

**CURA ACELERADA DO SISTEMA SOLO-CAL POR
TRATAMENTO TÉRMICO, APLICADA A
SOLOS LATERÍTICOS**

ALEXANDRE JOSÉ SOARES MINÁ

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - GEOTECNIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CURA ACELERADA DO SISTEMA SOLO-CAL POR
TRATAMENTO TÉRMICO, APLICADA A
SOLOS LATERÍTICOS**

ALEXANDRE JOSÉ SOARES MINÁ

ORIENTADOR: PROF. DR. HEBER CARLOS FERREIRA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

1993

Alexandre José Soares Miná

**Cura Acelerada do Sistema Solo-Cal por Tratamento Térmico,
Aplicada a Solos Lateríticos**

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

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Campina Grande - Paraíba

1993



M663c Miná, Alexandre José Soares.
Cura acelerada do sistema solo-cal por tratamento térmico, aplicado a solos lateríticos / Alexandre José Soares Miná. - Campina Grande, 1993.
83 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1993.

"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".
Referências.

1. Solos Lateríticos. 2. Solo - Cal. 3. Geotécnica. 4.
Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos.
II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB).
III. Título

CDU 624.131.2(043)

Alexandre José Soares Miná

**Cura Acelerada do Sistema Solo-Cal por Tratamento Térmico,
Aplicada a Solos Lateríticos**

Dissertação aprovada em 14 de Julho de 1993.



.....

Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira
Presidente



.....

Prof. M. Sc. Francisco B. de Lucena
Examinador



.....

Prof. M. Sc. Francisco Edmar Brasileiro
Examinador

Campina Grande - Paraíba

1993

Dedicatória

A meus pais: Manoel Miná e Socorro Miná

A Saulo, Adriana, Simone e Magaly.

Agradecimentos

A DEUS por tornar possível, em todos os sentidos, a realização deste trabalho.

Ao Orientador Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira pelos ensinamentos transmitidos durante todas as etapas deste trabalho, críticas construtivas, revisão do texto, e pela dedicação demonstrada, fatos estes que contribuíram de maneira decisiva para a conclusão deste trabalho.

Aos professores e alunos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de Geotecnia, que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os funcionários do Laboratório de Solos II, que de alguma forma colaboraram para a execução deste trabalho, em especial a D. Mauriza Bezerra de Araújo, responsável pela biblioteca de Geotecnia.

A Magaly Lima Santos da Rocha pela paciência e dedicação demonstrada nos trabalhos de digitação, correção do texto e editoração eletrônica.

A todos vocês meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Tradicionalmente, a reatividade do sistema solo-cal é avaliada em laboratório através da sistemática de Thompson (1966). Nesta sistemática é definido o tempo de cura de 28 dias para determinação da resistência do solo estabilizado. Este tempo de cura é, às vezes, um complicador, uma vez que não permite uma previsão da resistência estabilizada do solo em um tempo inferior a 28 dias.

Neste trabalho foram utilizados 10 solos lateríticos, do Nordeste do Brasil, aditivados com 6% de cal, com a finalidade de desenvolver uma sistemática de laboratório que sirva como dado auxiliar na previsão da reatividade do sistema solo laterítico-cal, através da aceleração da cura por tratamento térmico, e consequentemente sirva na pré-seleção de solos lateríticos mais adequados à estabilização com cal.

Observou-se que o tratamento térmico realizado na temperatura de 100°C durante 3 horas e 4 horas pode ser utilizado para se chegar ao objetivo deste trabalho.

Abstract

Traditionally, soil-lime system reactivity in laboratory is evaluated through the Thompson (1966) methodology. In this methodology, a period of time equivalent to 28 days, is used to determine the stabilized soil resistance. Sometimes this period of time becomes a problem, because it doesn't allow a prevision of the stabilized soil resistance in a period of time less than 28 days.

In this research 10 lateritic soils were used, from the Northeast of Brazil, with an addition of 6% of lime, with the objective of developing a laboratory methodology, that can be used to help predicting lateritic soil-lime system reactivity, through thermic treatment, and consequently can be used to preselect lateritic soils which are more adequated to be stabilized with lime.

It was noted that the thermic treatment at 100°C temperature during 3 hours and 4 hours can be used to reach the objective of this research.

Simbologia Utilizada

RCS - Resistência à Compressão Simples Não Confinada (kPa).

RCS (cura acelerada) - RCS dos solos aditivados com 6% de cal e submetidos ao tratamento térmico em banho-maria (kPa).

RCS (cura normal) - RCS dos solos aditivados com 6% de cal e curados normalmente em câmara úmida à temperatura ambiente (kPa).

RCS 7 - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, para 7 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

RCS 28 - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, para 28 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

RCS 60 - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, para 60 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

RCS (T60,t1) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 60°C, durante 1 hora de cura acelerada (kPa).

RCS (T60,t2) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 60°C, durante 2 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T60,t3) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 60°C, durante 3 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T60,t4) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 60°C, durante 4 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T80,t1) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 80°C, durante 1 hora de cura acelerada (kPa).

RCS (T80,t2) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 80°C, durante 2 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T80,t3) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 80°C, durante 3 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T80,t4) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 80°C, durante 4 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T100,t1) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 100°C, durante 1 hora de cura acelerada (kPa).

RCS (T100,t2) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 100°C, durante 2 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T100,t3) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 100°C, durante 3 horas de cura acelerada (kPa).

RCS (T100,t4) - RCS dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal, após tratamento térmico em banho-maria a 100°C, durante 4 horas de cura acelerada (kPa).

PT 7 - Parâmetro de Thompson dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal para 7 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

PT 28 - Parâmetro de Thompson dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal para 28 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

PT 60 - Parâmetro de Thompson dos solos lateríticos estabilizados com 6% de cal para 60 dias de cura normal em câmara úmida (kPa).

T - Temperatura (°C).

t - Tempo (hora)

h - Hora

$\gamma_{sm\acute{a}x}$ - Massa Específica Aparente Seca Máxima (kg/m^3).

h_{ót} - Teor de Umidade Ótima (%).

CP - Corpo de Prova

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Simbologia Utilizada	v
Capítulo 1 - Introdução e Objetivo	
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivo	2
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	
2.1 Introdução	3
2.2 Solos Lateríticos	3
2.2.1 Generalidades	3
2.2.2 Formação dos Solos Lateríticos	4
2.2.3 Características dos Solos Lateríticos	4
2.2.4 Conceituação e Classificação dos Solos Lateríticos	5
2.3 Comportamento dos Solos Lateríticos Estabilizados com Cal	7
2.3.1 Introdução	7
2.3.2 Interações Solo-Cal: Reações Básicas	8
2.3.3 Principais Fatores que Influenciam a Reatividade do Sistema	
Solo Laterítico-Cal	10
2.4 Previsão da Reatividade do Sistema Solo Laterítico-Cal	12
2.5 Efeitos da Temperatura de Secagem nos Solos Lateríticos	14
2.6 Cinética de Reação x Temperatura	15
Capítulo 3 - Materiais e Métodos	
3.1 Introdução	17

3.2 Materiais	17
3.2.1 Cal	17
3.2.2 Solos	18
3.3 Métodos	28
3.3.1 Preparação das Amostras	28
3.3.2 Compactação	28
3.3.3 Cura	28
3.3.4 Resistência à Compressão Simples Não Confinada - RCS	29
3.3.5 Análise Estatística	29
Capítulo 4 - Resultados e Discussões	
4.1 Introdução	31
4.2 Resistência à Compressão Simples com Cura Acelerada por Tratamento Térmico	31
4.3 Análise Estatística	40
4.3.1 Correlações Lineares Simples entre RCS (cura acelerada) e RCS (cura normal)	41
4.3.2 Correções Lineares Simples entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson	44
Capítulo 5 - Conclusões	
5.1 Introdução	49
5.2 Tratamento Térmico	49
5.3 Análise Estatística	49
5.4 Conclusão Final	50
Sugestões para Pesquisas Posteriores	52
Tabelas	53
Figuras	68
Referências Bibliográficas	75
Apêndice	82

Capítulo 1

Introdução e Objetivo

1.1 Introdução

Chama-se estabilização de um solo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior durabilidade e/ou uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste, ou à erosão por meio de compactação, correção da sua granulometria e da sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe conferem uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de seus grãos (Vargas, 1977).

Segundo Ingles e Metcalf (1972) a estabilização de um solo não deve ser utilizada apenas em termos de tratamento corretivo, mas também como medida preventiva, ou de segurança, contra as condições adversas durante a construção, ou durante a vida útil da obra.

Os solos lateríticos são largamente utilizados em obras de engenharia civil, tanto no estado natural como estabilizados por diferentes aditivos. Quando utilizados em estado natural, algumas vezes apresentam comportamento instável, outras vezes não podem ser utilizados diretamente nas obras por não atenderem a determinadas normas ou especificações. Com a finalidade de melhorar as qualidades destes solos, vários processos de estabilização têm sido utilizados.

Dentre os diversos tipos de aditivos utilizados no processo de estabilização química, a cal é empregada na melhoria das propriedades de engenharia de solos argilosos de clima temperado, mas sua utilização em solos lateríticos ainda não é um assunto totalmente esclarecido. Por isso, a estabilização de solos lateríticos com cal, tem sido objeto de pesquisa em todo o mundo, principalmente no que diz respeito à reatividade do sistema solo laterítico-cal.

Tradicionalmente em geotecnia, a determinação da reatividade de solos à cal é feita obedecendo-se à sistemática de Thompson (1966). O parâmetro de reatividade de Thompson é definido como a diferença entre a resistência à compressão simples (RCS) do solo estabilizado e a resistência à compressão simples (RCS) do solo no estado natural. Estes valores são definidos nas condições de massa específica aparente

seca máxima e na umidade ótima, após 28 dias de cura normal em câmara úmida à temperatura de 22°C. A sistemática de Thompson tem sido utilizada por diversos pesquisadores no estudo da reatividade do sistema solo laterítico-cal, como: Queiroz de Carvalho (1979), Queiroz de Carvalho e Cabrera (1979), Aflitos (1981), Costa et alii (1986), Neves (1989), Trajano (1991) e outros.

A grande desvantagem da sistemática de Thompson é não permitir uma avaliação da resistência estabilizada do solo em um tempo inferior a 28 dias. Assim, muitas vezes, perde-se muito tempo ao se ensaiar solos inadequados à estabilização com cal, por não se ter uma previsão de resultados.

1.2 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma sistemática de laboratório, que sirva como dado auxiliar na previsão da reatividade do sistema solo-cal aplicada a solos lateríticos (e conseqüentemente possa ser utilizada na pré-seleção de solos lateríticos mais adequados à estabilização com cal) através da aceleração da cura por tratamento térmico. Utilizando-se equipamentos facilmente encontrados em laboratórios usuais de mecânica dos solos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Este capítulo foi dividido em cinco partes. Na primeira parte é feita uma breve revisão sobre os solos lateríticos, observando-se: formação, propriedades, conceituação e classificação. Na segunda parte é feita uma revisão sobre o comportamento dos solos lateríticos estabilizados com cal. Na terceira parte é feita uma revisão sobre a previsão da reatividade do sistema solo laterítico-cal. Na quarta parte é feita uma revisão sobre os efeitos da temperatura de secagem sobre os solos lateríticos. Na quinta e última parte é feita uma revisão sobre: cinética de reação x temperatura, onde é apresentado um método alternativo de previsão de reatividade do sistema solo laterítico-cal.

