de vista da engenharia rodoviária, alertou para a importância da temperatura na cura dessas misturas. Segundo o autor, a estabilização de solo com cal foi amplamente utilizada nos EUA, onde foi empregada para a modificação do

material de sub-base e base, sendo que estas estabilizações foram baseadas em dados da RCS preparados sob umidade ótima e massa específica seca máxima, afirmou ainda que os solos lateríticos quando no estado natural, apresentam-se de uso adequado como material de sub-base, porém para serem usados como material de base necessitam de estabilização, para melhorar suas propriedades.

Já a resistência ao cisalhamento foi avaliada por Costa (1977), estudando argila mole estabilizada com cal, onde ao adicionar 8% de cal, e após 180 dias de cura, constatou um aumento de 740% na resistência ao cisalhamento, devido ao incremento de 250% na coesão e 490% no ângulo de atrito.

Uma vez que a estabilização é um processo ainda carente de esclarecimentos, há assuntos que se tornam alvo de muitos pesquisadores, como é o caso da reatividade à cal, já que não há um método rápido para se antever a taxa de aumento de resistência de um solo submetido a este tratamento. Então na tentativa de avaliar o "grau" de estabilização, Thompson (1966), propôs um parâmetro chamado reatividade à cal, o qual é definido como a diferença entre a resistência à compressão simples (RCS) do solo estabilizado, e a resistência à compressão simples do solo no estado natural.

Segundo Harty (1971), há uma correlação negativa entre matéria orgânica e a reatividade da cal.

Cabrera e Nwankma (1979), propuseram um método para se determinar a atividade pozolânica de solos lateríticos expressando-a por um índice de atividade, o qual é diretamente proporcional a percentagem da fração tamanho argila, porém o mesmo requer equipamentos não comuns em laboratórios de solos ou de materiais de construção. Queiroz de Carvalho (1979), fazendo relações entre propriedades dos solos lateríticos do Nordeste do Brasil e

a reatividade da cal, observou que não houve correlação entre a reatividade da cal e as propriedades de compactação dos solos tratados com cal, apesar da massa específica máxima decrescer e a umidade ótima crescer com a adição da cal. Não se obteve também correlação entre a reatividade da cal e as propriedades físicas dos solos tais como: densidade; teor de umidade; limites de Atterberg; atividade coloidal e fração tamanho argila. Já com relação a CTC observou-se haver uma ligação entre a CTCpH10 e CTCpH7 (CTCpH10-CTCpH7) e a reatividade da cal. Os componentes químicos (sílica, alumina e ferro), no entanto, não apresentaram correlação com a reatividade da cal, observou-se também que o óxido de ferro no estado cristalino ou no estado amorfo não apresentou correlação significativa com a reatividade da cal. Desta forma só os componentes amorfos (sílica e alumina) determinados na fração argila foram os únicos a terem propriedades altamente significativas com a reatividade da cal.

Castro e Vaine (1978), observaram que o solo que continha argila montmorilonítica, apresentava aumento da resistência à compressão simples, afirmaram também que o teor ótimo de cal, correspondente a máxima resistência à compressão simples, aumenta com o teor de argila.

Queiroz de Carvalho (1980), mostra que o parâmetro de reatividade da cal, de diversos solos lateríticos estabilizados com cal, variou de 0% à 410%.

De acordo com a sistemática de Thompson, Queiroz de Carvalho (1981), propôs a seguinte classificação:

TR ≤ 250 kPa	- fraca reatividade
250 ≤ RT ≤ 500kPa	- baixa reatividade
500 ≤ RT ≤ 1000 kPa	- média reatividade
1000 ≤ RT ≤ 2000 kPa	- alta reatividade

Lima (1983), concluiu que o solo estudado não era reativo à cal, uma vez que o mesmo não apresentou qualquer variação na resistência ao cisalhamento, do solo no estado natural, para o solo estabilizado, independentemente do teor de cal, tempo de cura e de percolação.

Também em estudos sobre a estabilização de solos lateríticos da região Nordeste do Brasil, Costa e outros (1986), observaram haver uma correlação entre os componentes amorfos de sílica e alumina e a reatividade à cal. Não foi possível, no entanto captar um tempo ótimo de cura para o sistema solo-cal.

Queiroz de Carvalho (1989), avaliou a influência da estabilização de alguns solos do Nordeste do Brasil, na plasticidade, e concluiu que a adição da cal altera os limites de liquidez, reduzindo-os, e altera também os limites de plasticidade, aumentando-os.

Jalali (1994), mostrou através de modelos teóricos que no aumento da resistência de solos estabilizados com cal, há diferenças com aquelas do aumento da resistência dos solos estabilizados com cimento. Sugeriu então que, o aumento de resistência inicial dos solos estabilizados com cal, curados a baixas temperaturas, é devido a pequena taxa de nucleação.

Em uma análise conjunta dos diversos trabalhos citados, observa-se que o processo de estabilização tem sido muito estudado, porém não é ainda um assunto bem esclarecido, no que se refere as condições de cura da mistura solo-cal, ou seja, tempo, temperatura e umidade, sendo o último um fator preponderante nas reações químicas que fazem a estabilização em si. O muito que se estudou até hoje, foi baseado na cura dos corpos de prova, pelo processo normal

de 28 dias à  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  em câmara saturada. Com relação a um processo de cura acelerado, pouco ou muito pouco foi estudado.

### 2.3.2 - Processo de Cura Acelerado

A cinética de reação do sistema solo-cal é muito lenta, implicando as vezes, em tempos de cura excessivamente longos, dificultando o andamento da obra. Desta forma, faz-se necessário pesquisar, e desenvolver mais o assunto, visando diminuir este tempo de cura, de forma que sejam obtidos resultados adequados mais rapidamente. Sabe-se que são vários os fatores de controle de velocidade das reações químicas e, que o aumento de temperatura dos reagentes acelera o processo de reação. Segundo Slaubaugh e Parsons (1982). O efeito da temperatura depende da grandeza da energia de ativação necessária para iniciar a reação.

A reação pozolânica, responsável pelo aumento da resistência no sistema solo-cal, em temperatura ambiente é uma reação lenta, chegando a vários dias e até meses, (utilizando-se a sistemática de Thompson, convencionou-se 28 dias), sabendo que o aumento de temperatura, aumenta a velocidade da reação pozolânica, alguns estudiosos avaliaram o efeito do aumento de temperatura, durante a cura do sistema solo-cal.

Anday (1961), submeteu alguns solos da Virginia, à temperaturas elevadas, na tentativa de encontrar uma que diminuísse os 45 dias de cura no campo, atingindo a mesma resistência à compressão simples e, concluiu que com 18 horas de cura à  $45,77^{\circ}\text{C}$  ou 2 horas à  $34,67^{\circ}\text{C}$ , pode-se obter

a resistência à compressão simples compatível com a cura no campo. Entretanto, o autor optou pela temperatura mais baixa para evitar a perda d'água que fica retida entre a amostra e a proteção plástica, durante o tempo de cura, a temperatura mais baixa também é mais condizente com a realidade.

Queiroz de Carvalho (1985), estudando solos lateríticos estabilizados com 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% de cal, procurou uma técnica de cura acelerada, submetendo as amostras dos solos a cura em estufa à 40°C, durante 6, 12, 24 horas e 2, 3 e 7 dias. Os resultados obtidos não permitiram encontrar um tempo ótimo de cura acelerada. O aumento na resistência à compressão simples, foi atribuído a secagem/endurecimento dos solos pela perda da umidade e não, a estabilização propriamente dita.

Miná (1993), submeteu amostras de solos lateríticos tratados com cal, à tratamento térmico em banho-maria, com o intuito de aumentar a velocidade da reação pozolânica sem perda d'água. Concluiu que, com uma temperatura de 100°C e, tempos de cura iguais a 3 e 4 horas, pode-se obter valores da resistência à compressão simples semelhantes aos obtidos com cura normal a 28 e 60 dias. Jalali (1993), estudou um processo de cura acelerado e, embora tenha desenvolvido um modelo matemático para o sistema solo-cal, o processo de cura, considerou somente a variação de temperatura.

## 2.4 - Conclusão

A definição/classificação dos solos estudados e, a bibliografia consultada, associada aos parâmetros dos solos selecionados para esta pesquisa, permitiu concluir que os solos selecionados são classificados como solos lateríticos.

Com relação ao processo de estabilização dos solos, pode-se concluir claramente que existem bastante trabalhos de pesquisa sobre a interação solo-cal. Com relação a um processo de cura acelerado, a literatura é bastante escassa refletindo a grande limitação das pesquisas. Ainda, do muito pouco que foi feito utilizando o processo de cura acelerado, considerou-se a temperatura como a variável principal. Assim, necessário se faz pesquisar uma técnica de cura acelerada, considerando a variação da temperatura e da umidade isoladamente e, em conjunto.

## C A P Í T U L O 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - Introdução

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. Serão descritos, apenas os métodos de ensaio não normalizados, os demais normalizados serão apenas citados. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos II, do Departamento de Engenharia Civil, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande.

#### 3.2 - Materiais

##### 3.2.1 - Solos

Para a realização desta pesquisa foram selecionados 5 (cinco) solos provenientes de várias jazidas localizadas no estado da Paraíba. O critério de seleção baseou-se na apresentação de diversidade, que é uma decorrência de suas diferentes formações geológicas, dando uma visão mais real dos diferentes comportamentos dos solos em relação à estabilização com cal. Procurou-se ainda, selecionar jazidas que tivessem potencial quantitativo para utilização nas construções de estradas e barragens de terra.



## FLUXOGRAMA

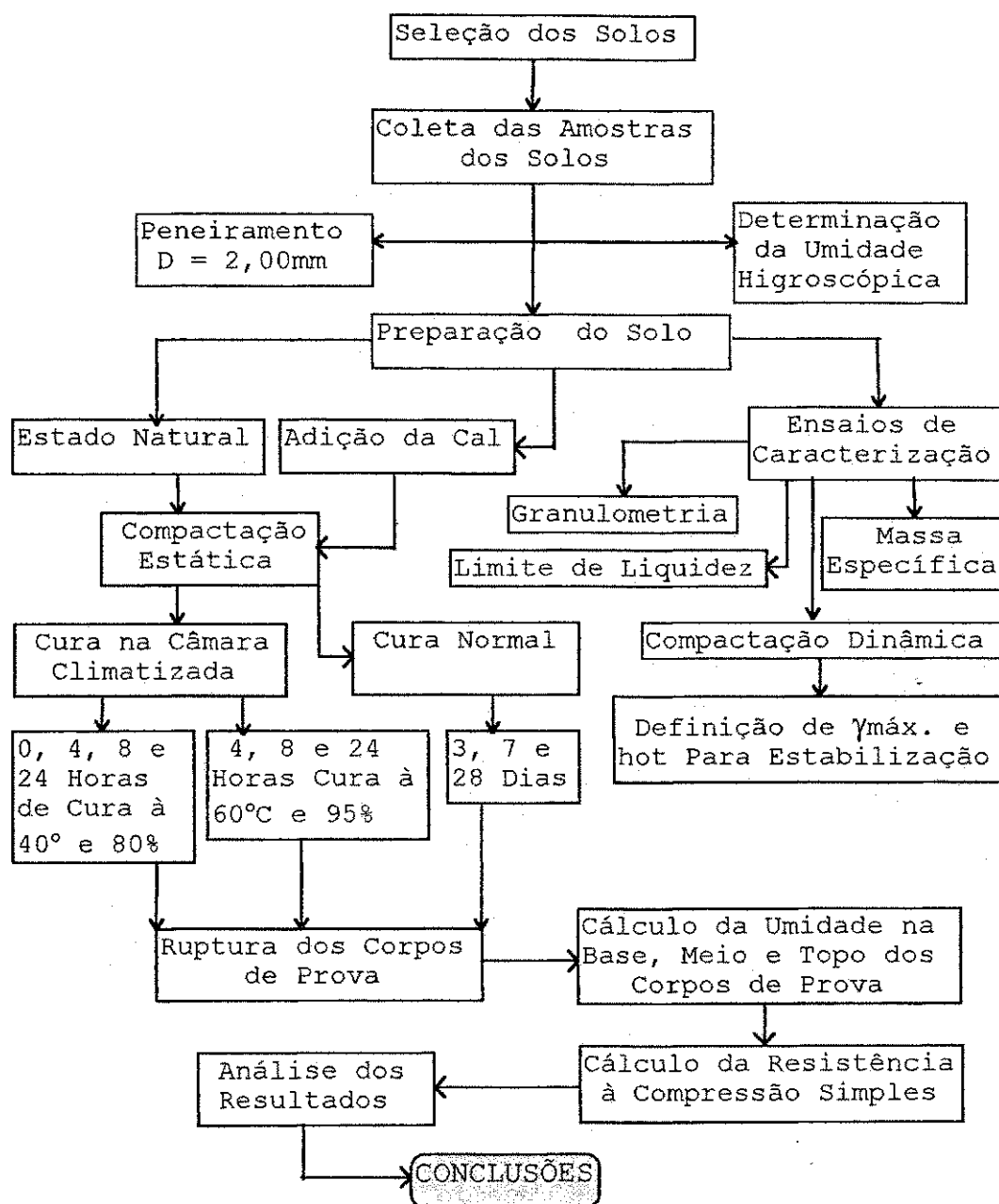


Figura 3.1-Fluxograma de Atividades Realizadas na Pesquisa

### 3.2.1.1 - Características Geológicas dos Solos

As informações quanto as características geológicas dos solos, localização e descrição de cada perfil esquemático das jazidas, são citadas de acordo com o Ministério da Agricultura-SUDENE (1972), Departamento Nacional de Produção Mineral (1974), SUDENE (1974, 1974b, 1977), Queiroz de Carvalho (1979) e Borba (1981) e, apresentadas nos Quadros 1, 2, 3, 4 e 5.

A Jazida Bananeiras, consta de uma camada de humus de espessura de 30 cm, logo após vem uma camada de 60 cm de argila marrom-avermelhada, seguida de 5,0 m de um pedregulho laterizado na matriz de um material argiloso avermelhado e, por fim encontra-se uma camada de 4,0 m de material argiloso vermelho-escuro mesclado de marrom e argila mais clara.

A Jazida Sapé apresenta uma camada de solo muito fino até 1,40 m, seguido de uma espessura concrecionária de 60-80 cm. Após esta faixa concrecionária aparece uma camada de 1,0 m de argila com concreções lateríticas duras, em seguida vem uma fina camada de 20 a 40 cm de espessura de uma argila vermelha mais solta e, finalmente uma argila arenosa de espessura desconhecida.

A Jazida Teixeira é constituída de apenas duas camadas visíveis, a superior com espessura entre 20 e 30 cm de material areno-argiloso com cascalhos lateríticos, e a inferior, com 2,70 m de um solo fino, de cor variada (vermelho, amarelo e branco), com grande quantidade de solo areno-siltoso.

A Jazida Cuité apresenta inicialmente uma camada de 20 cm de humus com grande quantidade de cascalho, seguida de um material fino de cor amarela com grande quantidade de concreções de dimensões variadas de cor vermelha e com espessura de 2m.

A Jazida Areia consiste inicialmente de uma camada de 60 a 80 cm de um material areno-siltoso de cor escura, seguido de um material de cor avermelhada com cascalho laterítico em grande quantidade, cuja espessura é entre 40 a 50 cm. Após esta camada

encontra-se uma outra camada de cascalho laterítico de cor avermelhada com diâmetro menor do que 2,54 cm.