2.2 Solos Lateríticos

2.2.1 Generalidades

Solos Lateríticos, são solos tropicais (ou subtropicais) avermelhados (ou amarelados) existentes em extensos depósitos superficiais na Austrália, África e América do Sul (Macedo, 1989). Durante muito tempo persistiu o conceito de que estes solos, quando aplicados na construção de barragens ou pavimentos, mostravam-se extremamente problemáticos, com comportamento inferior ao dos solos de clima temperado. Com o desenvolvimento de pesquisas sobre solos tropicais, constatou-se entretanto, que estes solos podem apresentar excelente comportamento geotécnico, sendo sua performance no campo consideravelmente influenciada por: modo de formação (gênese), características morfológicas, grau de intemperismo, composição química e mineralógica, o que implica em propriedades bastante diversas das apresentadas pelos solos de clima temperado.

2.2.2 Formação dos Solos Lateríticos

Os solos lateríticos são formados por um processo denominado intemperismo tropical e laterização, que consiste essencialmente de alterações químicas e físico-químicas 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), (Gidigas, 1976). Os três principais estágios deste processo de formação são os seguintes:

a) O primeiro estágio (intemperismo primário, decomposição) é caracterizado pela decomposição físico-química dos minerais primários e a liberação dos elementos constituintes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , etc.) os quais aparecem em simples formações iônicas;

b) O segundo estágio (intemperismo secundário, laterização) consiste na lixiviação, sob condições apropriadas de drenagem, de sílica e bases combinadas e o relativo enriquecimento superficial de óxidos, hidróxidos e sesquióxidos (principalmente Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2) provenientes de outras fontes. As condições do solo sob as quais os vários elementos são encontrados parecem depender principalmente do pH da água da superfície e das condições de drenagem (Loughnan, 1969). Sob condições semi-tropicais de baixa atividade química, o intemperismo não vai além da formação de argila e o produto final consiste principalmente de argilo-minerais representados por caulinita e óxidos hidratados (ou não) de ferro/alumínio. Sob condições climáticas quente e úmido, com vegetação densa, o intemperismo pode alcançar tal intensidade, que mesmo argilo-minerais sofrem decomposição e a sílica é lixiviada, o material remanescente consiste de óxidos de alumínio, ou óxidos hidratados de ferro;

c) O terceiro estágio (desidratação ou dissecação) envolve parcial ou completa desidratação, algumas vezes implicando em endurecimento de materiais ricos em sesquióxidos e minerais secundários (Gidigas, 1976).

2.2.3 Características dos Solos Lateríticos

Estudando os solos lateríticos da África Gidigas (1974) apresenta algumas características médias destes solos, que são as seguintes:

- cor: a cor varia do vermelho ao marrom ou amarelo, dependendo da hidratação do alumínio ou ferro presente, o que é função das condições de drenagem;
- textura: a textura é variada, as proporções de argila, silte e areia dependem da rocha de origem e do grau de intemperismo;

- consistência: parece haver boa relação entre o teor de argila e o limite de liquidez, embora a influência da presença de argila seja menos acentuada para os solos lateríticos que para outros solos tropicais. O teor de argila não tem grande influência na plasticidade, exercendo grande influência sobre o limite de contração. Estes solos geralmente ficam no contorno da linha A da carta de plasticidade de Casagrande;
- massa específica real dos grãos: esta cresce com o grau de laterização; em geral se encontra entre: 2,55 e 2,70, porém pode alcançar para pedregulhos lateríticos valores da ordem de 3,20, o que é atribuída à grande concentração de ferro;
- características de compactação: parece não haver boa correlação entre a porcentagem de argila, teor de umidade ótimo e peso específico máximo no ensaio Proctor. Os solos lateríticos apresentam baixa compressibilidade e alta resistência, especialmente quando não amolgados ou quando compactados;
- composição química: compostos essencialmente de óxidos de ferro e de alumínio, de silicatos e quantidades variáveis de óxidos de titânio, cálcio, magnésio, sódio, potássio e fósforo, mas em porcentagens inferiores a 1%, com exceção do óxido de titânio que chega às vezes até 7%. (Borba, 1981). Observa-se a presença de componentes amorfos de sílica, alumina e ferro, os quais são de grande importância no entendimento de diversas propriedades de engenharia destes solos (Queiroz de Carvalho, 1983). Os solos lateríticos apresentam uma relação inversa entre os teores de sílica e os sesquióxidos de ferro e alumínio que é o que caracteriza o seu grau de laterização;
- composição mineralógica: os minerais mais comuns são: goetita, hematita e quartzo. O argilo-mineral predominante é a caulinita, podendo conter um pouco de ilita, mas nunca montmorilonita (Ferreira, 1963).

2.2.4 Conceituação e Classificação dos Solos Lateríticos

Um grande problema enfrentado no estudo dos solos lateríticos tem sido a dificuldade em se encontrar uma definição ou sistema de classificação aceitável universalmente por todos os técnicos e cientistas ligados aos estudos de solos e rochas.

Em agronomia os solos lateríticos são apresentados por dois sistemas de classificação chamados de latosolos e solos podzólicos (Embrapa, 1980). Essas duas classes correspondem, respectivamente aos oxissolos e ultissolos (Taxonomy, 1975). Estes sistemas de classificação abordam os seguintes aspectos: textura, porosidade, drenagem, cores e principalmente fertilidade e produção agrícola.

Em geologia a classificação dos solos lateríticos é baseada na formação e origem do solo, preocupando-se um pouco com os novos minerais formadores, sem levar em consideração o tamanho da fração tamanho argila, relação sílica/sesquióxidos e concrecionamento, que são conceitos muito utilizados em geotecnia.

Em mineralogia, os solos lateríticos são conceituados como solos que contêm grandes porcentagens de sílica, alumínio e óxido de ferro amorfos e cristalinos, podendo conter ainda arranjos de goetita, hematita e quartzo. O argilomineral predominante é a caulinita, podendo conter um pouco de illita, mas nunca montmorilonita (Ferreira,1963).

Em geotecnia, os sistemas de classificação de solos comumente usados pelo engenheiro civil, foram desenvolvidos para solos de região temperada e por esta razão eles têm limitações quando aplicados a solos de região tropical. Entretanto, como a conceituação/classificação dos solos lateríticos é bastante complexa, o Comitê Internacional de Solos Tropicais relaciona três sistemas de classificação para uso na mecânica dos solos que são:

- a) classificações químicas, pedológicas e morfológicas;
- b) classificações ortodoxas;
- c) classificações não-ortodoxas.

As classificações químicas, pedológicas e morfológicas, baseiam-se na geologia e pedologia, e encontram-se muito bem discutidas no Progress Report (1981/1985). Em relação a classificações químicas, Winterkorn e Chandrasenkharan (1951) conceituaram os solos lateríticos de acordo com a relação molecular sílica/sesquióxidos (S/R). Embora vários pesquisadores, entre os quais Van de Voort (1957), critiquem esta relação, outros recomendam o seu uso, como é o caso do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) no Brasil. Outra classificação, baseada na geologia, foi proposta por Little (1967,1969). Segundo o autor, os solos lateríticos provenientes de alto grau de intemperismo são de grande utilidade para uso em suporte de fundação. Pesquisas semelhantes para outras classificações são encontradas nos trabalhos de Ruddock (1969) e Deere e Patton (1971).

As classificações ortodoxas baseiam-se nas análises de distribuições granulométricas e nos limites de Atterberg. Estas classificações apresentam uma dificuldade que é a diferença das partículas tamanho argila, silte e areia, entre solos de clima temperado e tropical. Devido a esta dificuldade, Valerga e Vantil (1969)

propõem que no sistema unificado de classificações fosse indexado um novo índice para solo laterítico relativo à fração tamanho areia, pedregulho, silte e argila e ao índice de plasticidade.

Estudando as características elásticas dos solos lateríticos, Medina e Preussler (1980, 1982) classificam os solos de acordo com o uso em estrada, baseando-se nas seguintes propriedades: granulometria, plasticidade e índice de suporte Califórnia. Pesquisas semelhantes para outras classificações estão apresentadas nos trabalhos de Vargas (1982) e Lal e Brindas (1981).

As classificações não-ortodoxas baseiam-se no comportamento das partículas e em outras propriedades que possam ajudar na conceituação do solo, dando geralmente informações sobre o comportamento particular dos solos estudados, sendo portanto insuficientes. Segundo Tuncer (1976) a massa específica real pode classificar os solos lateríticos em aluminosos e ferruginosos.

Queiroz de Carvalho (1981) estudando solos lateríticos estabilizados com cal, classificou-os de acordo com o índice de reatividade proposto por Thompson (1966). Segundo Nogami e Villibor (1981) o comportamento dos solos lateríticos e não lateríticos pode ser explicado através do ensaio de Mini-Mixture Condition Value (Person, 1976) e pela perda de peso após imersão. Pesquisas similares para outras classificações podem ser encontradas nos trabalhos de Lohnes e Demirel (1973) e De Graft-Johnson (1969).

Em resumo, observa-se que existe grande dificuldade em unificar a conceituação e classificação do solo laterítico devido a sua complexidade e diversificação, uma vez que os pesquisadores dos diversos ramos da ciência (agrônomos, químicos, mineralogistas, engenheiros civis, etc) que se interessam direta ou indiretamente por estes solos, não se preocupam em atingir um consenso em relação ao problema da conceituação e classificação de laterita ou solo laterítico (Neves, 1989).

2.3 Comportamento dos Solos Lateríticos Estabilizados com Cal

2.3.1 Introdução

Os solos lateríticos são largamente utilizados em obras de engenharia civil, tanto no estado natural como estabilizados com diferentes aditivos.

Quando utilizados no estado natural, os solos lateríticos muitas vezes não apresentam comportamento estável e outras vezes não podem ser utilizados diretamente no estado natural, por não atenderem as especificações recomendadas.

Com a finalidade de melhorar as qualidades destes solos, vários processos de estabilização têm sido utilizados, como: estabilização com betume, cimento, cal, etc.

Dentre os diversos tipos de aditivos usados no processo de estabilização, a cal é empregada na melhoria das propriedades de solos argilosos de clima temperado. No entanto, sua utilização em solos lateríticos é um assunto ainda não totalmente esclarecido, existindo muitas contradições relacionadas com as propriedades do sistema solo laterítico-cal.

2.3.2 Interações Solo-cal : Reações Básicas

A adição da cal a um solo provoca mudanças em várias de suas propriedades. Geralmente se verifica um aumento na resistência, uma redução na plasticidade e uma melhoria na trabalhabilidade (Eades, Nichols e Grimm, 1962), (Diamond e Kinter, 1965) e (Queiroz de Carvalho, 1979). As reações responsáveis por estas mudanças podem ser grupadas da seguinte forma:

a) Troca de cátions, floculação e aglomeração: ao entrar em contato com o sistema solo-água, os elementos da cal dissociam-se em cátions de cálcio e ânions hidroxilas, iniciando-se um processo de troca de cátions, onde o cátion cálcio substitui o cátion trocável existente no solo (K, Mg, H, etc.) ocorrendo ainda aglomeração adicional de cátions em torno das partículas do argilo-mineral, resultando um balanceamento das cargas negativas da argila. O resultado é a floculação e a aglomeração das partículas do argilomineral;

b) Carbonatação: o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal para formar carbonato de cálcio ou de magnésio, dependendo da cal utilizada. Este carbonato é um composto cimentante muito fraco e prejudicial para o resultado final em termos de ganho de resistência;

c) Reação Pozolânica: é uma reação que ocorre com material silicoso ou silico-aluminoso, que não possui apreciável poder aglomerante hidráulico, mas na forma finamente dividida e na presença de umidade, reage com hidróxido de cálcio (cal) formando compostos com poder aglomerante (Souza Santos, 1976). É uma reação lenta em temperatura próxima a do ambiente.

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

É importante observar que nem sempre todas as reações ocorrem. Por exemplo, se o cátion trocável do solo for o cálcio, a reação de troca de cátions não será realizada, ou será reduzida a um mínimo. Um outro exemplo, refere-se à reação de carbonatação, a qual pode ser evitada pelo menos com os cuidados de laboratório.

As principais variações que ocorrem nas características dos solos, com a adição da cal, são:

- a) redução do índice de plasticidade: geralmente devido ao aumento do limite de plasticidade e a diminuição do limite de liquidez;
- b) melhoria da trabalhabilidade: verifica-se que a cal e a água aceleram a desintegração dos torrões de argila, durante a homogenização, beneficiando a trabalhabilidade;
- c) o valor de aglutinação do solo aumenta substancialmente pelo efeito aglomerante da cal;
- d) contração e expansão linear: diminuem bruscamente, o solo tratado com cal torna-se mais estável;
- e) resistência à compressão simples: verifica-se um aumento considerável na resistência à compressão simples;
- f) o índice de suporte Califórnia aumenta consideravelmente;
- g) com a adição da cal, um solo argiloso pode reter uma quantidade adicional de água, diminuindo a ação da secagem;
- h) a resistência ao cisalhamento dos solos estabilizados com cal, aumenta devido ao aumento do ângulo de atrito e da coesão;
- i) permeabilidade: nos solos mais coesivos e mais reativos, há um aumento na permeabilidade, devido à flocculação da mistura e aumento do índice de vazios;
- j) compactação: verifica-se redução do $\gamma_{smáx}$, que pode ser atribuída à agregação e flocculação das partículas, aumentando o índice de vazios e diminuindo o peso por volume. O aumento do teor de água é devido ao aumento do índice de vazios, onde se retém mais água.

2.3.3 Principais Fatores que Influenciam a Reatividade do Sistema Solo Laterítico-Cal.

A troca de cátions, flocculação e aglomeração são as reações responsáveis pela mudança na plasticidade, contração e trabalhabilidade de um solo, enquanto que a reação pozolânica é, sem dúvida, a responsável pelo aumento de resistência.

Com relação à reação pozolânica, os fatores mais importantes são as fontes de sílica, alumina e ferro. Destaca-se aqui os argilo-minerais como a fonte principal de sílica e alumina. No caso dos solos lateríticos, os componentes amorfos de sílica, alumina e ferro participam ativamente do processo de estabilização (Queiroz de Carvalho, 1983).

Como o processo é relativamente complexo, outros fatores participam negativamente ou positivamente. Por exemplo, a presença de matéria orgânica não favorece à interação solo-cal (Harty, 1971).

A participação do ferro na reação solo-cal, é de difícil previsão, uma vez que existem evidências na literatura (Harty e Thompson, 1973), (Towsend, 1969) de que o ferro pode ser ou não um fator positivo na interação solo laterítico-cal.

Tradicionalmente, em engenharia a determinação da reatividade de solos com cal é feita obedecendo-se à sistemática de Thompson (1966).

O parâmetro de reatividade de Thompson é definido como a diferença entre a RCS do solo estabilizado com cal e a RCS do solo no estado natural, ambas as RCS definidas nas condições de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, após 28 dias de cura em câmara úmida a 22°C.

O parâmetro de Thompson traduz de maneira definida a reação pozolânica, uma vez que a reação pozolânica é a responsável pelo aumento de resistência no sistema solo-cal.

A reatividade do sistema solo laterítico-cal tem sido objeto de pesquisa em todo o mundo.

Winterkorn e Chandrasekharan (1951) estudando a estabilização com cal de solos tropicais, propuseram uma atenção especial ao grau de intemperismo e à composição química do solo.

De acordo com Biszewski (1983) a presença de sesquióxidos diminui a resistência dos solos estabilizados. Por outro lado Gidigas (1976), De Graft-Johnson e Bhatia (1970) afirmaram que devido ao alto teor de sesquióxidos, os solos lateríticos podem ser efetivamente estabilizados com cal.

Ferro (1976) estudando solos lateríticos da Paraíba, estabilizados com cal, afirmou que o solo de Nova Floresta poderia ser utilizado sem restrições, como material de base rodoviária.

Queiroz de Carvalho (1981) estudando diversos solos do Nordeste do Brasil, de acordo com a sistemática de Thompson, propôs a seguinte classificação:

$RT < 250 \text{ kPa}$ - fraca reatividade;

$250 < RT < 500 \text{ kPa}$ - baixa reatividade;

$500 < RT < 1000 \text{ kPa}$ - média reatividade;

1000 < RT < 2000 kPa - alta reatividade;

Queiroz de Carvalho (1983) estudando solos lateríticos do Nordeste do Brasil, encontrou correlações lineares simples e múltiplas, altamente significativas, entre o parâmetro de Thompson e os componentes amorfos de sílica, alumina e ferro, concluindo que o processo de estabilização com cal dos solos lateríticos é beneficiado significativamente pela presença de componentes amorfos.

Aflitos (1981) estudando solos lateríticos das regiões Norte e Nordeste do Brasil, estabilizados com cal, concluiu que a adição da cal melhorou as características de engenharia dos solos.

Lima (1983) estudou a reatividade à cal de solos lateríticos visando a sua estabilização, obtendo bons resultados para um solo de Nova Floresta, PB.

Costa et alii (1986) estudando solos lateríticos da região Nordeste do Brasil, estabilizados com cal, concluíram que a reatividade à cal é altamente correlacionada com os componentes amorfos de sílica e alumina; os autores verificaram também que não houve um tempo ótimo de cura para o sistema solo-cal.

Trajano e Ferreira (1991) estudando 10 solos lateríticos da região Nordeste do Brasil, estabilizados com 6% de cal e aditivados com hidróxido e silicato de sódio, concluíram que estes aditivos secundários beneficiaram as propriedades mecânicas do sistema solo laterítico-cal, proporcionando um significativo aumento na RCS dos solos estudados.

Em uma análise conjunta de diversos trabalhos, relativo à reatividade do sistema solo laterítico-cal, observa-se que:

- a) Estabilização com cal não é prática corrente em engenharia rodoviária, no Brasil.
- b) A reatividade do sistema solo-cal tem sido muito estudada em escala de laboratório com resultados promissores.
- c) A cinética de reação do sistema solo-cal é muito lenta, implicando em tempos de cura excessivamente longos, em que do ponto de vista de aplicação em rodovia é pouco prático.
- d) Os mecanismos relativos às interações solo-cal encontram-se bem estudados sendo bem conhecidas as suas diversas etapas.
- e) Faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisa visando acelerar a cinética de reação do sistema solo-cal, de forma a se obter resultados adequados mais rapidamente.

2.4 Previsão da Reatividade do Sistema Solo Laterítico-cal

Como foi observado anteriormente, a determinação da reatividade dos solos com cal é feita obedecendo a sistemática de Thompson (1966). A grande desvantagem da sistemática de Thompson é não permitir uma avaliação da resistência estabilizada do solo em um tempo inferior a 28 dias. Assim, muitas vezes, perde-se muito tempo ao se ensaiar solos inadequados a estabilização com cal, por não se ter uma previsão de resultados. Diante deste fato, vários pesquisadores estudaram a reatividade dos solos com cal, com objetivo de se obter uma previsão de resultados. No caso específico de solos lateríticos, alguns trabalhos publicados nessa linha de pesquisa são os seguintes:

a) Parâmetro de Atividade Pozolânica (DCTC)

Este parâmetro, proposto por Queiroz de Carvalho (1979), é baseado na mudança da capacidade de troca de cátions do solo, medida em um pH igual a dez e um pH igual a sete. Este parâmetro foi comparado com o parâmetro de Thompson, obtendo-se a seguinte correlação linear simples, para teste bilateral e significância de 1,0% :

$$DCTC = 0,00142 RT + 0,5095$$

$$R = 0,69$$

$$NC = 19$$

onde :

$$DCTC = CTC (pH = 10) - CTC (pH = 7)$$

CTC - Capacidade de Troca de Cátions

R - Coeficiente de Correlação Linear

NC - Número de Casos

RT - Parâmetro de Reatividade de Thompson em kPa.

A validade altamente significativa desta equação, mostra mais uma opção para se avaliar o grau de reatividade à cal de solos lateríticos.

b) Índice de Reatividade Pozolânica (Ai)

Cabrera e Nwakanma (1979) estudando um método para determinar a reatividade pozolânica de solos lateríticos, propuseram um índice de atividade pozolânica, que pode ser expresso da seguinte forma:

$$A_i = k n^x, \text{ onde:}$$

A_i - Índice de reatividade pozolânica;

k - Constante;

n - Porcentagem da fração tamanho argila;

x - Constante dependendo do tipo de material.

A vantagem do índice de reatividade (A_i) é o de ser um parâmetro através do qual pode ser obtido a reatividade do sistema solo-cal mais rapidamente. Segundo os autores, os valores do índice de reatividade pozolânica variam de: $0,12 \times 10^{-4}/\text{dia}$ a $4,08 \times 10^{-4}/\text{dia}$, sendo proposto um valor mínimo de $A_i=0,75 \times 10^{-4}/\text{dia}$ como limite entre os solos pozolânicos e não-pozolânicos.

c) Área Específica

Neves (1989) pesquisando 16 solos lateríticos das regiões Norte e Nordeste do Brasil, estabilizados com 3%, 6% e 9% de cal, curados em câmara úmida por períodos de 7, 28 e 60 dias, com a finalidade de avaliar estatisticamente a interdependência entre área específica (determinada pelos métodos de Blaine e Fisher) e as interações solo laterítico-cal, obteve correlações estatísticas altamente significativas entre área específica e RCS de solos lateríticos estabilizados com cal; e área específica e o parâmetro de Thompson. Concluindo que a determinação da área específica pode ser usada na previsão da reatividade do sistema solo laterítico-cal.

d) Análise Térmica Diferencial (ATD)

Nos primeiros anos da década de 60 desenvolveu-se uma técnica para pré-seleção de amostras de solos mais promissoras para o desenvolvimento de atividade pozolânica por tratamento térmico.

A técnica consistia em reagir as amostras em estudo com uma solução 1N de hidróxido de sódio; após o tratamento a amostra era submetida à análise térmica diferencial, sendo evidenciada a formação de um neossilicato de sódio hidratado no caso de amostras com potencial como pozolana. Kapel, Neves e Ferreira (1989) continuando nessa mesma linha de pesquisa, verificaram que as novas fases formadas eram muito instáveis e com grande sensibilidade a secagem. Havendo esta dificuldade resolveram mudar a técnica, substituindo o hidróxido de sódio por hidróxido de cálcio, em virtude do neossilicato ficar evidenciado por um pico endotérmico entre 140°C e 350°C , sendo muito mais estável às operações que precedem a ATD. Dessa forma pode-se pré-selecionar os solos mais adequados para estabilização com cal através da ATD.