B A N A N E I R A S
Localização: Margem esquerda da rodovia, sentido Campina Grande/Bananeiras, à 4 Km da cidade de Bananeiras
Formação Geológica: Formação Barreiras datada do terciário, constituída de arenitos argilosos e cauliniticos, arenitos conglomeráticos.
Pedologia:PELL - Associação de podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico com a proeminente textura argilosa, fase floresta subperenefólia relevo forte e ondulado e solos litólicos eutróficos.
Clima:As - Quente com chuva de outono a inverno
Precipitação: 1000 a 1200 mm

Quadro 1 - Características Geológicas da Jazida Bananeiras

S A P É
Localização: Margem direita da Rodovia Pb-055, à 6 Km da cidade de Mari Pb.
Formação Geológica: É uma formação Barreiras, datada do terciário, constituída de sedimentos pouco consolidados, cuja estratificação é predominantemente horizontal, afossilíferos apresentando sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, arenosos, argila de coloração variada intercalando muitas vezes com camadas de seixo rolados e concreções lateríticas.
Pedologia: PV6 (Podzólico Vermelho Amarelo com proeminente textura argilosa)
Clima: Quente de seca atenuada com índice xerotérmico variando de 40 a 100, apresentando de 3 à 4 meses secos
Precipitação : Média anual de 1100 mm

Quadro 2 - Características Geológicas da Jazida Sapé

T E I X E I R A
Localização: Rodovia Pb-306, na margem esquerda à 8 Km da cidade Teixeira Pb
Formação Geológica: É uma formação da Serra dos Martins, que data do terciário, consistindo de sedimentos argilosos, arenitos, arenitos ferruginosos fortemente cimentados por limonita, além decangas lateríticas, repousando sobre terrenos do Pré-Cambriano.
Pedologia: Ree3 (Regosol Eutrófico e Solos Litólicos Eutróficos apresentando textura arenosa.
Clima: Tropical quente seca atenuada com índice xerotérmico variando entre 150 e 200 sendo a temperatura do mês mais frio, superior a 15°C.
Precipitação: 500 mm

Quadro 3 - Características Geológicas da Jazida Teixeira

C U I T É
Localização: Margem direita da rodovia Pb-149, à 700m da cidade de Cuité Pb.
Formação Geológica: É uma formação da Serra dos Martins consistindo de sedimentos argilosos arenitos silicificados, arenitos ferruginosos fortemente cimentados por limonita além de cangas lateríticas, repousando sobre terrenos do Pré-Cambriano. A formação é datada do terciário.
Pedologia: LVEL (Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico), apresentando textura argilosa.
clima: Quente de seca média, com índice xerotérmico variando de 100 a 150, apresentando de 5 a 6 meses secos.
Precipitação: Média anual de 400 mm

Quadro 4 - Características Geológicas da Jazida Cuité

A R E I A
Localização: Margem esquerda da rodovia Pb-079, à 5 Km da cidade de Remígio Pb.
Formação Geológica: Pré-Cambriano representado na Paraíba por gnaisses e migmatitos.
Pedologia: PE-13 com textura proeminentemente argilosa e Solos Litolíticos Eutróficos
Clima: Sub-seco com índice xerotérmico de 0 a 40, apresentando de 1 a 2 meses secos.
Precipitação: Média anual de 1000 mm.

Quadro 5 - Características Geológicas da Jazida Areia

### 3.2.2 - Cal

No processo de estabilização foi utilizada uma cal calcítica, cujo nome comercial é Cal Garça, fabricada pela SOCAL Indústria e Comércio Ltda, localizada no estado da Paraíba. No Quadro 6 consta a composição química da cal. Após adquirir a cal em sacos plásticos, seu armazenamento era feito em depósitos hermeticamente fechados, para evitar que suas propriedades químicas fossem alteradas, mesmo assim a cada 7 dias, era feita aquisição de novo material.

Descrição	Quantidade, %
PR (Perda ao rubro)	32,02%
SiO <sub>2</sub> (Óxido de silício)	6,42%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de alumínio)	0,75%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de ferro)	0,15%
CaO (Óxido de cálcio)	47,04%
MgO (Óxido de magnésio)	11,89%

Quadro 6 - Composição Química da Cal Utilizada na Pesquisa

### 3.3 - Métodos de Ensaio e Preparação das Amostras

Após a preparação, as amostras foram submetidas aos ensaios de granulometria, limite de liquidez, massa específica e compactação dinâmica, este último para auxiliar a definir a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo para o processo de estabilização com cal

### 3.3.1 - Análise Granulométrica por Peneiramento

Para a execução da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foram utilizados os Métodos de Ensaio preconizados pela Norma da ABNT NBR 7181/84.

### 3.3.2 - Teor de Umidade

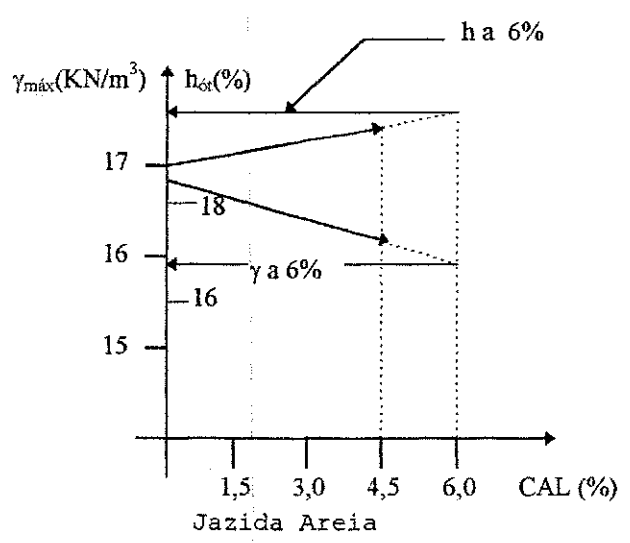
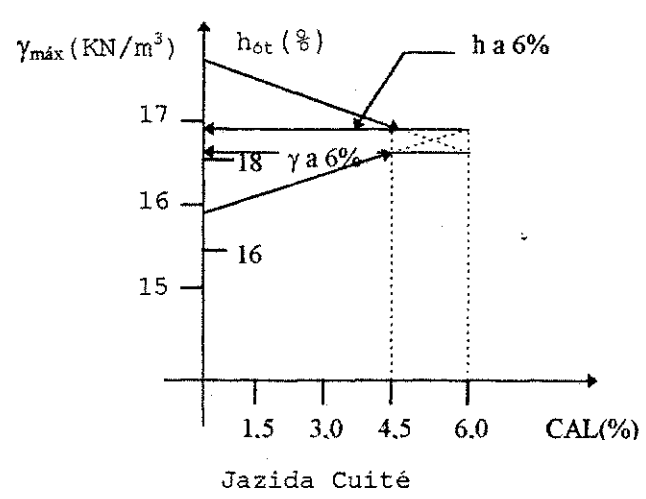
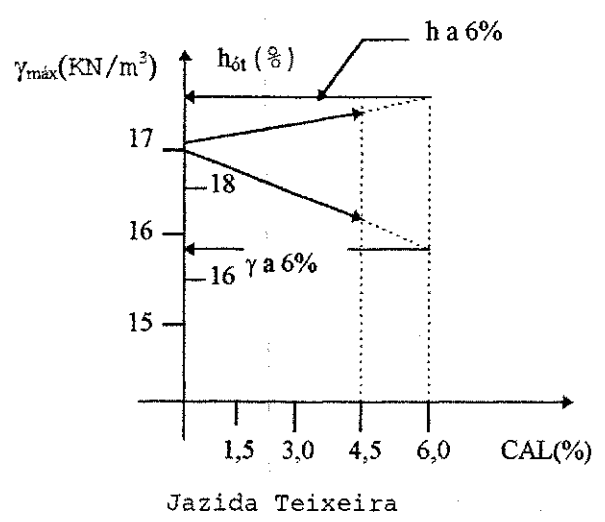
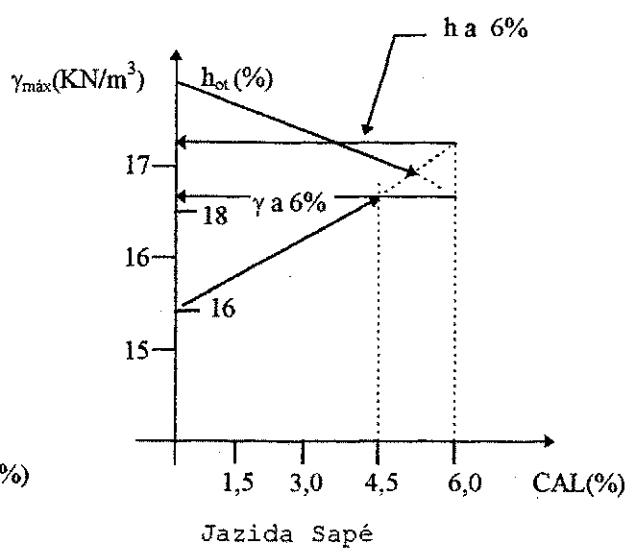
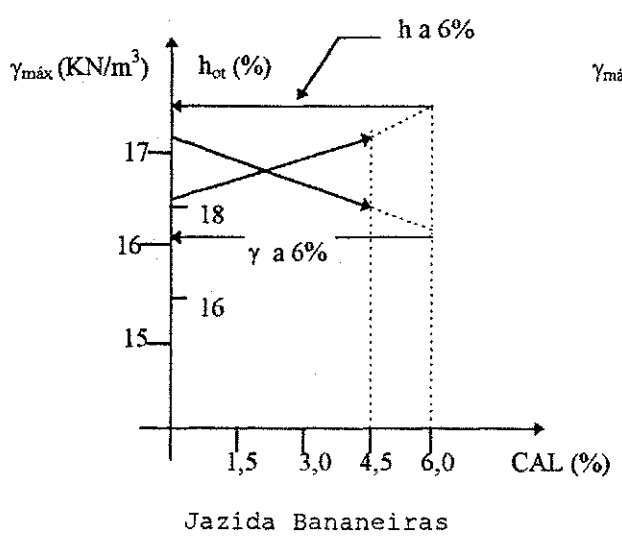
Para a determinação do teor de umidade, inicialmente as amostras de solo foram secas ao ar e, armazenadas em sacos plásticos e posteriormente submetidas a secagem em estufa à  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , usou-se considerar como resultado final, a média aritmética de duas determinações.

### 3.3.3 - Compactação Dinâmica

A compactação dinâmica obedeceu a Norma da ABNT - MB33 e, foi realizada com o solo no estado natural, com o intuito de obter os parâmetros de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, os quais foram necessários para as equações que avaliam estatisticamente a relação existente entre a interação solo-cal e determinadas propriedades de engenharia, desenvolvidas por Queiroz de Carvalho (1980). Assim, para definir os parâmetros de compactação, massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{\text{máx.}}$ ) e umidade ótima ( $h_{\text{ót.}}$ ) do solo estabilizado, foram utilizadas as seguintes equações:

$$Y_3 = 1,094X_3 - 3,31 \quad R = 0,92; \text{ DF} = 17; S = 0,001$$

$$Y_4 = 0,901X_4 + 0,235 \quad R = 0,83; \text{ DF} = 17; S = 0,001$$



Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5  
 Determinação de  $\gamma_{m\acute{a}x}$  (KN/m<sup>3</sup>)  
 e,  $h_{ot}$  (%), para os solos  
 estabilizados

onde:  $Y_3$  = teor de umidade ótimo (%), solo natural;

$X_3$  = teor de umidade ótimo (%), solo estabilizado;

$Y_4$  = massa específica aparente seca máxima ( $\text{kN/m}^3$ ),  
solo natural,

$X_4$  = massa específica aparente seca máxima ( $\text{kN/m}^3$ ),  
solo estabilizado;

DF = graus de liberdade;

S = nível de significância;

R = coeficiente de correlação.

Estas equações, são altamente significativas, porque  $S = 0,001$  para todas as correlações lineares. Estas equações determinam os parâmetros ( $\gamma_{\text{máx.}}$ ) e, ( $h_{\text{ót.}}$ ) para o solo estabilizado com 4,5% de cal em peso/massa. Para o emprego na presente pesquisa, os respectivos valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, para os solos estabilizados com 6% de cal, foram utilizados os Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5

### 3.3.4 - Preparação dos Corpos de Prova

#### 3.3.4.1 - Solo Natural

A moldagem dos corpos de prova no estado natural consistiu de:

- pesagem do solo e da água, obedecendo as quantidades adequadas à se obter a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima;



- homogeneização da mistura pelo processo manual, por se tratar de pequenas quantidades, e pela experiência mostrar que o processo manual oferece resultados satisfatórios;
- após depositar o material nos moldes de PVC, com 8,0 cm de altura e 4,0 cm de diâmetro, fazia-se a compactação estática;
- para cada condição de cura (mesmo sem a adição da cal) e, para cada tipo de solo, foram preparados 3 corpos de prova.

#### **3.3.4.2 - Solo Estabilizado**

A preparação dos corpos de prova com o solo estabilizado com 6,0 % de cal em peso, consistiu de:

- pesagem do solo, da cal e da água, obedecendo as quantidades adequadas à se obter a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima;
- homogeneização da mistura pelo processo manual, por se tratar de pequenas quantidades e, pela experiência mostrar que o processo manual oferece resultados satisfatórios;
- após depositar o material homogeneizado nos moldes de PVC, com 8,0 cm de altura e 4,0 cm de diâmetro, fazia-se a compactação estática;
- em cada condição de cura foram preparados 3 corpos de prova.

#### **3.3.4.3 - Compactação Estática**

O método de compactação estática usado para moldar os corpos de prova, que foram submetidos ao ensaio para determinação da resistência à compressão simples (RCS), foi o de compactação estática na máquina Farnell e, foi aplicada uma energia de compactação capaz de causar efeito idêntico a carga aplicada na compactação dinâmica. A primeira carga foi aplicada no topo do

cilindro e, a segunda na outra extremidade do cilindro, ou base, até que o corpo de prova chegasse a altura de 8,0 cm  $\pm$  0,2 cm. Foram desprezados os corpos de prova nos quais o ensaio dinâmico não foi fielmente reproduzido, ou seja, aqueles cuja massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{max.}$ ) e a umidade ótima ( $h_{ot.}$ ) divergiram de  $\pm 10\%$  e  $\pm 5\%$  respectivamente.

### 3.3.5 - Cura

#### 3.3.5.1 - Cura em Câmara Climatizada

Após desmoldar os corpos de prova com solo no estado natural e com solo estabilizado, foram etiquetados e, imediatamente transportados em sacos plásticos para a câmara de climatização (exceto os que foram rompidos com 0 hora de cura), para serem submetidos à 4, 8 e 24 horas de cura à 40°C de temperatura e 80% de umidade. Para a cura dos corpos de prova, utilizou-se uma câmara climatizada tipo Blue M, com temperatura e umidade controladas em conjunto ou isoladamente. Foram usados os tempos de 0, 4, 8 e 24 horas, combinadas com a temperatura de 40°C e umidade de 80% e temperatura de 60°C e umidade de 95%.

#### 3.3.5.2 - Cura em Câmara Úmida

Imediatamente após serem desmoldados, os corpos de prova, eram etiquetados e acondicionados em sacos plásticos e levados à câmara úmida onde ficavam "imersos" na areia que era umedecida todos os dias, para que não houvesse alteração na saturação de 100%, nem na temperatura de 22°C  $\pm$  2°C. Tanto os corpos de prova

no estado natural, quanto os estabilizados foram submetidos à esse processo de cura por 3, 7 e 28 dias.

### **3.3.6 - Ensaio Para Determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS)**

Quando os corpos de prova atingiam seu tempo de cura, eram pesados e levados a uma prensa universal, da marca Pavitest, provida de anel dinamométrico de constante 3,5198 KN/div. Aplicou-se uma velocidade de deslocamento de 0,05 cm/min.