2.5 Efeitos da Temperatura de Secagem nos Solos Lateríticos

Na literatura sobre solos lateríticos existem evidências de que o processo de secagem da amostra de solo pode afetar algumas de suas propriedades. Por exemplo, Hirashima (1948), Newill (1961), Frost (1967) e Wallace (1973) verificaram que a secagem modificava a granulometria dos solos lateríticos, transformando partículas tamanho silte e argila em partículas tamanho areia. Por outro lado, Fruhauf (1946) e Terzaghi (1958), mostraram que os solos lateríticos sofriam redução da plasticidade em decorrência da secagem, enquanto que Queiroz de Carvalho (1984), concluiu que o aumento da temperatura de secagem não afetou a plasticidade dos solos lateríticos estudados.

Com relação a resistência, Frost (1967), Novais Ferreira e Meireles (1969) constataram que o valor do CBR aumentava de acordo com o aumento da temperatura de secagem do solo. Costa e Queiroz de Carvalho (1985) estudando solos lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil constatou que o aumento da temperatura de secagem não definiu uma tendência de efeito no valor do CBR, parâmetros de compactação, e composição mineralógica; uma vez que o valor do CBR e destes parâmetros aumentaram/diminuíram, ou não foram afetados pelo aumento da temperatura de secagem.

Beirrel (1952) e Frost (1967) observaram que os solos contendo mineral haloisita são mais sensíveis à secagem do que os solos que contém gibsita e/ou alofano. Por outro lado, Moh e Mozhar (1969) constataram que os solos ricos em caulinita não apresentavam alterações consideráveis nas suas propriedades com a secagem.

Diniz (1988) estudando 10 solos lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil com amostras secas ao ar e em estufa a 110°C, concluiu que a temperatura de secagem não definiu uma tendência de efeito sobre a RCS, pois os solos estudados mostravam comportamento distintos aumentando ou diminuindo a RCS com o aumento da temperatura.

Macedo, Brasileiro e Ferreira (1988) estudaram agregados calcários, graníticos e lateríticos, secos ao ar e previamente aquecidos em estufa a temperaturas que variaram entre 100°C e 200°C, com intervalos de 25°C. Concluindo que houve uma melhoria na resistência, medida pelo ensaio "Los Angeles", dos agregados mais porosos (calcários e lateríticos) quando os mesmos foram submetidos a secagem.

Silveira (1988) estudando solos lateríticos do norte e Nordeste do Brasil, com amostras secas ao ar e em estufa a 60°C e 110°C, concluiu que o aumento da temperatura de secagem em 73% das amostras apresentou diminuição nos valores do limite de liquidez (LL).

Devido à variedade de solos lateríticos, os pesquisadores têm obtido resultados que conflitam entre si. Não há dúvida que isso se deve em parte as características peculiares dos solos lateríticos e em parte se deve ao número relativamente limitado de pesquisas desenvolvidas sobre o assunto, o que sugere a necessidade de se desenvolver pesquisas que forneçam subsídios a um melhor entendimento dos solos lateríticos.

2.6 Cinética de Reação x Temperatura

Pela observação experimental verificou-se que a velocidade das reações químicas são controladas apenas por alguns fatores. Cinco desses fatores de controle de velocidade mais frequentemente encontrados são: concentração dos reagentes, natureza dos reagentes, temperatura, pressão e catalisadores.

Em geral, quanto mais elevada a temperatura dos reagentes, mais rapidamente se processa a reação. Uma regra comum e grosseira é a de que um aumento de 10°C na temperatura dobra a velocidade da reação. Esta regra porém, é apenas aproximada, porque o efeito da temperatura depende da grandeza da energia de ativação necessária para iniciar a reação (Slaubaugh e Parsons, 1982).

Como foi visto anteriormente, a reação pozolânica é a reação responsável pelo aumento da resistência no sistema solo-cal. Porém a reação pozolânica é uma reação lenta, em temperatura ambiente, necessitando-se de vários dias e até meses (em laboratório ficou convencionado 28 dias, utilizando-se a sistemática de Thompson) para que se processe parte da reação. Sabendo-se que a temperatura tem grande influência na cinética das reações, isto é, o aumento da temperatura aumenta a velocidade da reação; nota-se uma possibilidade de previsão de reatividade do sistema solo laterítico-cal através do aumento da temperatura durante a cura.

Queiroz de Carvalho (1985) estudando 8 solos lateríticos estabilizados com 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% de cal, tentou uma técnica de cura acelerada que consistia em aquecimento de amostras de solo em estufa a 40 °C, durante 6, 12, 24 horas e 2, 3 e 7 dias. Os resultados obtidos indicaram que para os tipos de solos estudados e para a técnica utilizada não existe um tempo ótimo de cura acelerada. Observando também que o processo de cura em estufa aumenta o valor da RCS mais por secagem/endurecimento do que pela estabilização propriamente dita. Uma nova técnica de cura acelerada por tratamento térmico que evite ou diminua a perda de água e conseqüentemente evite ou diminua a secagem/endurecimento, pode

efetivamente aumentar a velocidade da reação pozolânica, podendo-se assim avaliar a resistência do solo estabilizado em um tempo bem inferior a 28 dias.

A técnica proposta neste trabalho consiste em tratamento térmico em banho-maria, com amostras de solo embaladas em sacos plásticos de polietileno com o objetivo de se evitar a variação das condições de umidade (uma vez que é necessário a presença de umidade para que se processe a reação pozolânica) bem como evitar a secagem/endurecimento das amostras de solo, e desta forma atuar diretamente na cinética da reação pozolânica, acelerando o processo de cura e assim poder avaliar o ganho de RCS do solo estabilizado em um tempo inferior a 28 dias.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Introdução

Neste capítulo será feito o detalhamento relativo aos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

Os solos utilizados nesta pesquisa são solos lateríticos provenientes da região Nordeste do Brasil.

No processo de estabilização foi utilizada uma cal hidratada comercial.

Os métodos de ensaios constantes de norma da ABNT serão apenas citados, enquanto os métodos não constantes desta normalização serão descritos detalhadamente.

3.2 Materiais

3.2.1 Cal

Foi utilizada uma cal hidratada Ca(OH)_2 conhecida comercialmente como “Calcigra”, fabricada pela Companhia Industrial Gramame, localizada na BR-101-Sul-km 13, Alhandra, Paraíba.

Trata-se de uma cal calcítica e sua composição química encontra-se na Tabela 1.

A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel “Kraft”, com três camadas, depois foi retirada da sua embalagem original e colocada em sacos plásticos, que foram lacrados, a fim de não alterar as suas propriedades.

Os ensaios de caracterização da cal foram executados de acordo com o método da ABNT - MB - 342 (1977).

Os resultados reportados são a média aritmética de duas determinações, que não diferem em mais de 3% dos valores obtidos isoladamente.

Os resultados são apresentados em porcentagem com quatro algarismos significativos.

3.2.2 Solos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram selecionadas 10 amostras de solos lateríticos provenientes da região Nordeste do Brasil (Paraíba, Piauí, Maranhão). O critério para seleção destas amostras foi baseado na formação geológica, pedologia e clima, como também na viabilidade de utilização destas ocorrências em obras de engenharia.

As amostras de solo receberam a denominação da localidade mais próxima da jazida de onde foram retiradas as amostras como mostra a Tabela 2.

Diversas características e propriedades de engenharia dos solos lateríticos estudados, como: composição química, constituintes amorfos, relação sílica/sesquióxidos, análise granulométrica e limites de Atterberg, área específica, índice de suporte Califórnia, etc., podem ser encontradas no trabalho de Neves (1989).

A seguir serão apresentadas algumas características de cada jazida.

Jazida de João Pessoa - PB (JPPB)

a) Localização

Jazida existente no conjunto dos bancários, a 2 km do campus universitário, sentido campus-Cabo Branco.

b) Formação Geológica

A jazida está inserida na formação Barreiros. Esta formação é constituída de sedimentos pouco consolidados, de estratificação predominantemente horizontal, afossilíferos, apresentando sedimentos areno-argilosos, argilo-arenoso, arenoso, argila de coloração variada, intercaladas muitas vezes com camadas de seixos rolados e concreções lateríticas. Esta formação é datada do Terciário (SUDENE, 1972).

c) Pedologia

De acordo com o “Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos” do estado da Paraíba, do Ministério da Agricultura, o solo da região é classificado como PV5 (Podzólico Vermelho Amarelo Latossólico), de textura arenosa (SUDENE, 1972).

d) Clima e Precipitação

Pode-se classificar bioclimaticamente a região segundo a classificação de Gaussen, como sendo xerotérmica, sub-região mesomediterrânea de caráter atenuado (3cTh), denominado com índice

xerotérmico variando de 40 a 100, apresentando de 3 a 4 meses secos. A precipitação anual média é de 1720 mm (SUDENE, 1972 e 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, goetita, hematita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Teixeira - PB (TEPB)

a) Localização

A jazida está localizada na margem esquerda da rodovia PB-306, ligando Teixeira a Princesa Isabel, a 8 km da cidade de Teixeira.

b) Formação Geológica

A jazida está inserida na formação Serra dos Martins. Esta formação consiste de sedimentos argilosos, arenitos ferruginosos fortemente cimentados por limonite, além de gangas lateríticos, repousando sobre terreno Pré-Cambriano. A formação é datada do Terciário (SUDENE, 1972).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos" do estado da Paraíba, do Ministério da Agricultura, o solo da região é classificado como RE3 (Regosol Eutrófico e Solos Litóficis Eutróficis) apresentando textura arenosa.

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente segundo a classificação de Gaussen, a região de Teixeira é classificada como xeroquimênica, sub-grupo termoxeroquimênica de caráter acentuado (4aTh), denominado no Brasil como tropical quente de seca acentuada, apresentando índice xerotérmico variando de 150 a 200, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 15°C.

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída de: caulinita, quartzo, mica, microclina, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Sapé - Mari - PB (SPPB)

a) Localização

A jazida Sapé-Mari está localizada na margem direita da rodovia PB-055, a 6 km da cidade de Mari, no sentido Sapé-Mari.

b) Formação Geológica

A jazida está inserida na formação Barreiros. Esta formação é constituída de sedimentos pouco consolidados, de extratificação predominantemente horizontal, afossilíferos, apresentando sedimentos areno-argilosos, argila de coloração variada, intercalado muitas vezes por camadas de seixos rolados e concreções lateríticas. Esta formação é datada do Terciário (SUDENE,1972).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos" do estado da Paraíba, do Ministério da Agricultura, o solo da região é classificado como PV6 (Podzólico Vermelho Amarelo) com a predominante textura argilosa (SUDENE,1972).

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente segundo a classificação de Gaussen, pode-se classificar a região onde está a jazida de Sapé-Mari como sendo xerotérmica, sub-grupo mesomediterrâneo de caráter atenuado (3cTh) denominado no Brasil como mediterrâneo ou nordestino quente de seca atenuada, com índice xerotérmico variando de 40 a 100, apresentando de 3 a 4 meses secos. A precipitação anual média na região é de 1100 mm (SUDENE,1972 e 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, goetita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Areia - PB (ARPB)

a) Localização

A jazida está localizada na margem esquerda da rodovia PB-079 a 5 km da cidade de Areia.

b) Formação Geológica

A jazida está inserida no Pré-Cambriano (CD) representado na Paraíba por Gnaisses e Migmatitos (SUDENE,1972).

c) Pedologia

De acordo com o “Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos” do estado da Paraíba, do Ministério da Agricultura, o solo da região é classificado como PE 13 (Solos Litólicos Eutróficos com a textura média (SUDENE,1972).

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente, segundo a classificação de Gaussen, pode-se classificar a região onde está a jazida de Areia como sendo xerotérmica, sub-grupo sub-mediterrâneo de caráter de transição (3bTh) denominado no Brasil de mediterrâneo ou nordestino sub-seco, com índice xerotérmico variando de 0 a 40, apresentando de 1 a 2 meses secos. A precipitação média anual da região é de 1000 mm.

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, goetita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena,1984).

Jazida de Presidente Dutra - MA (PDMA)

a) Localização

A jazida denominada de Presidente Dutra está localizada a 300 m da rodovia BR-336, km 185 à margem direita no sentido Presidente Dutra - Teresina. É uma jazida que ocupa grande área, porém de pequena profundidade como todas as jazidas da região.

b) Formação Geológica

A região é plana, sendo coberta por babaçual, estando inserida na formação geológica Itapecurú. Esta formação constitui-se quase exclusivamente de arenitos de cores diversas, predominando o cinza, róseo e vermelho. Finos argilosos, com estratificações cruzadas e silicações principalmente no topo. Intercalam-se leitos de siltitos e folhelos cinza-esverdeados e avermelhados.

Em certas áreas aparece um conglomerado basal contendo seixos de basalto alterado. Com base em fósseis, a formação Itapecurú foi datada como Cetáceo Inferior (DNPM,1974 e SUDENE,1977).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório de Solos", elaborado pelo DNPM para o Programa de Integração Nacional e a SUDENE, o solo da jazida de Presidente Dutra pode ser classificado como PA6 (Podzólico Vermelho-Amarelo equivalente Eutrófico, Vertissolo e Solos Hidromórficos indiscriminados). Esta unidade de mapeamento é constituída de solos de textura argilosa e indiscriminada, profundos e medianamente profundos, mal drenados, estrutura em blocos subangulares, angulares e indiscriminados (DNPM,1974).

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente, utilizando a classificação de Gaussen, pode-se classificar a região onde está inserida a jazida de Presidente Dutra no grupo (4cTh) região xeroquimênica, sub-grupo termoxeroquimênica de caráter atenuado, com valor de índice xerotérmico variando de 40 a 100 sendo a temperatura do mês mais frio superior a 15°C, apresentando de 3 a 4 meses secos. A precipitação média anual na região é de 1200 mm (SUDENE,1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, hematita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena,1984).

Jazida de Vargem Grande - MA (VGMA)

a) Localização

A jazida denominada Vargem Grande está localizada na margem esquerda da rodovia BR-222, sentido Itapecurú-Vargem Grande, a 22,3 km da cidade de Itapecurú Mirim.

b) Formação Geológica

A região está inserida na Formação Itapecurú. Esta formação constitui-se quase exclusivamente de arenitos de cores diversas, predominando o cinza, róseo e vermelho. Finos argilosos, com estratificações cruzadas e silificações principalmente no topo. Intercalando-se leitos de siltitos e folhelos cinza-esverdeados e avermelhados. Em certas áreas aparece um conglomerado basal contendo seixos de basalto alterado. Com base em fósseis, a formação Itapecurú foi datada como Cetáceo Inferior (DNPM,1974 e SUDENE,1977).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório de Solos", elaborado pelo DNPM para o Programa de Integração Nacional e a SUDENE, o solo da jazida de Vargem Grande pode ser classificado como CL3 (Solos Concrecionários Lateríticos, Podzólico Vermelho Amarelo, textura argilosa e areia quartzosa). Esta unidade de mapeamento é constituída de solos de textura argilosa e indiscriminada, medianamente profundos e rasos, bem drenados e estrutura indiscriminada (DNPM,1974).

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente, utilizando a classificação de Gaussen, pode-se classificar a região onde está inserida a jazida de Vargem Grande no grupo (4cTh) região xeroquimênica de caráter atenuado denominado no Brasil de tropical quente de seca atenuada, com o valor do índice xerotérmico variando de 40 a 100, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 15°C e apresentando 3 a 4 meses secos. A precipitação média anual na região é de 1700 mm (SUDENE, 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, goetita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Gilbués - PI (GIPI)

a) Localização

A região de Gilbués é constituída de um solo bastante avermelhado, que na região, recebe o nome de "Tauá", tendo sido utilizado em misturas com solo arenoso em algumas estradas vicinais. O material para este estudo foi retirado de um corte localizado a 3,5 km da cidade de Gilbués, à margem esquerda da BR-135 no sentido Gilbués-Correntes.

b) Formação Geológica

A região apresenta relevo levemente ondulado, estando inserida na formação geológica denominada Pedra de Fogo. Esta formação se constitui de arenitos, siltitos e folhelos intercalados em proporções variadas, sendo que os siltitos e folhelos são de tonalidade vermelho-púrpura verde, pouco micáceo e baixa fissibilidade. Leitos e bancos de sílex estão presentes em vários níveis extratigráficos, calcários brancos, leitos de gipsita e aragonita são mais frequentes no topo da formação. A idade

perniana da formação foi determinada com base em Psaronius e posteriormente confirmada por outras macro ou microfósseis (DNPM, 1974 e SUDENE, 1977).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório de Solos", elaborados pelo DNPM para o Programa de Integração Nacional e a SUDENE, o solo desta região é classificada como B1 (Solo Laterítico Bruno Avermelhado Eutrófico e Brunizen Avermelhado). Esta unidade de mapeamento é constituída de solos de textura argilosa, medianamente profundos, bem drenados, estrutura em blocos (DNPM,1974).

d) Clima e Precipitação

A região de Gilbués é classificada segundo a classificação proposta por Gaussen, como xeroquimênica, sub-região termoxeroquimênica, de caráter médio (4bTh) denominado no Brasil como tropical quente de seca média tendo o índice xerotérmico variando de 100 a 150, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 15°C e apresentado de 3 a 4 meses secos.

O clima xeroquimênico é caracterizado por um período seco nas estações mais quentes e um período úmido bem acentuado e nitidamente marcado por fortes chuvas de verão. A precipitação na região é de 900 mm por ano (DNPM, 1974 e SUDENE, 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, microclina, sercicita, goetita e hematita (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Picos - PI (PIPI)

a) Localização

A jazida de Picos fica localizada a 2,4 km na rodovia BR-316, margem direita sentido Picos - Teresina, km 291, tendo sido estudada pelo 3º Batalhão de Engenharia do Exército nos serviços de pavimentação da BR-316.

b) Formação Geológica

A região, onde está localizada esta jazida fica inserida na formação denominada Cabeças. Esta formação constitui-se de arenitos de cores claras, brancos e cinza-amarelados, às vezes chegando a

vermelho médio e grosseiro, frequentemente conglomerático e muito pouco argiloso. O arenito é geralmente de aspecto maciço pela estratificação muito espessa, sendo comuns as estratificações cruzadas bem desenvolvidas. Em certos locais, apresenta intercalações de siltitos e arenitos finos laminados também de cores claras. A sua espessura média é estimada em torno de 300 metros. A sua idade data do Devoniano Médio e Superior (DNPM, 1974 e SUDENE, 1977).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório de Solos", elaborado pelo DNPM para o programa de Integração Nacional e a SUDENE, o solo desta região é classificado como CL4 (Solos Concrecionários Lateríticos, Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média, Solos Litólicos). Esta unidade de mapeamento é constituída de solos de textura argilosa e média, medianamente profundos e rasos, bem e fortemente drenados, estrutura indiscriminada e maciça (DNPM, 1974).

d) Clima e Precipitação

Bioclimaticamente, a região de Picos pode ser classificada como pertencente à região xeroquimênica, sub-região termoxeroquimênica de caráter acentuado (4aTh) denominada no Brasil de tropical quente de seca acentuada, com valor de índice xerotérmico variando de 150 a 200 e apresentando de 7 a 8 meses secos. A precipitação média na região é de 650 mm (DNPM, 1974 e SUDENE, 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, goetita, hematita, anatásio e matéria orgânica (Ferreira e Lucena, 1984).

Jazida de Buriti dos Lopes - PI (BUPI)

a) Localização

A região de Buriti dos Lopes apresenta grande número de jazidas de solos lateríticos optando-se para coleta do material por um corte localizado à margem esquerda da rodovia BR-345, a 3,5 km da cidade de Buriti dos Lopes no sentido Buriti dos Lopes- Parnaíba.

b) Formação Geológica

A região é relativamente plana, estando inserida na formação Pimenteiros. Esta formação inicia-se com folhelos de cores variadas, predominando o vermelho cinza escuro, micáceos, contendo nódulos

cruzadas bem desenvolvidas. Em certos locais, apresenta intercalações de siltitos e arenitos finos laminados também de cores claras. A sua espessura média é estimada em torno de 300 metros. A sua idade data do Devoniano Médio e Superior (DNPM, 1974 e SUDENE, 1977).

c) Pedologia

De acordo com o "Mapa Exploratório de Solos" elaborado pelo DNPM para o programa de Integração Nacional, o solo desta região é classificado como AQ5 (Areias Quartzosas e Solos Litólicos). Esta unidade de mapeamento é constituída de solos de textura arenosa e indiscriminada, profundos e rasos, bem drenados, estrutura em grãos simples e indiscriminada (DNPM, 1974).

d) Clima e Precipitação

A região de Castelo no Piauí, segundo a classificação de Gaussen, é classificada bioclimaticamente como xeroquimênica, sub-região termoxeroquimênica de caráter médio (4bTh) denominado no Brasil como tropical quente de seca média, o qual apresenta estação seca de 5 a 6 meses e índice xerotérmico variando entre 100 a 150, sendo a temperatura do mês mais frio superior a 15°C. A precipitação média na região é de 1200 mm (SUDENE, 1974).

e) Composição Mineralógica

As análises mineralógicas (composição química, difração de raios-X, microscopia eletrônica e análise térmica diferencial) indicam que a amostra é constituída por: caulinita, quartzo, goetita e anatásio (Ferreira e Lucena, 1984).

3.3 Métodos

3.3.1 Preparação das Amostras

Inicialmente as amostras foram secas à temperatura ambiente, depois foram beneficiadas em peneira ABNT 9,5mm (3/8 pol) e logo em seguida determinada a umidade higroscópica e colocadas em sacos plásticos. A opção por partículas inferiores a 9,5mm é para minimizar o efeito da variação da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima ao longo do corpo de prova (Queiroz de Carvalho, 1981).

3.3.2 Compactação

Inicialmente as amostras de solo foram estabilizadas com 6% de cal em massa. A homogeneização do solo com a cal e água foi feita através de misturador elétrico.

Foram confeccionados corpos de prova (CP) cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

As amostras foram compactadas estaticamente com uma energia equivalente ao Proctor Normal ($6,0\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$).

Os parâmetros de compactação (massa específica aparente seca máxima e umidade ótima) são os indicados por Neves (1989) e estão indicados na Tabela 3.