### **3.3.7 - Determinação das Umidades nos Corpos de Prova**

Após o ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de prova foram destorroados e, foram retiradas amostras, nas extremidades superior e inferior e, também no plano de ruptura, de modo à permitir a avaliação da umidade.

### **3.3.8 - Comportamento Tensão x Deformação**

O comportamento tensão - deformação, foi analisado, traçando-se as curvas tensão - deformação, obtidas nos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples.

## C A P Í T U L O 4

3.

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1 - Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nesta pesquisa. Com o objetivo de melhor caracterizar os solos utilizados, será feita uma apresentação de resultados obtidos por outros pesquisadores, que também pesquisaram os solos selecionados para esta pesquisa.

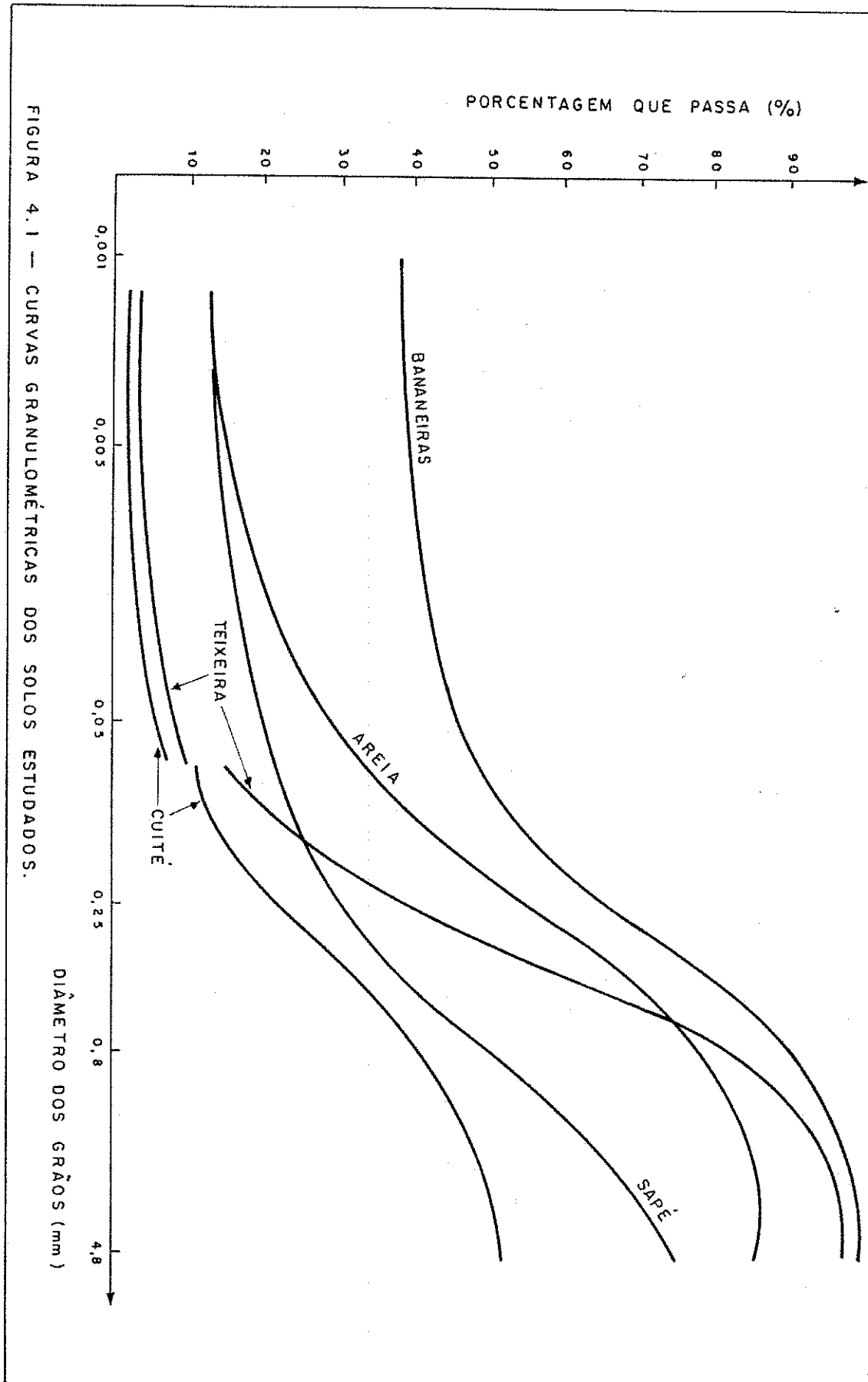
#### 4.2- Plasticidade e Granulometria

##### 4.2.1 - Características de Plasticidade

Segundo Borba (1981), Diniz (1984), Telino (1992) e Queiroz de Carvalho (1979), os solos estudados nesta pesquisa apresentam as características de plasticidade conforme mostradas na Tabela 4.1. Baseado nos valores do limite de liquidez e de do limite de plasticidade, os solos são classificados como solos de baixa à mediana plasticidade.

##### 4.2.2 - Granulometria

As análises granulométricas dos solos estudados encontram-se na Tabela 4.1., e as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 4.1. Utilizando-se a Classificação Unificada dos Solos, os solos são classificados como: o solo SAPÉ, é um solo SC, enquanto os solos BAPB, TEPB, CTPB, e ARPB, são classificados como sendo SM. Portanto, os solos estudados são areno-siltosos-argilosos.



## 4.3 - Análise dos Resultados Obtidos Nesta Pesquisa

### 4.3.1 - Introdução

Será feita uma análise dos resultados, em termos de resistência à compressão simples (RCS) dos solos no estado natural e após estabilizados com cal no processo de cura normal/tradicional e também pelo processo acelerado de cura em câmara climatizada. Ao longo da discussão dos resultados obtidos para a resistência à compressão simples, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o controle da umidade dos corpos de prova, em todas as fase dos ensaios realizados. Também, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no que se refere as relações tensão-deformação dos solos estudados, definidas apartir dos resultados dos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples.

SOLO	Porcentagem Passando nas Peneiras							LL / LP, %	IP
	25,5	19,1	9,5	2,0	0,42	0,074	0,002		
BAPB	100,0	100,0	99,7	97,8	78,6	47,6	38,0	29,4/17,5	11,9
SAPÉ	100,0	87,7	70,0	18,7	14,7	22,2	21,0	36,6/24,5	12,1
TEPB	100,0	100,0	98,3	95,5	59,2	10,0	12,3	38,7/28,0	11,7
CTPB	100,0	97,6	69,6	43,6	31,5	11,0	4,0	23,7/18,0	5,7
ARPB	97,8	94,4	88,4	84,8	66,3	35,0	2,0	46,7/31,5	15,2

Tabela 4.1 - Análise Granulométrica e Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

### 4.3.2 - Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Bananeiras

A Tabela 4.2, mostra os resultados com relação à resistência à compressão simples (RCS), do solo Bananeiras no estado natural e após estabilizado com cal e submetido ao processo de cura acelerado em câmara climatizada à uma temperatura constante e controlada de 40°C e umidade constante e controlada de 80%.

Se observa da Tabela 4.2, que a resistência à compressão simples (RCS) do solo **Bananeiras**, no estado natural e com 0 hora de cura, ou seja, RCS determinada logo após a preparação dos corpos de prova, variou de 158 kPa à 197 kPa, com uma média de 177 kPa. Quando o tempo de permanência foi de 8 horas, o valor da resistência à compressão simples foi de 190 kPa. Para uma permanência de 24 horas na câmara climatizada, obteve-se uma variação no valor da resistência à compressão simples de 162 kPa à 169 kPa, com uma média de 165 kPa. Como se observa nesta condição, praticamente, não houve variação significativa nos valores da resistência à compressão simples do solo no solo no estado natural. Isto indica que o processo/sistemática de cura adotada, apresentou resultados bem satisfatórios do ponto de vista da repetibilidade. Para a mesma condição de cura em câmara climatizada à uma temperatura de 40°C e, umidade de 80%, o solo **Bananeiras** estabilizado com cal, apresentou valores da RCS, variando de 314 kPa à 362 kPa, com uma média de 338 kPa, determinados com corpos de prova com 0 hora de permanência em câmara climatizada, ou seja, esta resistência foi determinada logo após a preparação dos corpos de prova. Quando este tempo foi de 4 horas os valores da RCS, variaram de 487 kPa à 494 kPa, com uma média de 490 kPa. Para o tempo de cura de 8 horas, a RCS média determinada foi de 949 kPa. Para uma cura de 24 horas, os valores da resistência à compressão simples variaram de 1.406 kPa à 1.767 kPa, com uma média de 1.586 kPa. Também para o solo estabilizado, a exemplo do solo no estado natural, observa-se uma coerência para todos os valores obtidos. Quando as condições de cura em câmara climatizada, conforme mostrado na Tabela 4.3, foram de 60°C de temperatura e, 95% de umidade, os valores da resistência à compressão simples do solo **Bananeiras** no estado natural, foram constantes e iguais à 242 kPa, para um tempo de permanência de 4 horas. Quando este tempo foi de 8 horas, a resistência à compressão simples foi de 202 kPa. Para o tempo de cura de 24 horas, os valores da resistência à compressão simples variaram de 293 kPa à 322 kPa, com uma média de 307 kPa. Para as mesmas condições de cura em câmara climatizada, o solo quando estabilizado apresentou

valores de RCS que variaram em média de 509 kPa, 1.086 kPa e 2.188 kPa, quando o tempo de cura foi de 4, 8 e 24 horas respectivamente. Na Tabela 4.4, são mostrados os valores da resistência à compressão simples para o solo **Bananeiras**, no estado natural e estabilizado com cal e submetido ao processo de cura normal, ou seja, cura no processo de câmara saturada à uma temperatura de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 28 dias. Na Tabela 4.4, os valores médios da resistência à compressão simples para um período de cura de 3, 7 e 28 dias, foram respectivamente 727 kPa, 1.079 kPa e 1.412 kPa, todos com excelente repetibilidade. Para as mesmas condições de cura o solo no estado natural, os valores da resistência à compressão simples (RCS), variaram de 396 kPa à 511 kPa. Como se pode observar, o solo **Bananeiras**, tanto pelo processo normal de cura normal, quanto pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada, respondeu de maneira positiva e significativa ao processo de estabilização à cal, o que fortalece a validade de análise dos resultados obtidos. Considerando que a resistência à compressão simples determinada pelo processo de cura normal à 28 dias e temperatura de  $22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , é o valor adotado na prática, pode-se então adotá-lo como padrão ou mesmo referência. Para o solo **Bananeiras**, a RCS passou de 511 kPa para 1.412 kPa, aumentando assim de 901 kPa ou 276%. Comparando com os valores da RCS, obtidos pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada, obteve-se que a RCS determinada com cura durante 24 horas à  $40^{\circ}\text{C}$ , com 80% de umidade, foi de 1.586 kPa, portanto identificável com o valor considerado referência de 1.412 kPa, obtido com o processo de cura normal. Os outros valores de resistência à compressão simples, obtidos em câmara climatizada e, com outras condições combinadas de temperatura, umidade e tempo de cura, não são igualmente comparados com o valor (RCS=1.412 kPa) de referência da RCS, obtido pelo processo de cura normal. Por exemplo, para tempos de cura menores, os valores de RCS, foram inferiores (338 kPa à 949 kPa ou 509 kPa à 1.086 kPa), ao padrão de 1.412 kPa. Para o tempo e cura semelhantes, mas aumentando a temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  para  $60^{\circ}\text{C}$ , os valores da RCS foram maiores (2.188kPa) portanto, fora da faixa considerada aceitável.



Tempo Cura	Tipo de Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
		CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
0 hora	-----	197	158	---	177	314	---	362	338
4 horas	CC 40°C	266	297	---	282	---	494	487	490
8 horas	CC 40°C	---	190	---	190	750	594*	949	949
24horas	CC 40°C	169	---	162	165	---	1.406	1.767	1.586

Tabela 4.2 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Para o Solo Bananeiras, Corpos de Prova (CP) Número 1, 2 e 3, Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 40°C e, Umidade de 80%.

Tempo Cura	Tipo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
		CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
4 horas	CC 60°C	243	243	242	242	508	---	509	509
8 horas	CC 60°C	200	---	205	202	764*	1.103	1.070	1.086
24horas	CC 60°C	322	293	---	307	2.221	2.093	2.251	2.188

Tabela 4.3 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Para o Solo Bananeiras, Corpos de Prova (CP) Número 1, 2 e 3 Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 60°C e, Umidade de 95%.

Tempo cura	Tipo de Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
		CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
3 dias	CN 100%	394	397	395	396	736	721	725	727
7 dias	CN 100%	408	403	407	406	1.075	1.078	1.084	1.079
28dias	CN 100%	---	515	508	511	1.358	1.470	1.410	1.412

Tabela 4.4 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Para o Solo Bananeiras, Corpos de Prova (CP) Número 1, 2 e 3 Processo de Cura Normal (CN) a uma Temperatura de 22°C ± 2°C e Umidade de 100%.

(\*) Valor não utilizado na média.

u.2

O alto valor de 2.188kPa, se deve muito provavelmente, ao fato de que mudando-se a temperatura de 40°C para 60°C, houve uma redução na umidade do corpo de prova, redução esta que não foi compensada pela umidade existente no sistema, mesmo com o aumento desta umidade de 80% para 95%. Como se sabe, a resistência não drenada de um solo, é função do grau de saturação (teor de umidade), ou seja: uma redução no teor de umidade, tende a aumentar o valor da respectiva resistência. Assim, a umidade existente no sistema, mesmo tendo sido de 95% foi consumida para o endurecimento do corpo de prova e, conseqüentemente, para um aumento da sua resistência à compressão simples, mesmo com a probabilidade de não ter ocorrido uma plena estabilização. Isto sugere, que a temperatura é mais sensível quando comparada com umidade. Neste caso, a mudança de temperatura de 40°C para 60°C, afetou mais os valores da resistência à compressão simples, do que a mudança de umidade.