A opção pela porcentagem de 6% de cal em massa para estabilização das amostras é baseada na indicação de Neves (1989), que estudando os mesmos solos lateríticos, estabilizados com 3%, 6% e 9% de cal em massa, obteve os melhores resultados de reatividade a cal para a porcentagem de 6% e 9%, sendo escolhido 6% por ser um valor médio.

3.3.3 Cura

Os corpos de prova (CP) foram previamente curados em câmara úmida, em temperatura ambiente, por um período de 24 horas. Este período de pré-cura foi necessário para que não ocorresse o desmoronamento do CP ao ser realizado o tratamento térmico.

Após o período de pré-cura em câmara úmida, os CP foram embalados em sacos plásticos de polietileno de alta densidade. Posteriormente os CP foram colocados em banho-maria, com temperatura controlada, para realização da cura acelerada por tratamento térmico.

O equipamento utilizado para o tratamento térmico foi o banho-maria para se evitar o aquecimento dos CP por via seca (estufa, por exemplo) o que causaria a secagem/endurecimento do CP. Além disso o banho-maria é um equipamento facilmente encontrado nos laboratórios de mecânica dos solos.

A embalagem dos CP em sacos plásticos também tem como objetivo evitar (ou diminuir) a variação das condições de umidade, além de evitar (ou diminuir) a perda de água e o ressecamento/endurecimento do corpo de prova (CP).

Foram realizados ensaios de tratamento térmico em banho-maria nas temperaturas de 60°C, 80°C e 100°C, para intervalos de tempo de tratamento térmico de: 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas. Em estudos preliminares ficou evidenciado que para os intervalos de tempo utilizados, o tratamento térmico abaixo de 60°C não apresentava ganho de resistência à compressão simples apreciável e para a temperatura de 100°C o ganho de resistência à compressão simples era suficiente para comparação com os dados de resistência à compressão simples indicados por Neves (1989) obtidos com cura normal em câmara úmida a temperatura ambiente. Para cada temperatura e cada intervalo de tempo foram moldados 3 corpos de prova.

3.3.4 Resistência à Compressão Simples (não confinada) - RCS

Após cada intervalo de tempo de tratamento térmico e para cada temperatura, foi analisado o comportamento dos CP através do ensaio de RCS. Utilizando-se para isso, uma prensa universal, marca Pavitest, provida de anel dinamométrico, com velocidade de deslocamento de 0,127 cm/min. Os resultados referem-se a média aritmética de três determinações, não diferindo em mais de 10% dos valores individuais.

Os resultados são apresentados em kPa, com três algarismos significativos.

Também foi realizado ensaio de RCS para corpos de prova (CP) com 1 dia de pré-cura em câmara úmida, porém não submetidos ao tratamento térmico, ficando aqui convencionado o tempo $t=0$ hora para os corpos de prova nestas condições. A sequência das operações executadas nesta pesquisa é mostrada na Figura 1a. A descrição detalhada da metodologia está apresentada no Apêndice.

3.3.5 Análise Estatística

Os resultados obtidos para RCS após o tratamento térmico em banho-maria dos 10 solos lateríticos estudados, aditivados com 6% de cal em massa, nas temperaturas de 60°C, 80°C e 100°C e para os intervalos de tempo de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas foram comparados e analisados estatisticamente, através de correlações lineares simples, com os dados de RCS apresentados por Neves (1989) para os mesmos solos lateríticos, aditivados com 6% de cal em massa, curados normalmente em câmara úmida à temperatura ambiente para os intervalos de tempo de 7 dias, 28 dias e 60 dias.

Também foi feita análise estatística, através de correlações lineares simples, entre RCS com tratamento térmico e o parâmetro de Thompson apresentado por Neves (1989) para 7 dias, 28 dias e 60 dias de cura normal em câmara úmida.

Os valores de RCS e Parâmetro de Thompson obtidos com cura normal em câmara úmida à temperatura ambiente são indicados por Neves (1989) e estão apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente.

Para realização da análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) de propriedade do Núcleo de Processamento de Dados da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande-PB.

Para cada correlação linear simples obtém-se uma equação do tipo :

$$Y = a + b.X, \text{ onde:}$$

Y é a variável dependente;

X é a variável independente;

a é a interseção da reta com o eixo y;

b é a inclinação da reta .

A significância da correlação verifica-se através do coeficiente de correlação (r) e do nível de significância (α).

O coeficiente de correlação (r) expressa o grau de relacionamento entre as duas variáveis (X e Y) através da medida de quão bem os dados amostrais se ajustam a uma reta teórica, chamada reta dos mínimos quadrados.

Se $r=0$ diz-se que não há correlação linear entre as variáveis, para $r=0,25$ a correlação é fraca, para $r=0,5$ a correlação é média, para $r=0,75$ a correlação é forte, e para $r=1$ a correlação linear é perfeita. O nível de significância (α) está diretamente ligado com o número de graus de liberdade (GL), o qual é numericamente igual a: $GL=N - 2$; onde N é o número de pares de dados (X,Y). O nível de significância (α) representa o nível para o qual a correlação entre as variáveis (X,Y) é significativa.

Um resultado é significativo se a probabilidade calculada for menor do que 0,05 e é considerado um resultado altamente significativo se a probabilidade calculada for menor do que 0,01. (Spigel,1970), (Hoel,1981), (Costa,1988).

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos para:

- Resistência à compressão simples, não confinada (RCS) de 10 solos lateríticos, aditivados com 6% de cal, com cura acelerada por tratamento térmico, nas temperaturas de 60°C, 80°C e 100°C e para intervalos de tempo de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas.
- Análise estatística através de correlações lineares simples entre: RCS (cura acelerada) x RCS (cura normal); e RCS (cura acelerada) x Parâmetro de Thompson.

4.2 Resistência à Compressão Simples com Cura Acelerada por Tratamento Térmico

A Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os resultados obtidos para RCS com cura acelerada por tratamento térmico (dos 10 solos lateríticos estudados, aditivados com 6% de cal) para intervalos de tempo de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas, nas temperaturas de 60°C, 80°C e 100°C, respectivamente.

A Tabela 9, apresenta os resultados para RCS dos 10 solos lateríticos estudados, aditivados com 6% de cal, mas sem ser submetido ao tratamento térmico, ou seja, valores de RCS para $t = 0$ hora, como ficou convencionado.

As Figuras 1 a 10 apresentam graficamente, para cada solo estudado, os resultados de RCS com cura acelerada por tratamento térmico.

Será feita uma análise dos resultados para RCS com tratamento térmico, para cada solo estudado. Nesta análise serão destacados, para cada uma das três temperaturas (60°C, 80°C e 100°C) o maior e o menor valor, e a média dos valores obtidos para os quatro intervalos de tempo considerados (1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas). A média será comparada com o resultado obtido para a amostra de solo não submetida

ao tratamento térmico ($t = 0$ hora) para se ter uma idéia do aumento RCS de acordo com o aumento da temperatura.

Além disso será feita uma comparação dos maiores e menores valores absolutos de RCS obtidos com tratamento térmico e os maiores e menores valores absolutos com cura normal apresentados por Neves (1989) para se ter uma idéia da amplitude de valores para os dois tipos de cura.

Amostra JPPB

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 312 kPa ($t = 1$ hora) e 445 kPa ($t=4$ horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 366 kPa. Comparando-se esta média com 208 kPa ($t = 0$ hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 76% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 370 kPa ($t = 1$ hora) e 637 kPa ($t=3$ horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 557 kPa. Comparando-se esta média com 208 kPa ($t=0$ hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 168% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 539 kPa ($t = 1$ hora) e 1187 kPa ($t=3$ horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 934 kPa. Comparando-se esta média com 208 kPa ($t = 0$ hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 349% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves(1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 312 kPa ($T = 60^{\circ}\text{C}$ e $t = 1$ hora) é 34% inferior a 474 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 1187 kPa ($T = 100^{\circ}\text{C}$ e $t = 3$ horas) é 19% superior a 999 kPa (60 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra TEPB

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 225 kPa (t = 1 hora) e 340 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 285 kPa. Comparando-se esta média com 206 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 38% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 209 kPa (t = 1 hora) e 380 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 289 kPa. Comparando-se esta média com 206 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 40% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 219 kPa (t = 1 hora) e 477 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 397 kPa. Comparando-se esta média com 206 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 93% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 209 kPa (T = 80°C e t = 1 hora) é 40% inferior a 348 kPa(07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 477 KPa (T = 100°C e t = 4 horas) é 17% inferior a 575 kPa (28 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra SPPB

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 198 kPa (t = 4 horas) e 211 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 206 kPa. Comparando-se esta média com 177 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 16% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 206 kPa (t = 2 horas) e 231 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 217 kPa. Comparando-se esta média com 177 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 22% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 217 kPa (t = 2 horas) e 354 kPa (t=4 horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 269 kPa. Comparando-se esta média com 177 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 52% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 198 kPa (T = 60°C e t = 4 horas) é 5% inferior a 209 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 354 kPa (T = 100°C e t = 4 horas) é 22% superior a 289 kPa (28 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra ARPB

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 422 kPa (t = 2 horas) e 672 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 546 kPa. Comparando-se esta média com 278 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 96% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 603 kPa (t = 1 hora) e 786 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 694 kPa. Comparando-se esta média com 278 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 150% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 462 kPa (t = 1 hora) e 703 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 624 kPa. Comparando-se esta média com 278 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 124% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 422 kPa (T = 60°C e t = 2 horas) é 42% superior a 296 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 786 kPa (T = 80°C e t = 4 horas) é 102% superior a 388 kPa (28 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra PDMA

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 142 kPa (t = 3 horas) e 158 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 149 kPa. Comparando-se esta média com 150 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 0,7% inferior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 239 kPa (t = 1 hora) e 338 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 305 kPa. Comparando-se esta média com 150 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 103% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 446 kPa (t = 1 hora) e 859 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 630 kPa. Comparando-se esta média com 150 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 320% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 142 kPa (T = 60°C e t = 3 horas) é 57% inferior a 331 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 859 kPa (T = 100°C e t = 4 horas) é 5% superior a 906 kPa (60 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra VGMA

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 227 kPa (t = 1 hora) e 247 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 240 kPa. Comparando-se esta média com 156 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 54% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 317 kPa (t = 1 hora) e 376 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 344 kPa. Comparando-se esta média com 156 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 120% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 381 kPa (t = 1 hora) e 712 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 535 kPa. Comparando-se esta média com 156 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 243% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 227 KPa (T = 60°C e t = 1 hora) é 4% inferior a 237 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 712 kPa (T = 100°C e t = 4 horas) é 98% superior a 359 kPa (28 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra GIPI

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 144 kPa (t = 1 hora) e 232 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 193 kPa. Comparando-se esta média com 112 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 72% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 216 kPa (t = 1 hora) e 467 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 340 kPa. Comparando-se esta média com 112 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 104% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 350 kPa (t = 1 hora) e 735 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 605 kPa. Comparando-se esta média com 112 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 440% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 144 kPa (T = 60°C e t = 1 hora) é 30% inferior a 206 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 735 kPa (T = 100°C e t = 4 horas) é 67% superior a 440 kPa (60 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra PIPI

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 196 kPa (t = 2 horas) e 217 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 202 kPa. Comparando-se esta média com 108 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 87% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 130 kPa (t = 1 hora) e 192 kPa (t=2horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 168 kPa. Comparando-se esta média com 108 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 56% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 210 kPa (t = 4 horas) e 262 kPa (t=2 horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 246 kPa. Comparando-se esta média com 108 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 128% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 130 kPa (T = 80°C e t = 2 horas) é 23% superior a 106 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 262 kPa (T = 100°C e t = 2 horas) é 63% superior a 161 kPa (60 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra BUPI

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 252 kPa (t = 3 horas) e 376 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 307 kPa. Comparando-se esta média com 178 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 72% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 386 kPa (t = 2 horas) e 491 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 442 kPa. Comparando-se esta média com 178 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 148% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 239 kPa (t = 3 horas) e 307 kPa (t=1 hora) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 277 kPa. Comparando-se esta média com 178 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 56% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 239 kPa (T = 100°C e t = 3 horas) é 10% superior a 218 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 491 kPa (T = 80°C e t = 3 horas) é 73% superior a 283 kPa (28 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Amostra CAPI

Na temperatura de 60°C o menor e o maior valores obtidos foram: 338 kPa (t = 1 hora) e 424 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 398 kPa. Comparando-se esta média com 277 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 44% superior.