#### 4.3.3 - Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Sapé

O solo Sapé, apresentou valores médios da resistência à compressão simples (RCS) variando de 448 kPa à 2.037 kPa, conforme mostrado nas Tabelas 4.5 à 4.7. Na Tabela 4.5, encontra-se os valores da RCS no estado natural e estabilizado com cal, submetido a 0, 4, 8 e 24 horas de cura em câmara climatizada, com temperatura e umidade controladas de 40°C e 80% respectivamente. Os corpos de prova cuja resistência à compressão simples foi determinada logo após a preparação, ou seja, com 0 hora de cura, apresentaram valores cuja média foi 652 kPa, quando no estado natural e, 448 kPa quando estabilizado. Neste caso logo após a adição da cal e compactado estaticamente, não havendo tempo para estabilizar. Com 4 horas de cura em câmara climatizada, à uma temperatura de 40°C e

umidade de 80%, os valores da resistência à compressão simples do solo **Sapé** no estado natural variaram de 485 kPa à 521 kPa com um valor médio de 503 kPa, e estabilizado apresentaram valores que variaram de 477 kPa à 529 kPa, com uma média de 508 kPa. Por outro lado, como se observa da Tabela 4.6, para o solo **Sapé** no estado natural com 4 horas de cura à 60°C de temperatura e 95% de umidade, o valor da RCS variou de 483 kPa à 517 kPa, com uma média de 500 kPa, porém o solo **Sapé** estabilizado, submetido as mesmas condições teve RCS variando de 1.126 kPa à 1.228 kPa, com um valor médio de 1.177 kPa. Comparando a Tabela 4.5 com a Tabela 4.6, vê-se que com 8 horas de cura, em câmara climatizada, a 40°C de temperatura e 80% de umidade o solo **Sapé** estabilizado apresentou valores da RCS que variaram de 589 kPa à 600 kPa com um valor médio de 595 kPa e, com o mesmo tempo de cura de 8 horas, porém com 60°C de temperatura e 95% de umidade, o valor médio da resistência à compressão simples foi de 1.507 kPa. Já para 24 horas de cura na câmara climatizada, os valores da RCS, no estado natural, para 40°C e 80% e, para 60°C e 95% de temperatura e umidade, os valores médios da resistência à compressão simples foram de 1.206 kPa e 1.282 kPa respectivamente, no entanto, quando estabilizado e submetido à 24 horas de cura em câmara climatizada com temperatura e umidade de 40°C e 80%, o solo **Sapé** teve como valores da resistência à compressão simples, 1.200 kPa, 1.203 kPa e 1.130 kPa com uma média de 1.166 kPa. Estes valores foram visivelmente superados com 24 horas de cura, também em câmara climatizada, porém a uma temperatura de 60°C e uma umidade de 95%. Os valores da resistência à compressão simples, para esta condição foram de 1.994 kPa e 2.081 kPa, cujo valor médio de 2.037 kPa. A Tabela 4.7, apresenta os valores da resistência à compressão simples para o solo **Sapé**, no estado natural e estabilizado com cal e submetido ao processo normal de cura, ou seja, cura em câmara úmida (umidade 100%) à uma temperatura de 22°C ± 2°C. Desta Tabela observa-se que os valores médios da RCS para o solo no estado natural, com um período de cura de 3, 7 e 28 dias, foram respectivamente 771 kPa, 956 kPa e 900 kPa.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
0 hora	---	652	---	652	430	---	466	448
4 horas	485	521	---	503	518	529	477	508
8 horas	564	586	---	575	600	---	589	595
24horas	1.126	1.393	1.287	1.206	899*	1.206	1.130	1.166

Tabela 4.5 - Valores da Resistência à Compressão Simples kPa, Solo Sapé, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3, Cura em Câmara Climatizada (CC) a Temperatura de 40°C e Umidade de 80%.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
4 horas	483	---	517	500	1.126	---	1.228	1.177
8 horas	612	621	569	600	1.508	1.496	1.520	1.507
24horas	1.457	1.014	1.276	1.282	2.081	---	1.994	2.037

Tabela 4.6 - Valores da Resistência à Compressão Simples, kPa Solo Sapé, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Com Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 60°C e Umidade de 95%.

Tempo cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
3 dias	---	780	763	771	729	---	717	723
7 dias	917	998	---	956	781	776	---	778
28dias	900	---	---	900	1.206	1.208	1.203	1.206

Tabela 4.7 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Sapé, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3, Cura Normal (CN) a Temperatura=22°C ± 2°C e Umidade de 100%.

(\*) Valor não utilizado na média.

Tabela 4.7, apresenta também os valores da resistência à compressão simples do solo **Sapé** estabilizado, submetido as mesmas condições e tempos de cura, onde para 3 dias o valor médio da resistência à compressão simples foi de 723 kPa; para 7 dias de cura o valor da RCS variou de 776 kPa à 781 kPa, com uma média de 778 kPa, e com 28 dias em câmara úmida normal obteve-se valores que variaram de 1.203 kPa à 1.208 kPa, com média de 1.206 kPa. O valor da resistência à compressão simples do solo **Sapé** submetido ao processo de cura normal à 28 dias e temperatura de  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , foi tomado como valor padrão ou valor de referência, ou seja, 900 kPa para o solo **Sapé** no estado natural, e 1.206 kPa para o solo **Sapé** estabilizado. Desta forma, houve um aumento da resistência à compressão simples de 300 kPa devido a estabilização, uma vez que as condições de cura foram as mesmas. Como se observa, em todas as condições, os valores obtidos para a RCS, foram de excelente repetibilidade, o que assegura uma análise dos resultados com uma confiança adequada. Este aumento de RCS, identificável aqui como um índice de estabilização ou potencial do solo em reagir com a cal produzindo um aumento de resistência, de forma semelhante ao índice de reatividade (IR) à cal de Thompson (1966), é um indicativo de que o solo reagiu bem ao processo de estabilização com cal. Fazendo uma comparação entre o valor padrão e os valores da RCS obtidos pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada, observa-se que a resistência à compressão simples atingida com permanência de 24 horas à  $40^{\circ}\text{C}$  e 80% de umidade, ou seja, que 1.166 kPa é um valor que se identifica com o valor padrão. Para 4 horas de cura em câmara climatizada à  $60^{\circ}\text{C}$  e 95% de umidade, o solo **Sapé** apresentou um valor da resistência à compressão simples de 1.177 kPa, valor este também compatível com o valor padrão anteriormente citado. Já os outros valores da RCS, obtidos em câmara climatizada e, com diferentes condições de temperatura, umidade e tempos de cura, não são igualmente comparados com o valor padrão (RCS = 1.206 kPa) e de referência de RCS, obtido pelo processo de cura normal.

#### 4.3.4 - Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Teixeira

As Tabelas 4.8 À 4.10, apresentam os valores da resistência à compressão simples do solo **Teixeira**, no estado natural e estabilizado com cal, sendo que na Tabela 4.8, constam os valores da RCS, dos corpos de prova submetidos ao processo de cura acelerado na câmara climatizada à uma temperatura constante e controlada de 40°C e, à uma umidade constante e controlada de 80%. Desta Tabela observa-se que a resistência à compressão simples, do solo **Teixeira** no estado natural e, com 0 hora de cura, ou seja, RCS determinada logo após a preparação dos corpos de prova, variou de 99 kPa à 107 kPa, com uma média de 103 kPa. Quando o tempo de permanência dos corpos de prova na câmara climatizada foi de 8 horas, o valor médio da resistência à compressão simples foi de 182 kPa. Para uma permanência de 24 horas na câmara climatizada, obteve-se uma variação de 188 kPa à 193 kPa no valor da resistência à compressão simples, com uma média de 190 kPa. Já para o solo estabilizado com cal, sob a mesma condição de cura, ou seja, em câmara climatizada à uma temperatura de 40°C e, à uma umidade de 80%, o solo **Teixeira** apresentou valores da resistência à compressão simples, variando de 138 kPa à 151 kPa, com uma média de 144 kPa, quando determinados em corpos de prova com 0 hora de cura. Quando este tempo foi de 4 horas, os valores da RCS, variaram de 124 kPa à 143 kPa com uma média de 133 kPa. Para o tempo de cura de 8 horas, o valor da resistência à compressão simples, obtida foi de 576 kPa. Os valores da resistência à compressão simples, obtidos com os corpos de prova do solo **Teixeira** no estado natural e estabilizado com cal, submetidos ao processo de cura acelerado na câmara climatizada à uma temperatura constante e controlada de 60°C e, à uma umidade constante e controlada de 95%, são mostrados na Tabela 4.9. Quando o tempo de permanência dos corpos de prova no estado natural foi de 4 horas, os valores da resistência à compressão simples variaram de 90 kPa à 99 kPa, com uma média de 95 kPa.

Para o tempo de permanência de 8 horas obteve-se o valor médio de 141 kPa. Com 24 horas de cura o valor médio da resistência à compressão simples foi de 212 kPa. O solo **Teixeira** estabilizado, com 4 horas de permanência em câmara climatizada à 60°C e, com 95% de umidade, apresentou valores variando de 249 kPa à 316 kPa, com uma média de 252 kPa. Quando o tempo de permanência em câmara climatizada foi de 8 horas, o valor da resistência à compressão simples foi de 310 kPa. Para 24 horas de cura os valores variaram de 924 kPa à 966 kPa, com a média de 945 kPa. A Tabela 4.10, apresenta os valores da resistência à compressão simples para o solo **Teixeira**, no estado natural e estabilizado com cal e submetido ao processo normal de cura, ou seja, cura em processo equivalente ao de câmara úmida à uma temperatura de 22°C ± 2°C. Desta Tabela pode-se observar que os valores médios da resistência à compressão simples para o solo no estado natural, com um período de cura de 3, 7 e 28 dias, foram respectivamente 261 kPa, 241 kPa e 213 kPa. A Tabela 4.9, apresenta também os valores da RCS do solo estabilizado, submetido as mesmas condições e tempos de cura, onde com 3 dias, valor médio da resistência à compressão simples foi de 368 kPa, para 7 dias o valor da RCS variou de 394 kPa à 438 kPa, com uma média de 414 kPa e, com 28 dias de cura em câmara úmida, obteve-se um valor médio de 611 kPa. Tomando como referência, o valor da RCS obtido com cura normal, que foi de 611 kPa, observa-se um acréscimo da RCS no estado natural de 405 kPa (a RCS do solo no estado natural foi de 213kPa). Fazendo-se uma comparação do valor padrão, com os valores da resistência à compressão simples obtidos pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada, observa-se que a RCS atingida com permanência de 24 horas à 40°C e, com 80% de umidade ou seja, que 576 kPa é um valor perfeitamente identificável com o padrão. Já os outros valores de resistência à compressão simples, obtidos em câmara climatizada e, com diferentes condições de temperatura, umidade e tempos de cura, não são igualmente comparados como valor (RCS = 611 kPa) padrão e de referência da RCS, obtido pelo processo de cura normal.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
0 hora	107	99	103	103	151	138	143	144
4 horas	172	170	162	168	143	124	132	133
8 horas	171	193	---	182	169	177	164	170
24horas	193	---	188	190	---	576	---	576

Tabela 4.8 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Teixeira, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3, Com Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura Igual à 40°C e Umidade de 80%.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
4 horas	---	90	99	95	316*	255	249	252
8 horas	---	155	127	141	---	310	---	310
24horas	260	---	164	212	966	---	924	945

Tabela 4.9 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Teixeira, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Com Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 60°C e Umidade de 95%.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
3 dias	270	251	262	261	369	367	---	368
7 dias	238	243	---	241	394	438	412	414
28dias	221	---	205	213	620	556*	603	611

Tabela 4.10-Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Teixeira, Com Corpos de Prova (CP) 1,2 e 3 Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C e Umidade de 100%.

(\* ) Valor não utilizado na média.



Comparando-se por exemplo, com os valores da RCS obtidos com tempos de cura menores do que 24 horas, (tempo onde obteve-se a RCS, tida como referência), observa-se que os valores da resistência à compressão simples, foram inferiores (144 kPa à 170 kPa ou 253 kPa à 310 kPa), ao padrão que foi 611 kPa. Para o mesmo tempo de cura mas com 60°C de temperatura e, 95% de umidade o valor da resistência à compressão simples atingiu 945 kPa, um valor fora da aceitação da repetibilidade das determinações. É provável, que quando da mudança de temperatura e umidade de 40°C e 80% de umidade, para 60°C e 95%, tenha havido uma redução na umidade do corpo de prova, e que esta não tenha sido compensada pelo aumento de umidade do sistema. É conveniente ressaltar, que uma redução no teor de umidade de um solo, resulta em um acréscimo de sua resistência não drenada. Desta forma atribui-se este aumento na resistência, ao não suprimento da umidade, quando da mudança de temperatura e umidade de 40°C e 80%, para 60°C e 95%. Pode-se observar, no entanto, que a condição mais adequada do processo de cura acelerado em câmara climatizada, para o solo **Teixeira**, é aquela correspondente à de um tempo de cura de 24 horas à uma temperatura de 40°C e 80% de umidade.

#### 4.3.5 - Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Cuité

Os valores da resistência à compressão simples do solo **Cuité** no estado natural e estabilizado com cal, são apresentados nas Tabelas 4.11 À 4.13. Para os corpos de prova curados na câmara de climatização à 40°C de temperatura e 80% de umidade, os valores da resistência à compressão simples, são apresentados na Tabela 4.11, onde também constam os que foram rompidos logo após a moldagem, ou seja, com 0 hora de cura. Os valores de resistência à compressão simples variaram de 50 kPa à 52 kPa, com uma média de 51 kPa para o solo no estado natural, e de

190 kPa à 210 kPa com um valor médio de 197 kPa para o solo estabilizado. Os corpos de prova, moldados com o solo no estado natural, submetidos à 4 horas de cura em câmara climatizada com temperatura e umidade controladas de 40°C e 80%, tiveram como valor médio de sua resistência à compressão simples 133 kPa, e sob as mesmas condições, porém estabilizado, o solo apresentou um valor da RCS de 208 kPa. Com 8 horas de cura à 40°C de temperatura e 80% de umidade e, no estado natural, o valor médio da resistência à compressão simples foi 121 kPa, e quando estabilizado, os valores da resistência à compressão simples foram 188 kPa, 201 kPa e 205 kPa, com uma média de 203 kPa. Analisando-se a Tabela 4.11, observa-se que os valores da RCS para o solo **Cuité**, com 24 horas de cura em câmara climatizada à 40°C de temperatura e 80% de umidade no estado natural e estabilizado, onde para o primeiro caso, o valor médio foi de 223 kPa e para o segundo, os valores foram de 320 kPa, 352 kPa e 377 kPa, com um valor médio de 350 kPa. Para o solo **Cuité** curado em câmara climatizada, à 60°C de temperatura e 95% de umidade, tem-se a apresentação dos valores da RCS na Tabela 4.12, onde vê-se que os corpos prova submetidos à 4 horas de cura, apresentaram 61 kPa à 74 kPa, com uma média de 68 kPa, para o solo no estado natural e, um valor médio de 128 kPa para o solo estabilizado. Com 8 horas de cura em câmara climatizada e sob as mesmas condições de temperatura e umidade, o solo **Cuité** não apresentou aumento significativo em sua resistência à compressão simples, que no estado natural foi de 58 kPa à 63 kPa, com uma média de 60 kPa, e quando estabilizado 140 kPa à 152 kPa, com uma média de 146 kPa. Analisando ainda a Tabela 4.12, onde constam também os valores da RCS para o solo **Cuité** no estado natural e estabilizado, com 24 horas de permanência, em processo de cura acelerado em câmara climatizada, à 60°C de temperatura e 95% de umidade, os valores da RCS variaram de 131 kPa à 145 kPa, com um valor médio de 180 kPa para o solo no segundo caso considerado. Os valores da resistência à compressão simples, obtidos com o solo estabilizado pelo processo de cura normal com 3, 7 e 28 dias de cura e, para o solo no estado natural, são apresentados na Tabela 4.13.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
0 hora	77*	52	50	51	190	192	210	197
4 horas	157	174*	133	133	---	208	---	208
8 horas	---	113	129	129	188*	201	205	203
24horas	155	--	369	223	377	352	320	350

Tabela 4.11-Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Cuité, Para os Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Cura em Câmara Climatizada (CC) a Temperatura de 40°C e Umidade de 80%.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
4 horas	61	--	74	68	127	128	---	128
8 horas	63	58	60	60	140	152	---	146
24horas	145	131	---	138	193	165	178	180

Tabela 4.12 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Cuité, Com os Corpos de Prova (CP) 1,2 e 3 Com Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 60°C e Umidade de 95%.

Tempo cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
3 dias	132	109	110	117	195	187	---	191
7 dias	108	107	---	108	223	141	220	195
28dias	102	117	105	109	267	248	257	257

Tabela 4.13 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Cuité, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Com Cura Normal (CN) à uma Temperatura de 22°C ± 2°C, Umidade=100%.

(\* ) Valor não utilizado na média.