Na temperatura de 80°C o menor e o maior valores obtidos foram: 362 kPa (t = 1 hora) e 736 kPa (t=3horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 579 kPa. Comparando-se esta média com 277 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 109% superior.

Na temperatura de 100°C o menor e o maior valores obtidos foram: 505 kPa (t = 1 hora) e 604 kPa (t=4horas) respectivamente. A média de valores obtidos foi de 544 kPa. Comparando-se esta média com 277 kPa (t = 0 hora) que é o valor obtido para amostra não submetida ao tratamento térmico, observa-se que a média é 96% superior.

Comparando-se os resultados de RCS obtidos com tratamento térmico, nos três níveis de temperatura, com os dados de RCS com cura normal apresentados por Neves(1989) observa-se que o menor valor absoluto obtido: 338 kPa (T = 60°C e t = 1 hora) é 2% superior a 330 kPa (07 dias) que é o menor valor apresentado para cura normal. E o maior valor absoluto obtido: 736 kPa (T = 80°C e t = 3 horas) é 23% superior a 600 kPa (60 dias) que é o maior valor apresentado para cura normal.

Análise Conjunta dos Resultados

Utilizando-se a média dos resultados de RCS em cada temperatura (para cada solo estudado) como parâmetro para verificar o aumento de RCS em relação às amostras de solo não submetida ao tratamento térmico ($t = 0$ hora) observa-se que todos os solos (com exceção do solo PDMA na temperatura de 60°C) apresentaram acréscimo de RCS. Para o solo PDMA a média dos valores obtidos (149 kPa) é pouco inferior ao valor obtido para $t = 0$ hora, que foi de 150 kPa.

Os maiores valores absolutos de RCS ocorreram, na maioria dos casos, para a temperatura de 100°C (JPPB, TEPB, SPPB, PDMA, VGMA, GIPI, PIPI). Os solos ARPB, BUPI e CAPI apresentaram maiores valores absolutos na temperatura de 80°C .

Os menores valores absolutos de RCS ocorreram, na maioria dos casos, para a temperatura de 60°C (JPPB, SPPB, ARPB, PDMA, VGMA, GIPI, CAPI). Os solos TEPB e PIPI apresentaram menores valores absolutos na temperatura de 80°C , e apenas o solo BUPI apresentou menor valor absoluto na temperatura de 100°C .

Pelas Figuras 1 a 10, observa-se que na maioria dos casos a tendência é o aumento de RCS à medida em que se aumenta o tempo de cura. No entanto, em alguns casos, o aumento do tempo de cura provoca acréscimo e logo depois decréscimo (ou vice-versa) de RCS. É interessante notar, que fato semelhante também ocorre nos valores de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) em que alguns solos apresentam maiores valores para 28 dias do que para 60 dias de cura.

Através da comparação entre os valores de RCS com cura acelerada obtidos neste trabalho e os valores de RCS com cura normal apresentados por Neves (1989) observa-se que na maioria dos casos, os menores valores absolutos de RCS com cura acelerada estão abaixo dos menores valores absolutos de RCS com cura normal (JPPB, TEPB, SPPB, PDMA, VGMA, GIPI) ou pouco superior (BUPI, 9,6% superior e CAPI, 2,6% superior). No entanto o solo ARPB apresentou menor valor de RCS com cura acelerada 42,5% superior ao menor valor apresentado para RCS com cura normal e o solo PIPI, 22% superior.

Observa-se também que os maiores valores absolutos de RCS com cura acelerada são superiores aos maiores valores de RCS com cura normal para todos os solos, com exceção do solo PDMA que apresentou máximo valor de RCS acelerada 5,2% inferior ao máximo valor de RCS com cura normal.

Assim, de uma maneira geral, a amplitude de valores de RCS com cura normal está inserida na amplitude de valores de RCS com cura acelerada. Resumindo-se, pode-se dizer que o tratamento térmico em

banho-maria, aumentou a RCS dos solos lateríticos estudados, a medida em que se aumentou a temperatura e o tempo de cura.

Provavelmente, este aumento de RCS através de tratamento térmico, deve-se ao aumento da velocidade de reação puzolânica, uma vez que optou-se por tratamento térmico em banho-maria, com amostras envolvidas em sacos plásticos, para se evitar (ou diminuir) o ganho de RCS através do ressecamento/endurecimento da amostra, como foi observado no trabalho de Queiroz de Carvalho (1984). Porém, neste trabalho não foi verificado quantitativamente, quem colaborou com maior parcela para o aumento de RCS.

4.3 Análise Estatística

Os resultados obtidos pelas análises estatísticas através de correlações lineares simples, entre:

- RCS(cura acelerada) e RCS(cura normal);
- RCS(cura acelerada) e Parâmetro de Thompson;

estão apresentados nas Tabelas 10 a 15, em termos de: r , α , a , b e GL , onde:

r - Coeficiente de correlação

α - Nível de significância

a - Intercessão da reta com o eixo dos Y

b - Inclinação da reta

GL - Graus de Liberdade

Y - Variável dependente

X - Variável independente.

Cada correlação linear simples foi realizada com 10 pares de dados (10 solos lateríticos) gerando uma equação do tipo:

$Y = a + b.X$, onde a variável independente (X) é a RCS (cura acelerada) e a variável dependente (Y), no primeiro caso, é a RCS (cura normal) e no segundo caso é o parâmetro de Thompson.

A seguir serão discutidos os resultados obtidos para cada caso.

4.3.1 Correlações Lineares Simples entre RCS (cura acelerada) e RCS (cura normal).

Para cada nível de temperatura utilizada no tratamento térmico (60°C, 80°C e 100°C) e para cada intervalo de tempo de cura utilizado (1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas) foi realizada correlação linear simples com os valores de RCS (cura normal) a 7 dias, 28 dias e 60 dias, indicados por Neves (1989), gerando um total de 36 correlações lineares simples.

A Tabela 10 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 60°C (t=1 hora, t=2 horas, t=3 horas, e t=4 horas) e RCS(cura normal) a 7 dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas nenhuma apresentou nível de significância (α) menor ou igual a 5%, ou seja, nenhuma correlação foi significativa.

A Tabela 11 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 80°C (t=1 hora, t=2 horas, t=3 horas e t=4 horas) e RCS(cura normal) a 7 dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas, apenas uma apresentou nível de significância menor que 5%, ou seja, apenas uma é significativa, apresentando também um coeficiente de correlação entre médio e forte ($0,50 < r < 0,75$).

A equação desta correlação significativa será apresentada a seguir.

$$Y = 131,32 + 0,38 X$$

$$r = 0,64$$

$$\alpha = 4,85\%$$

onde:

Y - RCS cura normal a 7 dias;

X - RCS cura acelerada, para T=80°C. e t=2 horas.

Observa-se também, que de uma maneira geral, os coeficientes de correlação linear obtidos para a temperatura de 80°C são superiores aos coeficientes de correlação linear obtidos para a temperatura de 60°C.

A Tabela 12 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 100°C (t=1 hora, t=2 horas, t=3 horas e t=4 horas) e RCS (cura normal) a 7 dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas, seis foram significativas, ou seja, apresentaram nível de significância (α) menor que 5%, e cinco foram altamente significativas, isto é, apresentaram nível de

significância (α) menor que 1%. Apenas a correlação entre RCS acelerada (t=1 hora) e RCS normal (28 dias) não foi significativa. Dentre as 11 correlações significativas e altamente significativas, observa-se que três apresentaram coeficiente de correlação linear entre médio e forte ($0,50 < r < 0,75$) e oito apresentaram forte correlação linear ($0,75 < r < 1,00$).

As equações das correlações lineares significativas e altamente significativas, serão apresentadas a seguir.

Equações Significativas

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 1 hora.

$$Y = 60,61 + 0,58 X$$

$$r = 0,65$$

$$\alpha = 4,00\%$$

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = 128,57 + 0,27 X$$

$$r = 0,75$$

$$\alpha = 1,25\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 2 horas.

$$Y = -6,70 + 0,91 X$$

$$r = 0,72$$

$$\alpha = 1,77\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = 117,91 + 0,60 X$$

$$r = 0,67$$

$$\alpha = 3,30\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 1 hora.

$$Y = -156,50 + 1,70 X$$

$$r = 0,69$$

$$\alpha = 2,60\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = 70,12 + 0,74 X$$

$$r = 0,74$$

$$\alpha = 1,34\%$$

Equações Altamente Significativas

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 2 horas.

$$Y = 81,70 + 0,39 X$$

$$r = 0,77$$

$$\alpha = 0,87\%$$

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = 106,39 + 0,28 X$$

$$r = 0,77$$

$$\alpha = 0,85\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = 25,96 + 0,69 X$$

$$r = 0,77$$

$$\alpha = 0,88\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 1 hora.

$$Y = 25,96 + 0,69 X$$

$$r = 0,77$$

$$\alpha = 0,88\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = -29,42 + 0,83 X$$

$$r = 0,83$$

$$\alpha = 0,27\%$$

Em resumo, observa-se que:

- Para a temperatura de 60°C, de um total de 12 correlações lineares simples, nenhuma foi significativa.
- Para a temperatura de 80°C, de um total de 12 correlações lineares simples, apenas uma foi significativa.
- Para a temperatura de 100°C, de um total de 12 correlações lineares simples, seis foram significativas e cinco altamente significativas.

Observa-se uma tendência para o aumento do coeficiente de correlação linear entre RCS (cura acelerada) e RCS (cura normal) a medida em que se aumenta a temperatura.

Portanto, das três temperaturas estudadas, a que apresenta melhores correlações lineares simples entre RCS (cura acelerada) e RCS (cura normal) é a temperatura de 100°C. Sendo que, para esta temperatura, o tempo de cura que apresentou melhores resultados foi t=4 horas, pois as correlações entre RCS (T=100°C, t=4 horas) e RCS (cura normal) a 7 dias, 28 dias e 60 dias foram todas altamente significativas, com forte correlação linear.