Como se observa, para 3 dias de cura, os valores da RCS do solo **Cuité** no estado natural foram 109 kPa, 110 kPa e 132 kPa, e, para o solo estabilizado os valores da resistência à compressão simples foram 187 kPa e 195 kPa. Aos 7 dias de cura em câmara úmida observa-se mais uma vez, que o solo **Cuité** não apresentou aumento representativo de sua resistência à compressão simples, uma vez que valores apresentaram um valor médio de 108 kPa, para o solo no estado natural e 195 kPa, para o solo estabilizado. Com 28 dias de cura normal os valores da resistência à compressão simples foram 102 kPa, 105 kPa e 117 kPa, com uma média de 109 kPa, para o solo no estado natural e, 248 kPa, 257 kPa e 267 kPa para o solo estabilizado. Observa-se dos resultados apresentados, que o solo **Cuité**, reagiu de maneira razoável ao processo de estabilização. Os valores obtidos, devido a ótima repetibilidade, asseguram uma análise adequada. Comparando os valores da resistência à compressão simples obtidos com o solo **Cuité**, submetido ao processo de cura acelerado em câmara climatizada com os valores obtidos com o mesmo solo submetido ao processo de cura normal, (foi tomado como valor padrão ou valor de referência, aquele obtido à 28 dias de cura em câmara úmida, ou seja, 257 kPa), observa-se que este valor é mais comparável com 203 kPa, que foi obtido à 8 horas de cura em câmara climatizada, à 40°C de temperatura e com 80% de umidade. Observa-se que, de todos os solos estudados, o solo **Cuité** foi o que apresentou o menor índice de reatividade (IR) à cal (IR = valor da resistência à compressão simples do solo estabilizado menos o valor da resistência à compressão simples do solo no estado natural, de acordo com Thompson 1966). Este índice foi de somente 152 kPa, obtido utilizando-se os valores da RCS apresentados na Tabela 4.13. Por outro lado, observa-se da Tabela 4.1, que o solo **Cuité**, é aquele que tem um índice de plasticidade (IP) de somente 5,7%, enquanto que, para os demais solos, o IP variou de 10% à 15%. Este é mais um ponto favorável ao argumento de que, para um solo ser reativo (interagir com a cal, aumentando sua resistência, por exemplo), é preciso que tenha um mínimo de finos, representado aqui pelo índice de plasticidade.

#### 4.3.6 - Resultados da Resistência à Compressão Simples Para o Solo Areia

O solo **Areia**, apresentou valores para a resistência à compressão simples (RCS) que variaram de 208 kPa à 2.075 kPa, como consta nas Tabelas 4.14 à 4.16. A Tabela 4.14, mostra os resultados obtidos com o solo no estado natural e estabilizado com cal, e submetidos ao processo de cura acelerado em câmara climatizada à uma temperatura constante e controlada de 40°C, e à uma umidade constante e controlada de 80%. Como se observa desta Tabela 4.14, a resistência à compressão simples do solo **Areia**, no estado natural e, com 0 hora de cura, ou seja, RCS determinada logo após a preparação dos corpos de prova, variou de 292 kPa à 317 kPa, com uma média de 304 kPa. Quando o tempo de permanência dos corpos de prova na câmara climatizada foi de 4 horas, o valor da resistência à compressão simples foi de 311 kPa. Para uma permanência de 8 horas na câmara climatizada, obteve-se 376 kPa como valor da RCS. Os corpos de prova que permaneceram 24 horas na câmara climatizada apresentaram valores da resistência à compressão simples, variando de 625 kPa à 686 kPa, com uma média de 655 kPa. Para a mesma condição de cura em câmara climatizada à uma temperatura de 40°C e, umidade de 80%, o solo **Areia** estabilizado com cal apresentou valores da resistência à compressão simples, variando de 336 kPa 391 kPa, com uma média de 365 kPa, determinados em corpos de prova com 0 hora de cura, ou seja, esta resistência foi determinada logo após a preparação dos corpos de prova. Quando o tempo de cura foi de 4 horas, os valores da resistência à compressão simples variaram de 353 kPa à 378 kPa, com uma média de 365 kPa. Para o tempo de cura de 8 horas, a RCS de terminada foi de 418 kPa. Para 24 horas de permanência na câmara climatizada, os valores da resistência à compressão simples foram 1.830 kPa, 1.968 kPa e 2.183 kPa, com um valor médio de 2.075 kPa.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
0 hora	---	317	292	304	391	336	370	365
4 horas	311	---	---	311	378	353	---	365
8 horas	376	---	---	376	---	418	---	418
24horas	625	686	---	655	1.830*	2.183	1.968	2.075

Tabela 4.14 - Valores da Resistência à Compressão Simples kPa Solo Areia, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Cura em Câmara Climatizada (CC) a Temperatura de 40°C e Umidade de 80%.

Tempo Cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
4 horas	279*	304	258	280	562	518	493	524
8 horas	326	378	---	352	650*	776	823	800
24horas	---	597	559	578	1.577	1.846	1.696	1.706

Tabela 4.15 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Areia, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Com Cura em Câmara Climatizada (CC) a uma Temperatura de 60°C e Umidade de 95%.

Tempo cura	NATURAL				ESTABILIZADO			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
3 dias	417	415	418	417	460	366*	---	460
7 dias	414	340	---	414	773	781	---	777
28dias	700	720	696	705	1.890	1.912	2.076	1.958

Tabela 4.16 - Valores da Resistência à Compressão Simples (kPa) Solo Areia, Corpos de Prova (CP) 1, 2 e 3 Obtidos Com o Processo de Cura Normal (CN) à Temperatura de 22°C ± 2°C e Umidade de 100%.

(\*) Valor não utilizado na média.

O solo **Areia** estabilizado, apresentou um significativo aumento em sua resistência à compressão simples, com 24 horas de permanência em câmara climatizada, como pode-se observar da Tabela 4.14. Na Tabela 4.15, encontra-se os valores da resistência à compressão simples de solo **Areia** submetido ao processo de cura em câmara climatizada à uma temperatura de 60°C e, à uma umidade 95%, onde observa-se que com 4 horas de cura, o solo no estado natural, apresentou valores da resistência à compressão simples que variaram de 258 kPa à 304 kPa, com uma média de 280 kPa. Para 8 horas de permanência na câmara climatizada, os valores da RCS variaram de 559 kPa à 597 kPa, com uma média de 578 kPa. O solo **Areia**, quando estabilizado e, submetido as mesmas condições de temperatura e umidade (60°C e 95%), após 4 horas de cura, apresentou valores de RCS de 493 kPa, 518 kPa e 562 kPa, com um valor médio de 524 kPa. Com 8 horas de permanência em câmara climatizada, a resistência à compressão simples variou de 776 kPa à 823 kPa, com uma média de 800 kPa e, quando a RCS foi determinada após 24 horas de cura, os valores variaram de 1.577 kPa à 1.846 kPa, com uma média de 1.706 kPa. O solo **Areia** submetido ao processo normal de cura, ou seja, cura em câmara úmida à uma temperatura de 22°C ± 2°C, tem seus valores da resistência à compressão simples apresentados na Tabela 4.16, onde com 3 dias de cura, o solo no estado natural teve como valores da RCS, 415 kPa, 417 kPa e 418 kPa, com uma média de 417 kPa. Após 7 dias de cura em câmara úmida, o valor da resistência à compressão simples foi 414 kPa e, aos 28 dias de cura, os valores da RCS, apresentados foram 696 kPa, 700 kPa e 720 kPa, com um valor médio de 705 kPa. Ainda na Tabela 4.16, observa-se os valores da RCS para o solo **Areia** estabilizado e curado em câmara úmida, onde com 3 dias, os valores da resistência à compressão simples adotado foi de 460 kPa. Para 7 dias de cura o valor médio da RCS foi 777 kPa e, aos 28 dias de cura a resistência à compressão simples determinada foi de 1.958 kPa. Este valor foi tomado como valor padrão ou de referência e, comparado com outros valores da resistência à compressão simples obtidos. Com o solo **Areia** submetido ao processo de cura acelerado, observa-se que com

24 horas de cura à 40°C de temperatura e 80% de umidade (o valor da resistência à compressão simples foi de 2.075 kPa) e, com 24 horas de cura à 60°C de temperatura e 95% de umidade tem-se valores compatíveis com este valor padrão, o que não ocorre com outras condições combinadas de temperatura, umidade e tempo.

#### 4.3.7 - Representação da Evolução da Resistência à Compressão Simples

A Figura 4.2, apresenta uma evolução gráfica dos valores da resistência à compressão simples (RCS), para os solos no estado natural e após estabilizados com cal e submetidos ao processo de cura normal. Como se observa, os solos tiveram um comportamento bem visível no que se refere ao grau com que foram estabilizados, ou mesmo interagiram com a cal. Se forem colocados os valores da RCS obtidos com o processo de cura acelerada, obtém-se o mesmo/idêntico comportamento.

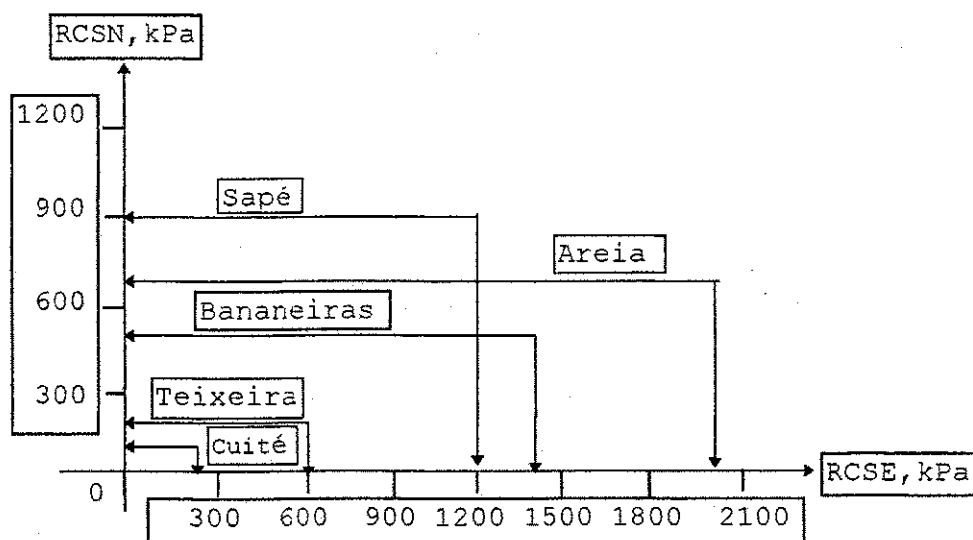


Figura 4.2 - Relação Entre a Resistência à Compressão Simples Para os Solos no Estado Natural (RCSN) e Após Estabilizados Com Cal Pelo Processo Normal de Cura (RCSE).



#### 4.4 - Resultados Obtidos no Estudo do Controle das Umidades dos Corpos de Prova

As Tabelas 4.17 à 4.31, apresentam os resultados obtidos no estudo desenvolvido visando controlar as umidades dos corpos de prova utilizados para a determinação da resistência à compressão simples. As umidades, foram determinadas em todas as fases dos ensaios i.e., na fase de moldagem dos corpos de prova e, após a ruptura, tanto no estado natural quanto após o tipo de cura aplicado. A fim de melhor representar a umidade, foram retiradas três amostras para a determinação desta umidade, em posições distintas no corpo de prova, a saber: topo, meio e base. A posição meio do corpo de prova, refere-se ao "longo do plano onde ocorreu a ruptura". Como se observa dos resultados obtidos, para todos os solos, houve uma excelente condição de umidade, ou seja, o valor da umidade se manteve dentro da estreita faixa aceitável, o que mostra que praticamente não houve perda de umidade durante o processo de cura acelerado. Isto indica que a umidade foi tão somente utilizada no processo de interação solo-cal, e não perdida no ambiente de cura, por exemplo, na evaporação. Esta comprovação assegura que os resultados obtidos, representam as condições de cura imposta, pois como se sabe, a redução no valor da umidade poderia muito bem sugerir que a mesma foi utilizada no processo de estabilização quando na realidade, a mesma foi perdida sem participar da interação solo-cal. Como exemplo, considere o solo Bananeira, conforme mostram as Tabelas 4.17, 4.18 e, 4.19. Na Tabela 4.17, observa-se que a umidade de moldagem do solo no estado natural foi de 18,30% e após a permanência em câmara climatizada durante 4 e 8 horas, a uma temperatura de 40°C e umidade de saturação em 85%, os valores da umidade foram respectivamente 18,42% e 18,24. Mesmo para um período de cura climatizada de 24 horas, a umidade final foi de 17,72%. Isto indica, portanto, que para as condições de cura, a umidade de saturação de 85% utilizada na câmara, foi suficiente para manter a umidade no corpo de prova adequada para o processo

de estabilização. Quando se aumentou a temperatura da câmara para 60°C e a umidade de saturação para 95%, houve uma perda de umidade maior do que na condição antes analisada, mesmo assim sem comprometer de forma alguma os resultados obtidos. No estabilização pelo processo de cura normal, Tabela 4.19, a umidade de moldagem foi de 20,15% e após a cura e ruptura, a umidade foi de 19,35%. A análise destes resultados é baseada em amostras retiradas ao longo do plano onde ocorreu a ruptura. Para as outras posições, praticamente não ocorreu modificação nos resultados, ou seja, as umidades medidas nos corpos de prova nas condições estudadas nesta pesquisa, são representativas ao longo do mesmo e, não depende se são retiradas no topo, meio ou mesmo base do corpo de prova. Como um exemplo desta conclusão, considere o solo Teixeira. No caso do solo estabilizado, a umidade de moldagem, foi de 20,92% com o corpo de prova considerado logo após a moldagem (Tabela 4.23). Para esta mesma condição e, com o corpo de prova após a ruptura, as umidades no topo, meio e base do mesmo, foram respectivamente iguais à 20,90%, 20,88% e 20,86%. Se for considerada a umidade de moldagem para o solo no estado natural, Tabela 4.25, o valor foi de 18,88% e, após 28 dias de cura, a umidade no topo, meio e base do corpo de prova após a ruptura, foi de 18,95%, 18,98% e 19,00% respectivamente. Se forem comparado os valores da Tabela 4.24, obtidos na condição de estabilização em câmara climatizada e os valores da Tabela 4.25, obtidos pelo processo normal de cura, se conclui que os valores das umidades são mais coerentes, quando obtidos pelo processo de câmara climatizada. Considerando ainda o solo Teixeira, a umidade de moldagem para o processo de cura acelerado foi de 20,92% mas, os valores das umidades com temperatura de 60°C, umidade de 95% para 24 horas, foram de 20,40%, 20,67% e 19,50% respectivamente no topo, meio e base do corpo de prova. Considerando o processo de cura normal, Tabela 4.25, a umidade de moldagem é de 20,79%, enquanto que para o topo, meio e base do corpo de prova após a ruptura, os valores das umidades foram de 19,10%, 19,23% e 19,15%. Conclui-se, que há uma perda maior de umidade pelo processo de cura normal.

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
0 Hora	18,30	18,51	18,42	18,34	20,02	19,89	19,0	19,87
4 Horas	18,32	18,71	18,24	18,24	20,10	18,86	18,5	18,88
8 Horas	18,29	18,59	18,28	18,34	20,06	18,49	18,3	---
24Horas	18,27	17,91	17,72	17,54	20,00	18,50	18,3	18,82

TABELA 4.17

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e Umidade Igual à 80%. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem)

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
4 Horas	18,30	17,01	17,10	16,2	20,02	19,51	19,40	19,26
8 Horas	18,28	17,72	17,35	17,4	20,00	19,07	19,01	19,10
24Horas	18,25	17,75	17,10	17,7	19,84	18,52	18,27	18,17

TABELA 4.18

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e Umidade Igual à 95%. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
3 dias	18,35	17,54	17,52	17,48	20,11	19,88	19,90	19,82
7 dias	18,28	17,48	17,30	17,25	20,15	19,42	19,88	19,35
28 dias	18,20	17,21	17,01	16,89	20,08	19,30	19,10	19,27

TABELA 4.19

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Bananeiras: Cura no Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
0 Hora	17,30	17,22	17,25	17,28	18,82	18,75	18,80	18,78
4 Horas	17,20	17,10	17,16	17,25	18,84	18,55	18,72	18,22
8 Horas	17,26	17,53	17,49	17,58	18,80	18,02	18,08	17,97
24Horas	17,21	17,04	16,86	16,32	17,77	16,90	17,02	17,30

TABELA 4.20

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Sapé: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e Umidade Igual à 80%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem)

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
4 Horas	17,30	17,02	16,98	17,04	18,4	18,19	17,84	17,93
8 Horas	17,22	16,25	16,61	16,43	18,2	18,60	18,75	18,25
24Horas	17,20	17,42	17,56	17,23	18,0	19,07	18,94	19,07

TABELA 4.21

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Sapé: Cura Câmara Climatizada (CC) à 60°C e Umidade Igual à 95%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
3 dias	17,30	16,43	16,65	16,37	18,82	17,83	17,85	17,75
7 dias	17,28	16,06	16,07	16,35	18,80	17,86	17,58	17,56
28 dias	17,28	16,52	16,68	16,57	18,83	18,36	18,40	18,40

TABELA 4.22

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do solo Sapé: Cura no Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
0 Hora	19,32	18,88	18,66	18,64	20,92	20,90	20,88	20,86
4 Horas	19,40	19,00	18,96	18,81	20,91	20,81	20,81	20,65
8 Horas	19,43	18,71	18,76	18,64	20,89	20,36	20,54	20,49
24Horas	19,30	17,80	17,85	17,69	20,90	20,12	19,79	19,89

TABELA 4.23

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e, Base, dos Corpos de Prova do solo Teixeira: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 40°C e Umidade Igual à 80%. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem)

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
4 Horas	19,28	19,08	19,00	19,0	21,00	20,16	19,85	20,04
8 Horas	19,27	18,74	18,80	18,0	20,94	20,45	20,50	20,42
24Horas	19,30	18,54	18,50	18,0	20,92	20,40	20,67	19,50

TABELA 4.24

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Teixeira: Cura em Câmara Climatizada (CC) à 60°C e Umidade Igual à 95%. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura			Umid. Mold.	Umid. Após Cura		
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
3 dias	19,02	18,95	18,98	19,00	20,80	19,62	20,53	19,80
7 dias	19,00	18,46	18,50	18,60	20,82	19,55	20,45	19,30
28 dias	18,88	18,20	18,23	18,15	20,79	19,10	19,23	19,15

TABELA 4.25

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e, Base dos Corpos de Prova do Solo Teixeira: Cura no Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado. (Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO					
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base	Umid. mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base
0 Hora	16,70	16,68	16,62	16,57	18,70	18,70	18,72	18,74		
4 Horas	16,72	16,48	16,50	16,56	18,68	18,95	18,86	19,24		
8 Horas	16,73	16,19	16,23	16,17	18,68	18,93	18,90	18,89		
24Horas	16,65	16,09	16,18	15,97	18,65	18,73	18,75	18,76		

TABELA 4.26

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Cuité: Cura Câmara Climatizada (CC) à 40°C e Umidade Igual à 80%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem)

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO					
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base	Umid. Mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base
4 Horas	16,70	16,68	16,65	16,6	18,68	18,51	18,33	18,60		
8 Horas	16,68	15,85	15,86	15,3	18,65	18,52	18,10	18,62		
24Horas	16,65	16,52	16,12	16,8	18,66	17,83	17,62	17,66		

TABELA 4.27

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Cuité: Cura Câmara Climatizada (CC) à 60°C e Umidade Igual à 95%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO					
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base	Umid. Mold.	Umid. Após Cura	Topo	Meio	Base
3 dias	16,65	15,83	15,88	15,75	18,74	17,63	17,65	17,44		
7 dias	16,62	15,62	15,60	16,65	18,72	17,38	17,40	17,43		
28 dias	16,64	15,31	15,30	15,28	18,70	17,98	17,00	17,10		

TABELA 4.28

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Cuité: Cura Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura		Umid. mold.	Umid. Após Cura			
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
0 Hora	19,00	19,03	18,88	18,93	21,00	20,97	20,99	20,95
4 Horas	18,87	18,80	18,54	18,45	21,00	19,39	19,60	19,58
8 Horas	18,87	18,31	18,50	18,23	20,95	20,50	20,05	20,22
24Horas	18,85	17,55	17,67	17,62	20,95	18,17	18,12	18,10

TABELA 4.29

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Areia: Cura Câmara Climatizada (CC) à 40°C e Umidade Igual à 80%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem)

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura		Umid. Mold.	Umid. Após Cura			
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
4 Horas	19,00	17,80	17,43	17,8	21,00	19,34	19,35	19,70
8 Horas	18,87	18,30	18,22	18,0	20,88	20,31	20,29	20,11
24Horas	18,87	18,20	18,25	18,5	20,88	19,98	20,00	19,95

TABELA 4.30

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Areia: Cura Câmara Climatizada (CC) à 60°C e Umidade Igual à 95%.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

Tempo Cura	SOLO NATURAL				SOLO ESTABILIZADO			
	Umid. Mold.	Umid. Após Cura		Umid. Mold.	Umid. Após Cura			
		Topo	Meio	Base		Topo	Meio	Base
3 dias	18,95	17,95	18,60	18,04	20,85	20,50	20,40	20,13
7 dias	18,90	18,17	17,97	18,08	20,52	20,15	20,10	20,03
28 dias	18,87	17,95	17,92	18,00	20,71	20,35	20,49	20,48

TABELA 4.31

Resultado do Estudo das Umidades (%) no Topo, Meio e Base dos Corpos de Prova do Solo Areia: Cura Processo Normal (CN) à 22°C ± 2°C e Ambiente Saturado.  
(Umid.Mold.=Umidade de Moldagem).

#### 4.5 - Análise do Comportamento Tensão-Deformação

As Figuras 4.3 à 4.6, mostram curvas tensão-deformação representativas de todas as obtidas para os solos estudados, no estado natural e após estabilizados com cal, tanto pelo processo normal quanto pelo processo de cura acelerado. Se observa destas Figuras que os solos tiveram um comportamento semelhante, ou seja: quando no estado estabilizado, os solos aumentaram o valor da tensão para uma deformação igual à aquela no estado natural. Por exemplo, o solo Bananeiras no estado natural, mostrado na Figura 4.3, tem uma deformação de 1% correspondendo à uma tensão de 280 kPa, todavia quando estabilizado pelo processo normal de cura, para 1% de deformação correspondeu uma tensão de 485 kPa. Quando estabilizado pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada e, considerando as condições "ótimas" de estabilização ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 80\%$  e para 24 horas), o valor da tensão é de 590 kPa, portanto ainda maior do que o valor da tensão para o estado natural. Se for considerado o solo Teixeira, Figura 4.6, no estado natural para uma deformação de 1%, corresponde uma tensão de 270 kPa, no entanto, quando estabilizado pelo processo normal de cura, para 1% de deformação a tensão obtida foi 660 kPa. Quando estabilizado pelo processo de cura acelerado em câmara climatizada e, considerando as condições "ótima" de estabilização, que para o solo Teixeira também foi, ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $U = 80\%$  e para 24 horas), o valor da tensão é de 650 kPa, que é um valor maior do que o valor da tensão para o estado natural. Outra conclusão obtida das Figuras 4.3 à 4.6, é que, quando o tempo de cura em câmara climatizada foi aumentado, também aumentou o valor da tensão para a mesma deformação no estado natural. Se observa ainda das Figuras 4.3 à 4.6, que o processo de estabilização contribuiu para a modificação, embora de maneira discreta, da forma da curva tensão-deformação, ou seja, no estado natural, as curvas representaram um comportamento de solos menos granulares, enquanto que as curvas tensão-deformação para os solos estabilizados já indicaram comportamento de solos mais granulares. Além deste comportamento era de se esperar pois



quando ocorre a interação solo-cal (processo de estabilização), o solo torna-se mais granular, aumentando assim a sua resistência. O comportamento obtido para os solos estudados, contribuiu para definir a resistência mais precisamente, quando for preciso se relacionar a resistência à compressão simples com a deformação axial.

#### 4.6 - Resumo da Análise dos Resultados Obtidos

A Tabela 4.32, apresenta um resumo dos resultados obtidos em termos de resistência à compressão simples (RCS) para os solos estudados, no estado natural e após estabilizados com cal e com cura pelo processo normal e em câmara climatizada. A Tabela 4.32, apresenta também os valores do índice de reatividade à cal (IR). Baseado nos resultados da resistência à compressão simples, pode-se concluir que, existe uma condição de temperatura-umidade-tempo, baseada na qual os solos estudados nesta pesquisa, alcançaram a estabilização pelo processo de cura acelerado, compatível com o processo de cura normalmente utilizado, com exceção do solo Cuité. Todavia este solo, não pode ser considerado como representativo uma vez que o mesmo não foi plenamente estabilizado ou mesmo não apresentou um potencial de estabilização que permitisse uma conclusão definitiva. A condição de cura para a grande maioria dos solos, pode ser definida como condição ótima de cura acelerada em câmara climatizada. Com isto, pode-se afirmar que o processo de cura acelerado utilizado nesta pesquisa, parece ser bastante promissor, embora ainda limitado aos tipos de solos estudados. Com relação ao controle das umidades dos corpos de prova, os resultados obtidos, indicaram que houve uma excelente preparação dos corpos de prova e que, tanto no estado natural quanto no estado estabilizado, não houve perda de umidade que comprometesse os resultados. Com relação as curvas tensão-deformação, as mesmas mostraram que após a estabilização, para todos os solos, houve um aumento do valor da tensão quando comparado com o solo natural, isto, considerando a mesma

a tendência de definição de um pico na curva tensão-deformação, o que não aconteceu com os solos no estado natural. Finalmente, pode-se concluir que os solos apresentaram um índice de reatividade à cal (IR), de forma que se pode afirmar que os mesmos reagiram muito bem com a cal, exceto, de certa forma, o solo Cuité. Para este solo, IR = 153kPa, quando para os demais solos, IR variou de 306kPa à 1.253kPa, correspondendo aos solos Sapé e Areia. Ou seja: o solo Cuité de menor IR (IR = 153kPa), é também o de menor IP (IP = 5,7%) e, o solo Areia de maior IR (IR = 1.253kPa) é o de maior IP (IP = 15,2%). Isto indica que o processo solo-cal, está associado a uma condição mínima de granulometria fina, refletida aqui pelo índice de plasticidade (IP).

SOLO	CURA NORMAL			CURA CÂMARA CLIMATIZADA				
	RCSE	RCSN	Tempo	RCSE	Temp.	Tempo	U	I R
Bananeiras	1.412	511	28dias	1.586	40°C	24horas	80%	901
Sapé	1.206	900	28dias	1.166	40°C	24horas	80%	306
Teixeira	611	206	28dias	576	40°C	24horas	80%	415
Cuité	257	109	28dias	203	40°C	8horas	80%	152
Areia	1.958	705	28dias	2.075	40°C	24horas	80%	1.253

Tabela 4.32 - Resistência à Compressão Simples (kPa) Para os Solos no Estado Natural (RCSN) e Estabilizado com Cal, (RCSE). IR = índice de Reatividade à Cal (kPa).

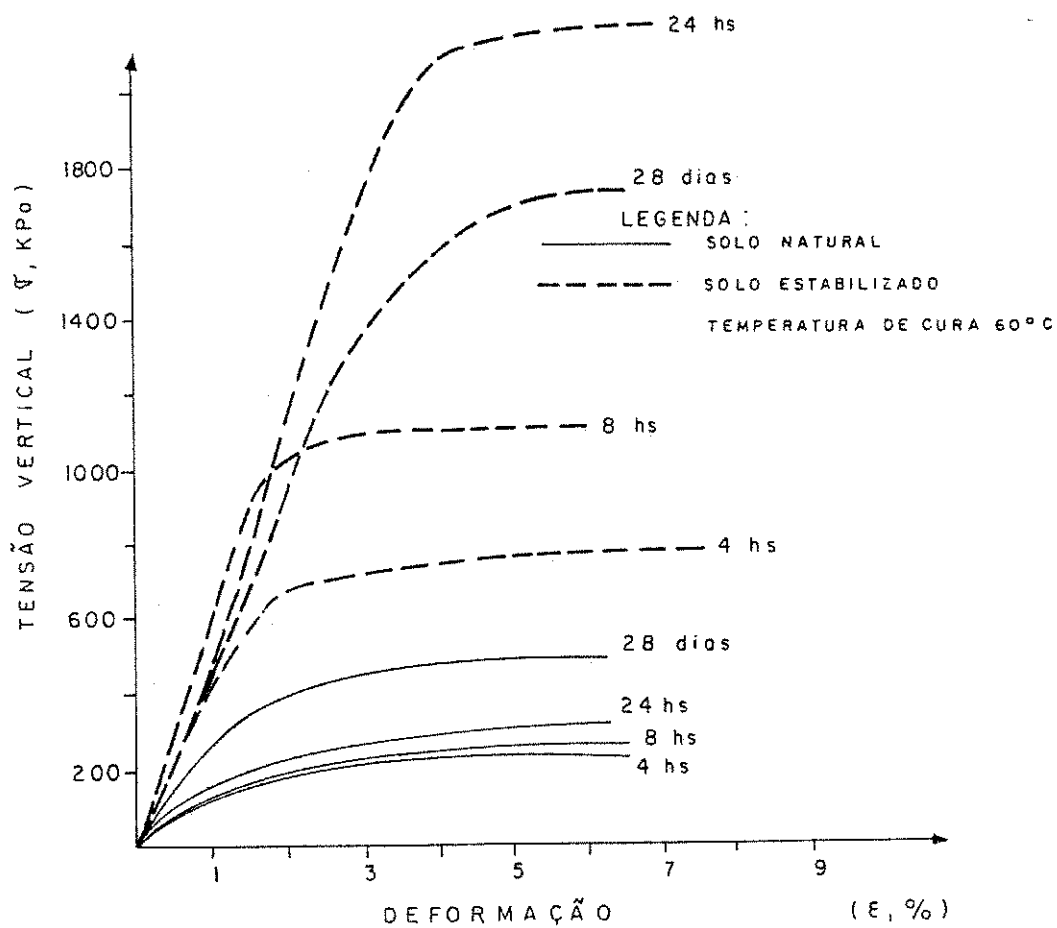
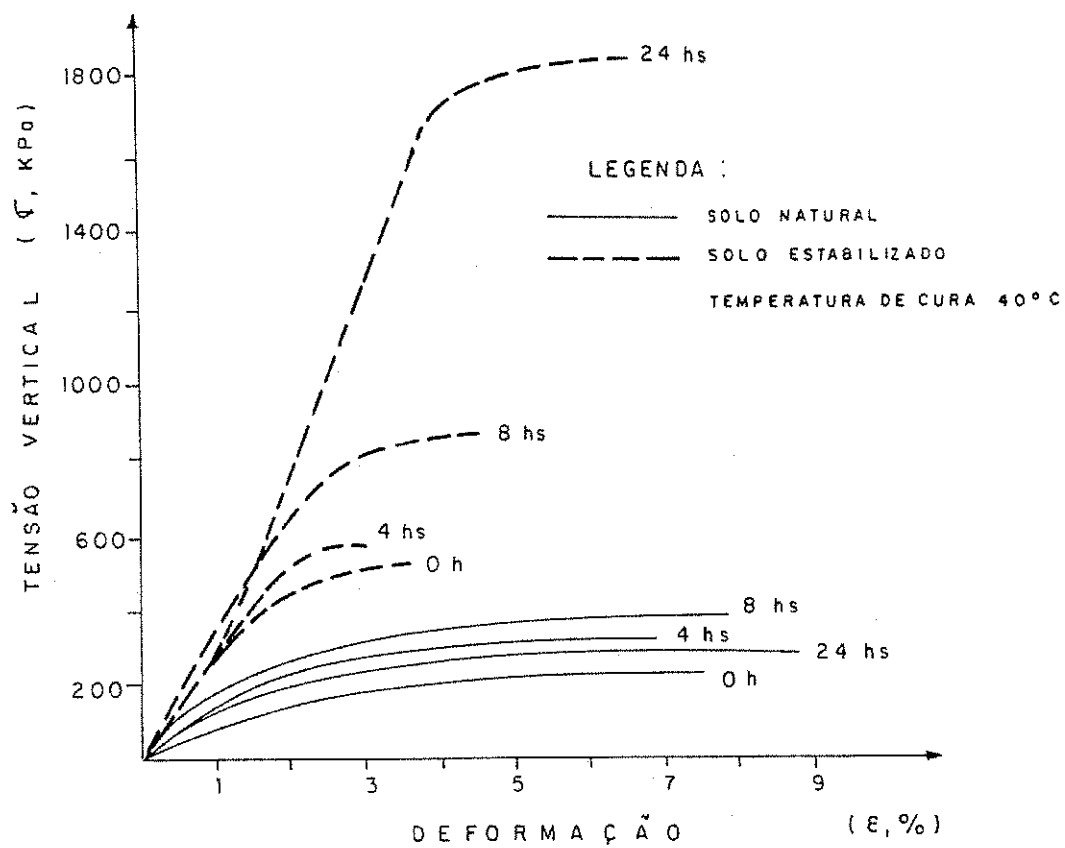


FIGURA 4.3 — CURVAS REPRESENTATIVAS TENSÃO x DEFORMAÇÃO PARA O SOLO BANANEIRAS

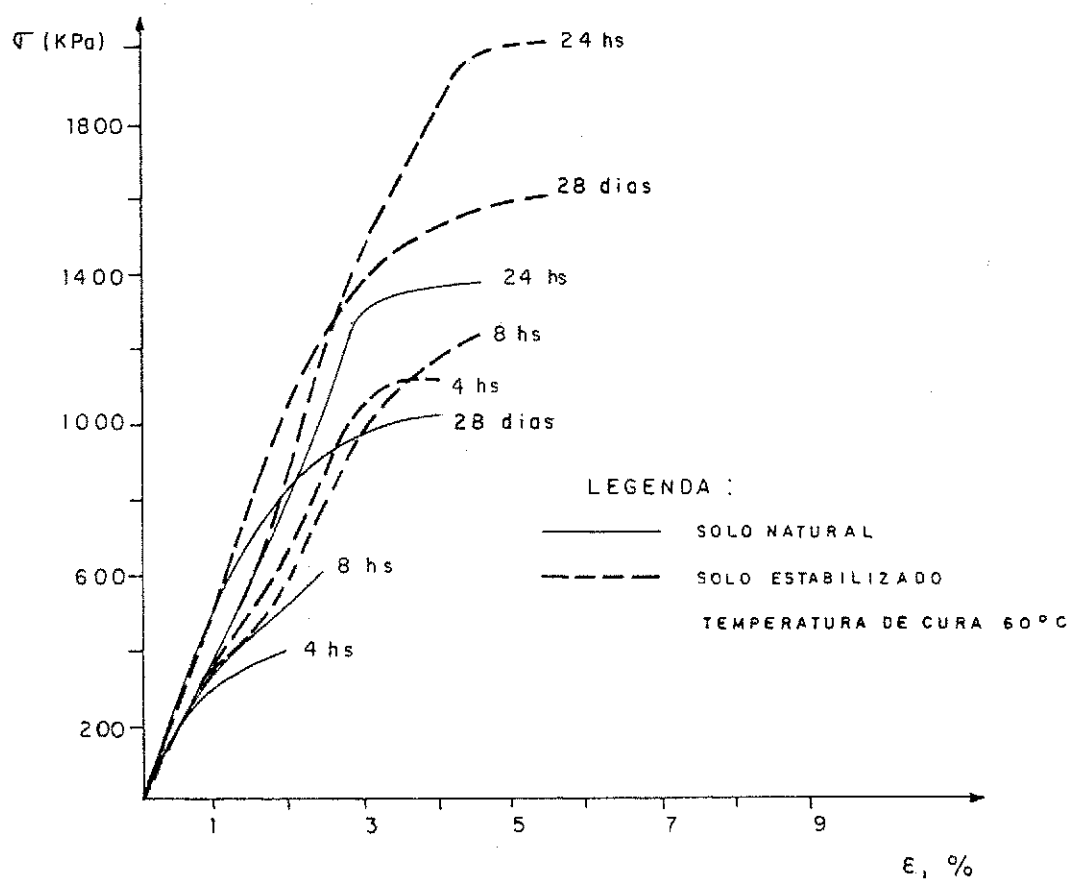
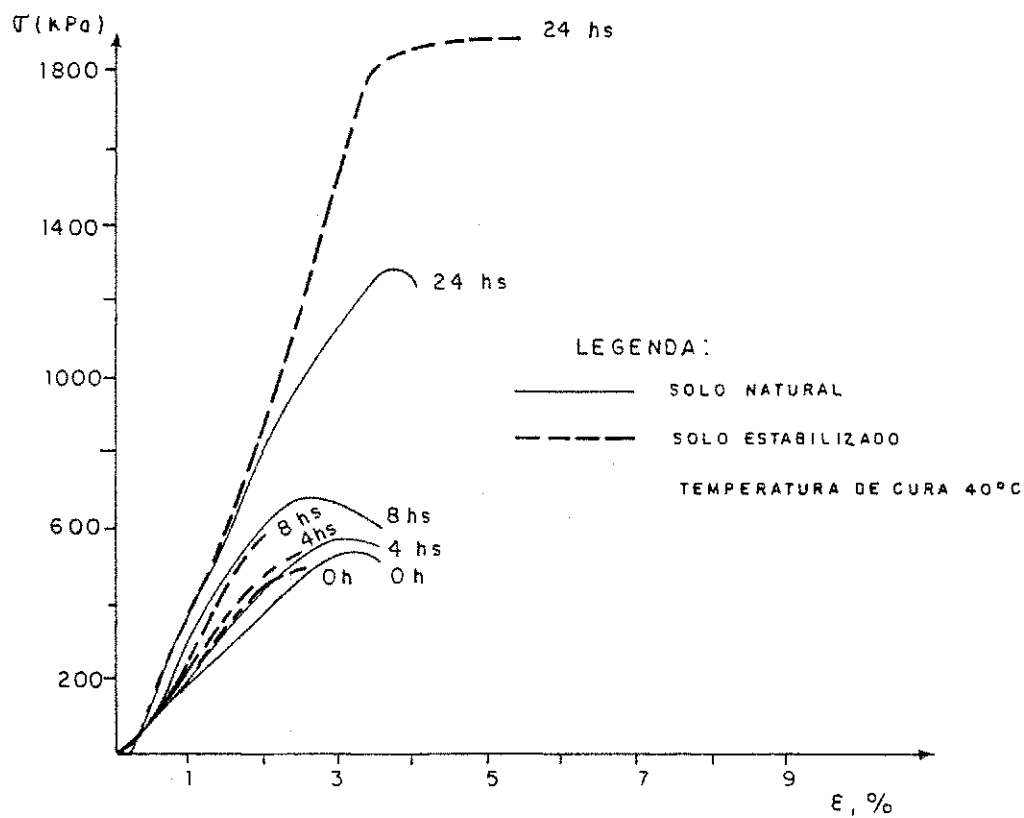


FIGURA 4.4 - RELAÇÃO TENSÃO - DEFORMAÇÃO PARA O SOLO SAPÉ

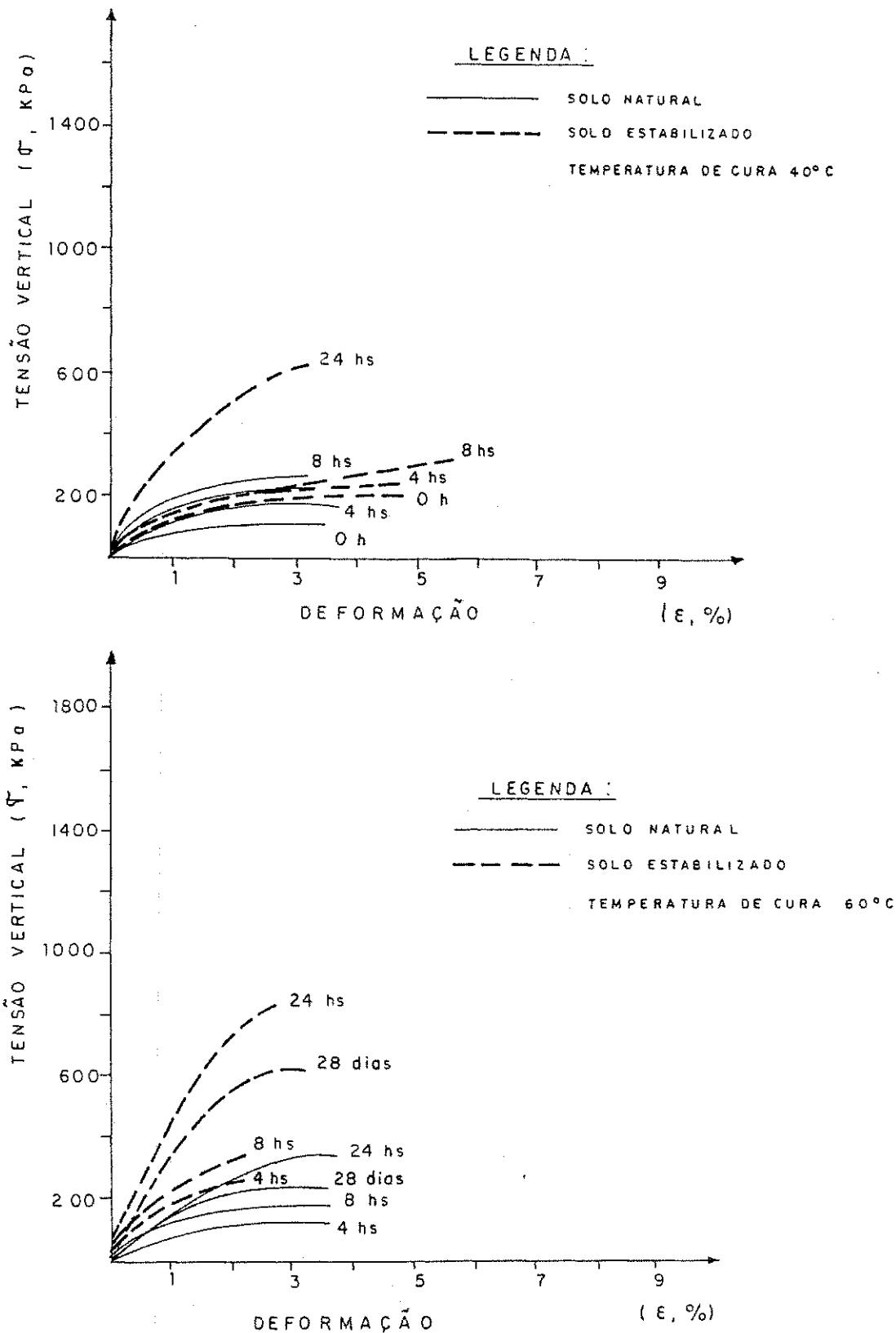


FIGURA 4.5 — CURVAS REPRESENTATIVAS TENSÃO x DEFORMAÇÃO PARA O SOLO TEIXEIRA.

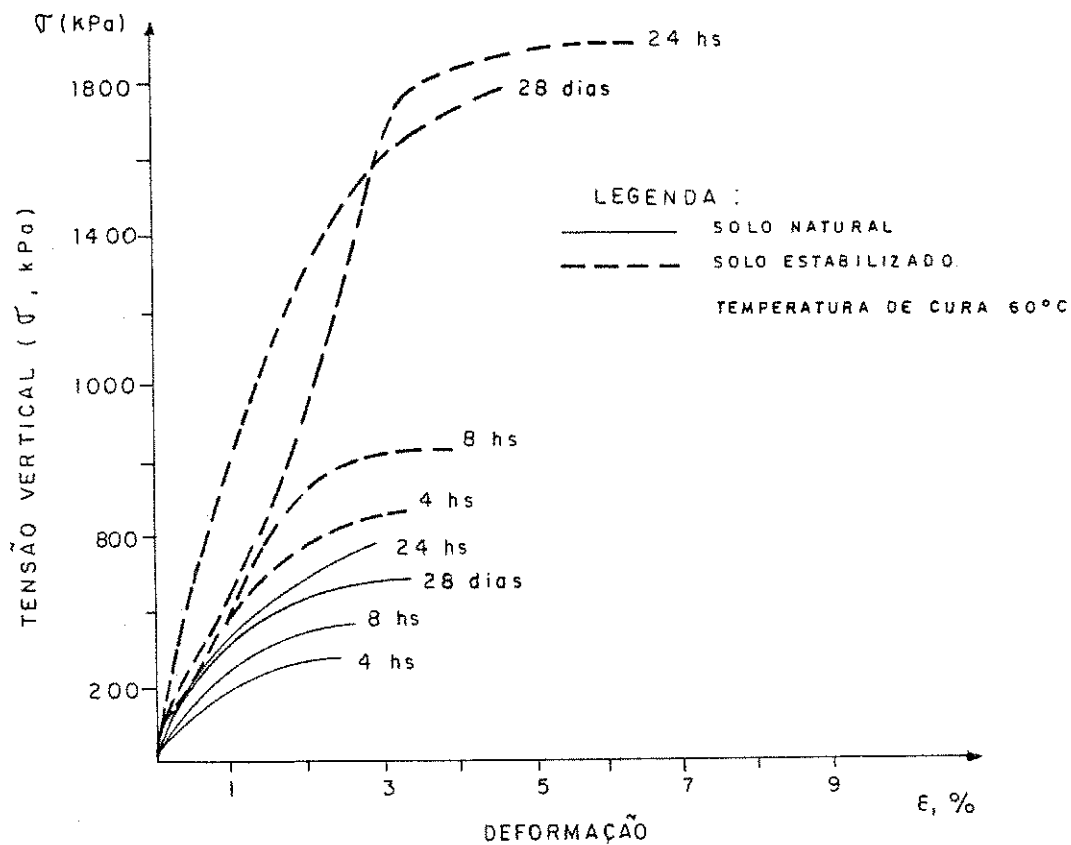
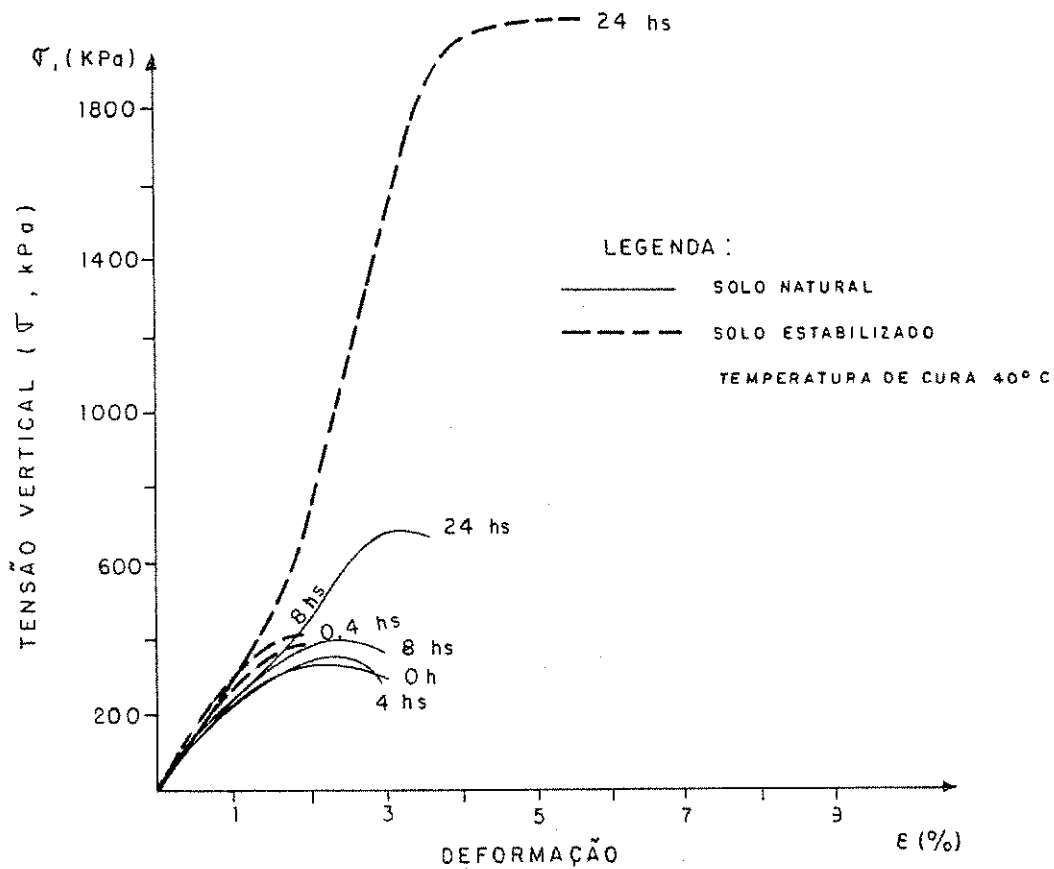


FIGURA 4.6 - RELAÇÃO TENSÃO - DEFORMAÇÃO PARA O SOLO AREIA

## C A P Í T U L O 5

### Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa, permitiram concluir que:

1. Com relação a metodologia para preparação dos corpos de prova:

- as equações utilizadas para a definição da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima de compactação dos solos estabilizados com cal, resultaram em corpos de prova que reproduziram resultados dentro da faixa de repetibilidade prática normalmente utilizada;

2. Com relação ao processo de interação solo-cal:

- os solos responderam favoravelmente ao tratamento de estabilização com cal, apresentando resultados que fortaleceram a análise do processo de cura acelerado;

- a estabilização dos solos promoveu nas curvas tensão-deformação a definição do pico de resistência;

3. Com relação ao processo de cura acelerado utilizado:

- os resultados obtidos em termos de resistência à compressão simples com os solos estabilizados pelo processo de cura acelerado, foram semelhantes à aqueles obtidos pelo processo de cura tradicionalmente utilizado na prática;

- existe um forte indicativo da existência de um tempo ótimo de cura acelerada, uma vez que, os resultados semelhantes obtidos para a resistência à compressão simples pelo processo de cura acelerada, foram concentrados na condição de 24 horas em câmara climatizada à 40°C e com uma umidade de 80%.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, são limitados aos tipos de solos estudados e, não devem ser utilizados indiscriminadamente.



## C A P Í T U L O 6

### Sugestões Para Pesquisas Futuras

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, verificou-se que vários pontos relacionados ao assunto, merecem atenção adicional e em maior profundidade. Sendo assim, sugere-se:

1 - aprofundar o estudo da estabilização de solos lateríticos com cal, avaliando-se a interação solo-cal, através do processo de cura acelerado proposto nesta pesquisa. Para isto, deve-se aumentar a quantidade de solos a serem estabilizados;

2 - avaliar o processo de cura acelerado, com outras combinações de duração de cura em câmara climatizada, temperatura e, principalmente, umidade;

3 - utilizar o processo de cura acelerado, para avaliar a estabilização dos solos com outros aditivos;

4 - produzir uma quantidade de dados, que possam ser analisados estatisticamente com segurança;

5 - aplicar o processo de cura acelerado, a solos classificados como solos não-lateríticos;

## C A P Í T U L O 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, M. L., SMITH, R. E. and SHERMAN, G. B., 1972, Relative Stabilizing Effect of Various Limes on Clayey Soils, Highway Research Board (HRB), Bulletin 381, pág. 27-33.

ANDAY, M. C., 1961, Accelerated Curing for Lime-Stabilized Soils, H R B, Bulletin No. 304, pág. 13.

ANDAY, M. C., 1963, Curing Lime - Stabilized Soils, Highway Research Engineer, Virginia Council of Highway Investigation and Research, Charlottesville, Highway Research Record, No. 29, pág. 13-26.

BORBA, S. M. C., 1981, Estudos das Propriedades Químicas e Mineralógicas de Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil, Dissertação de Mestrado, UFRS, pág. 137.

BRAGA, C. C. A., 1979, Contribuição ao Estudo da Permeabilidade e das Características Macânicas de um Solo Laterítico Estabilizado com Cimento, Dissertação de Mestrado, UFPb.

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

CASTRO, N. L. e VAINE, R. E., 1978, Estabilização de Solos com Cal e Cimento, XIV Reunião Anual de Pavimentação, João Pessoa, pág. 68.

COSTA, M. A., 1977, Resistência ao Cisalhamento de uma Argila Mole Estabilizada com Cal, Dissertação de Mestrado, UFPb.

COSTA C. R., LUCENA, F. B., QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., LIMA, R. C. e DINIZ, A. A., 1986, Estudo de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal, 21<sup>a</sup>. Reunião Anual de Pavimentação, pág. 158.

DE GRAFT-JOHSON, J. W. S., BHATIA, M. S. e GIDIGASU, M. D., 1970, Engineering Proprieties of Lateritic Soils, General Report, Proc. Special Session Engineering Prop. Lateritic Soils, 7th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pág. 13-43.

D'HOORE, J. L., 1964, Soil Map of Africa, Explanation Monograph, Comm. for Tech. Coop. in Africa, Publication No. 14, pág. 205.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 1974, Levantamento de Recursos Naturais, Projeto RADAM, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS (DNER), 1971, Especificações Gerais Para Obras Rodoviárias.

DIAMOND, S. and KINTER, E. R., 1965, Mechanics of Soil, Lime Stabilization, An Interpretive Review, HBR, No. 92, pág. 83-102.

DINIZ, A. A., 1984, Resistência à Compressão Simples para Solos Lateríticos, Avaliação da Metodologia e Influência dos Efeitos da Temperatura de Secagem e Energia Mecânica, Dissertação de Mestrado, UFPB, pág. 148.

DUNBLETON, M. J., 1963, The Clay Mineralogy of Some Soils from Northern Borneo Considered in Relation to Their Origin and Their Properties as Road Making Materials, British Road Research Laboratory, Laboratory Note LN/282/NJD.

EADS, J. L., NICHOLS, F. P. e GRIM, R. E., 1962, Formation of New Minerals With Lime Stabilization as Proven by Field Experiment in Virginia, HBR, Bul. 335, pág. 31-39.

EKLU-NATEI, D. E. and MULLER, B., 1981, Contribution to the Geotechnical Classification of Tropical Soils, Proceedings of the Simpósio Brasileiro de solos Tropicais em Engenharia COPPE - UFRJ - CNPq - ABMS, pág. 139-146.

FEMOR, L. L., 1911, What is Laterite, The Geological Magazine, New Series Decade, Vol III.

FOSSEBERG, D.E., 1965, Some Fundamental Engineering Properties of a Lime-Stabilized Clay, Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. I.

GARCIA, J. J. J. M., 1973, Suelos Expansivos Su Estabilizacion con Cal, Dissertação de Mestrado, UFRJ.

GIDIGASU, M. D., 1970, The Engineering of Laterite Soils (Literature Review), Project Report, No 7, Building and Research Institute, Kumasi-Ghana, pág 92.

GIDIGASU, M. D., 1971, A Contribution to the Study of the Physico-Chemical Implication of Weathering and Laterisation, Geotechnical Engineering, Bangkok, No. 2, Vol.2, pág. 131-149.

GIDIGASU, M. D. and YEBOA, S. L., 1972, Significance of Pretesting Preparations in Evaluating Index Properties of Laterite Materials, Highway Research Record, No. 405, pág. 105-116.

GIDIGASU, M. D., 1974, Identification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering: A Review, Transportation Research Record, Washington, pág. 96-111.

GIDIGASU, M. D., 1976, Laterite and Soil Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Scientific, Amsterdam Pub. Co., No 9, pág. 554.

GIDIGASU, M. D., 1980, Some Contributions to Tropical Soils Engineering in Ghana, Proceedings of the 7th. Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pág. 509-626.

GLINKA, K. D., 1899, Studies on the Mineralogical Composition of the Glacial Clays of the Paskov and on Their Types of Weathering, Trans. Russ, Imp. Mis. Soc. Ser., Vol. 2, No 37, pág. 334-341.

GRANT, K., 1974, Laterites, Bauxites and Silcrets, 2nd. International Congress of the International Association of Engineering Geology.

HARTY, J. R. e THOMPSON, M. R., 1971, Lime Reactivity of Tropicallly and Subtropically Weathered Soils, Tese de Doutorado, Department of Civil Engineering, University of Illonois at Urbana, Champaign, USA, pág. 139.

HARRASSOWITZ, H., 1926, Laterite, Foetschire der Geologie and Palaentologie, Vol. 4, pág. 253-566.

HIRASHIMA, K. B., 1948, Highway Experience With Thixotrope Volcanic Clay, H. R. B. Proc. Vol. 28, pág. 481-494.

HOLLAND, T. H., 1903, On the Constrution, Origen and Dehydration of Laterite, *Geology Magazine*, Vol. 4, No 10, pág. 59-69.

JALALI, S. and ABYANCH, M. Y., 1993, Prediction of Delayed Time in Strength Gain of Lime-Fly Ash Mixtures, 10th International Coal Ash Symposium, Orlando, Flórida, January 17-23, American Coal Ash Association.

JALALI, S., 1994, The Strength Gain of Stabilised Soils - A Unifying Concept. L'augmentation de Resistance des Sols Stabilises - Un Concept Unificateur, XIII ICSMFE, New Delhi, Índia, pág. 1195-1197.

LAL, N. B. and BINDRA, S. R., 1981, A Simple Mechanical Test for Classification and Determination of Compaction Characteristics for the Tropical Soil of India, Proceedings of Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia COPPE, UFRJ, CNPq, ABMS, pág. 45-52.

LIMA, C. G., 1983, Estudos Sobre a Reatividade à Cal de Solos Lateríticos Visando sua Estabilização: Aplicação a um Solo Laterítico de Nova Floresta, Dissertação de Mestrado, UFPb.

LITTLE, A. L., 1969, Definition, Formation and Classification, General Report, Proceedings of Specialty Session on Engineering Propertins of Lateritic Soils, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México City, México.

LOUGHNAN, F. E., 1969, Chemical Weathering of Silicate Minerals, American Elsevier, New York, pág. 154.

LUMB, P., 1962, The Properties of Decomposed Granite, *Geotechnique*, Vol. 12, pág. 226-243.

LUCENA, F. B., 1976, A Natureza e Propriedades dos Solos Vermelhos do Estado da Paraíba, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, pág. 194.

LYON ASSOCIATES INC., 1971, Laterite and Lateritic Soils and Other Problem Soils of Africa, Baltimore, Maryland, USA, and Building and Road Research Institute, Kumasi, Ghana, pág. 289.

MALLET, F. R., 1833, On Lateritic and Other Maganese Ore Occuring at Gosolpur Jabalpur District, Geol. Suru. Índia, Vol. 16, pág. 103-118.

MARTIN, F. J. and DOYNE, H. C., 1927, Laterite and Laterite Soils in Sierra Leone, Journal of Agricultural Science, August Vol. 17, pág. 530-547.

MARTIN, F. J. and DOYNE, H. C., 1930, Lateritic and Lateritic Soil in Sierra Leone, Journal of Agriculture Science, Vol. 20, pág. 135-143.

MARTINS, L. B., 1983, Localização e Descrição de Várias Jazidas de Solos Lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil, Dissertação de Mestrado, UFPb.

MEDINA, J. and PREUSSLER, E. S., 1980, Resilient Characteristic of Soil for Pavement Purposes, Original Title: Características Resilientes de Solos em Pavimentos, Revista Solos e Rochas, Vol. 3, No 1, pág. 3-26.

MEDINA, J. e PREUSSLER, E. S., 1982, Resilient Characteristics of Brazilian Solis, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, pág. 697-712.

MEDINA, J., PREUSSLER, E. S., PREVITERA, F. J., DELLÊ VIANA, A. A. e PAIVA, E. N., 1982, Valor Estrutural de Camadas de Pré-Misturado a Frio Preparado com Emulsão Asfáltica, 6o. Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., 1980, Relações entre Parâmetros de Engenharia de Solos Vermelhos Tropicais Estabilizados com Cal, 15<sup>a</sup>. Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, DERMG, Belo Horizonte.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., 1981, Classification of Lateritic Soils Based on the Lime Stabilization Process, Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE, UFRJ, CNPq, ABMS, Rio de Janeiro, pág. 442-452.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., 1983, Presença de Componentes Amorfos nos Solos Lateríticos, Anais da 18<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Porto Alegre.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., 1985, Estudo Sobre um Processo Acelerado de Cura para Solos Lateríticos Estabilizados com Cal, Anais da 20<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Fortaleza, Vol. 1, pág. 209-222.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., 1989, Estabilização de Solos Lateríticos: Avaliação pela Plasticidade, II Colóquio de Solos Tropicais, Porto Alegre, Vol. 1, pág. 304-318.

ROAD RESEARCH LABORATORY, Dept. of Scientific and Industrial Research, United Kingdom Soil Mechanics for Road Engineers, H. M. Stationery Office, London.

SLAUBAUGH, N. H. e PARSONS, T. D., 1982, Química Geral, 2<sup>a</sup> Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A.

SUDENE, 1974a, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Capacidade de Uso das Terras, Série Edafologia, No 4, Recife, Brasil.

SUDENE, 1974b, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Mapa de Regiões Bioclimáticas e Mapa de Isoietas, Recife, Brasil.



SUDENE, 1977, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Inventário Hidrológico Básico do Nordeste, Recife, Brasil.

TERZAGHI, K., 1958, Design and Performance of Sasumua Dam., Proceedings Institution of Civil Engineers, London, Vol. 9, pág. 369-395.

TERZAGHI, H. e PECK, R. B., 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, pág 729.

THOMPSON, M. R., 1966, Lime Reactivity of Illinois Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, (ASCE), pág 67-92.

TOWNSEND, F. C., MANKE, P. G. e PARCHER, J. V., 1971, The Influence of Sesquioxides on the Lateritic Soil Properties, HRB 374, pág. 80-92.

VALLERGA, B. A., VAN TIL, C. J. and RANANAND, 1970, Engineering Properties of Lateritic Materials Used in Thailand Road Construction Prov. Spec. Session Engrg. Prop. of Lateritic Soils, 7th Int. Cong. Mech. Found. Engineering, Vol 2, General Report, México, pág. 109-121.

VARGAS, M., 1988, Characterization, Identification and Classification of Tropical Soils, Anais do II International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, Balicema, Rotterdam, Vol.I, pág. 71-75.

WINTERKORN, F. M. e CHANDRASENKHARAN, E. C., 1951, Lateritic Soil and Their Stabilization, HRB, Bulletin No 44, pág. 10-29.