4.3.2 Correlações Lineares Simples entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson.

Para cada nível de temperatura utilizada no tratamento térmico (60°C, 80°C e 100°C) e para cada intervalo de tempo de cura utilizado (1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas) foi realizada correlação linear simples com os valores de Parâmetro de Thompson a 7 dias, 28 dias e 60 dias, indicados por Neves (1989) gerando um total de 36 correlações lineares simples.

A Tabela 13 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 60°C (t=1 hora, t=2horas, t=3 horas, e t=4 horas) e o Parâmetro de Thompson a 7dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas nenhuma apresentou nível de significância (α) menor ou igual a 5%, ou seja, nenhuma correlação foi significativa.

A Tabela 14 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 80°C (t=1 hora, t=2horas, t=3 horas e t=4 horas) e o Parâmetro de Thompson a 7dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas nenhuma apresentou nível de significância (α) menor ou igual a 5%, ou seja, nenhuma correlação foi significativa.

Observa-se também, que de uma maneira geral, os coeficientes de correlação linear obtidos para a temperatura de 80°C são superiores aos coeficientes de correlação linear obtidos para a temperatura de 60°C.

A Tabela 15 mostra as correlações entre RCS (cura acelerada) na temperatura de 100°C (t=1 hora, t=2horas, t=3 horas e t=4 horas) e o Parâmetro de Thompson a 7dias, 28 dias e 60 dias.

Observa-se que das 12 correlações realizadas, cinco foram significativas, ou seja, apresentaram nível de significância (α) menor que 5%, e cinco foram altamente significativas, isto é, apresentaram nível de significância (α) menor que 1%. Apenas duas correlações não foram significativas: a correlação entre RCS acelerada (t=1 hora) e RCS normal (7 dias) e a correlação entre RCS acelerada (t=1 hora) e RCS normal (28 dias).

Dentre as 10 correlações significativas e altamente significativas, observa-se que: cinco apresentaram coeficiente de correlação linear entre médio e forte ($0,50 < r < 0,75$) e cinco apresentaram forte correlação linear ($0,75 < r < 1,00$).

As equações das correlações lineares significativas e altamente significativas, serão apresentadas a seguir.

Equações Significativas

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 2 horas.

$$Y = 11,43 + 0,24 X$$

$$r = 0,66$$

$$\alpha = 3,61\%$$

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = 23,25 + 0,18 X$$

$$r = 0,69$$

$$\alpha = 2,79\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 2 horas.

$$Y = -76,50 + 0,76 X$$

$$r = 0,72$$

$$\alpha = 1,87\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = 9,46 + 0,54 X$$

$$r = 0,71$$

$$\alpha = 2,05\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t=1 hora.

$$Y = -218,70 + 1,48 X$$

$$r = 0,68$$

$$\alpha = 3,02\%$$

Equações Altamente Significativas

Y - RCS cura normal a 7 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = 19,80 + 0,20 X$$

$$r = 0,79$$

$$\alpha = 0,65\%$$

Y - RCS cura normal a 28 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = -56,86 + 0,59 X$$

$$r = 0,78$$

$$\alpha = 0,72\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 2 horas.

$$Y = -150,75 + 0,96 X$$

$$r = 0,78$$

$$\alpha = 0,75\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - RCS cura acelerada, para T=100°C e t= 3 horas.

$$Y = -38,88 + 0,67 X$$

$$r = 0,77$$

$$\alpha = 0,96\%$$

Y - RCS cura normal a 60 dias

X - Parâmetro de Thompson, para T=100°C e t= 4 horas.

$$Y = -113,02 + 0,73 X$$

$$r = 0,83$$

$$\alpha = 0,32\%$$

Em resumo, observa-se que:

- Para a temperatura de 60°C, de um total de 12 correlações lineares simples, nenhuma foi significativa.
- Para a temperatura de 80°C, de um total de 12 correlações lineares simples, nenhuma foi significativa.
- Para a temperatura de 100°C, de um total de 12 correlações lineares simples, cinco foram significativas e cinco altamente significativas.

Observa-se uma tendência para o aumento do coeficiente de correlação linear entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson à medida em que se aumenta a temperatura.

Portanto, das três temperaturas estudadas a que apresenta melhores correlações lineares simples, entre RCS (cura acelerada) e o Parâmetro de Thompson é a temperatura de 100°C.

Para a temperatura de 100°C e para a correlação entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson a 7 dias, o melhor tempo de cura é $t=3$ horas, pois a correlação é altamente significativa, com forte correlação linear.

Para a temperatura de 100°C e para as correlações entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson a 28 dias e 60 dias, o melhor tempo de cura é $t=4$ horas, pois as correlações são altamente significativas, com forte correlação linear.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Introdução

Foram estudados no decorrer deste trabalho dez (10) solos lateríticos provenientes da região Nordeste do Brasil, aditivados com 6% de cal e posteriormente submetidos a tratamento térmico em banho-maria nas temperaturas de 60°C, 80°C e 100°C, e por períodos de cura de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas; com a finalidade de desenvolver uma sistemática de laboratório que auxiliasse na previsão da reatividade de solos lateríticos à cal, e na pré-seleção de solos lateríticos mais adequados à estabilização com cal, utilizando para isso, equipamentos facilmente encontrados em laboratórios usuais de mecânica dos solos.

5.2 Tratamento Térmico

O tratamento térmico aumentou a resistência à compressão simples dos solos lateríticos estudados, a medida em que se aumentou a temperatura e o tempo de cura.

Provavelmente, este aumento de RCS, deve-se ao aumento da velocidade da reação pozolânica, uma vez que evitou-se o tratamento térmico por via seca, em estufa, optando-se por tratamento térmico em banho-maria, com amostras de solo envolvidas em sacos plásticos, para se evitar (ou diminuir) o ganho de resistência através do ressecamento/endurecimento das amostras de solo. No entanto, neste trabalho não foi verificado quantitativamente, quem colaborou com maior parcela para o aumento da RCS.

5.3 Análise Estatística

a) RCS (cura acelerada) X RCS (cura normal)

Na temperatura de 60°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, nenhuma foi significativa.

Na temperatura de 80°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, apenas uma foi significativa ($\alpha = 5\%$).

Na temperatura de 100°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, 6 foram significativas ($\alpha=5\%$) e cinco foram altamente significativas ($\alpha = 1\%$).

Observa-se uma tendência para o aumento do coeficiente de correlação linear (r) à medida em que se aumenta a temperatura.

Para as três temperaturas estudadas, a que apresenta melhores resultados de correlação linear simples é a temperatura de 100°C. Nesta temperatura, o melhor tempo de cura observado foi $t = 4$ horas, pois as correlações entre RCS ($T=100^\circ\text{C}$, $t=4$ horas) e RCS (cura normal) a 7, 28 e 60 dias foram todas altamente significativas ($\alpha = 1\%$), com forte correlação linear ($0,75 < r < 1,00$).

b) RCS (cura acelerada) x Parâmetro de Thompson

Na temperatura de 60°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, nenhuma foi significativa.

Na temperatura de 80°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, nenhuma foi significativa.

Na temperatura de 100°C, das 12 correlações lineares simples realizadas, cinco foram significativas ($\alpha= 5\%$) e cinco foram altamente significativas ($\alpha = 1\%$).

Observa-se uma tendência para o aumento do coeficiente de correlação linear (r) a medida em que se aumenta a temperatura.

Para as três temperaturas estudadas, a que apresenta melhores resultados de correlação linear simples é a temperatura de 100°C. Nesta temperatura, para a correlação entre RCS (cura acelerada) e o Parâmetro de Thompson a 7 dias, o melhor tempo de cura é $t= 3$ horas, pois a correlação é altamente significativa ($\alpha= 1\%$), com forte correlação linear ($0,75 < r < 1,00$). Também, para a temperatura de 100°C, e para as correlações entre RCS (cura acelerada) e Parâmetro de Thompson a 28 e 60 dias, o melhor tempo de cura é $t=4$ horas, pois as correlações são altamente significativas ($\alpha = 1\%$), com forte correlação linear ($0,75 < r < 1,00$).

5.4 Conclusão Final

Concluindo, pode-se verificar que a RCS (cura acelerada) na temperatura de 100°C e tempo de cura igual a 4 horas é altamente correlacionada com a RCS (cura normal) a 7, 28, e 60 dias. E que a RCS (cura acelerada) na temperatura de 100°C e tempo de cura igual a 3 horas é altamente correlacionada com o

Parâmetro de Thompson a 7 dias; e no tempo de cura igual a 4 horas é altamente correlacionada com o Parâmetro de Thompson a 28 e 60 dias.

Desta forma, fica evidenciado que esta nova sistemática de laboratório (utilizada para a temperatura de 100°C e tempos de cura iguais a 3 e 4 horas) serve como dado auxiliar na previsão da reatividade de solos lateríticos à cal, e na pré-seleção de solos lateríticos mais adequados à estabilização com cal.

Deve-se salientar que os equipamentos utilizados neste trabalho são facilmente encontrados nos laboratórios usuais de mecânica dos solos.

Sugestões para Pesquisas Posteriores

Considerando o caráter preliminar desta pesquisa e suas limitações, há necessidade do desenvolvimento de pesquisas com o intuito de esclarecer tópicos pouco detalhados, pelo fato de fugirem ao escopo deste trabalho, podendo-se, dentre outros, enumerar os seguintes:

- 1) Prosseguir o estudo da cura acelerada por tratamento térmico para temperaturas menores que 60°C e maiores que 100°C e também para intervalos de tempo de cura menores que 1 hora e maiores que 4 horas.
- 2) Desenvolver estudos que possibilitem verificar qualitativamente e quantitativamente, o ganho de resistência à compressão simples através de tratamento térmico em banho-maria.
- 3) Desenvolver estudos similares ao presente nesta pesquisa, para outros solos lateríticos, objetivando generalizações mais significativas.
- 4) Prosseguir o estudo da cura acelerada por tratamento térmico, aplicada a solos lateríticos estabilizado com outros tipos de aditivo.

Tabelas

Composição	Teor (%)
CaO	56,00
MgO	11,45
SiO ₂	0,88
Al ₂ O ₃	0,91
Fe ₂ O ₃	0,09
Perda ao Fogo	29,97
Na ₂ O	0,67
K ₂ O	0,10

Tabela 1 - Composição Química da Cal Hidratada Utilizada no Processo de Estabilização dos Solos Lateríticos.

Jazida / Estado	Identificação
João Pessoa - PB	JPPB
Teixeira - PB	TEPB
Sapé - PB	SPPB
Areia - PB	ARPB
Presidente Dutra - MA	PDMA
Vargem Grande - MA	VGMA
Gilbués - PI	GIPI
Picos - PI	PIPI
Buriti dos Lopes - PI	BUPI
Castelo - PI	CAPI

Tabela 2 - Identificações Utilizadas para as Jazidas Seleccionadas.

Parâmetros de Compactação dos Solos Estabilizados com 6% de Cal		
Identificação	γ_s máx (kg/m ³)	hót (%)
JPPB	1780	19,5
TEPB	1620	21,8
SPPB	1682	21,4
ARPB	1661	20,4
PDMA	1803	17,6
VGMA	1927	14,6
GIPI	1702	19,0
PIPI	2020	11,2
BUPI	1930	13,3
CAPI	1773	17,5

Tabela 3 - Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal (Neves, 1989).

Resistência à Compressão Simples com Cura Normal (kPa)			
Identificação	7 dias	28 dias	60 dias
JPPB	474	911	999
TEPB	348	575	465
SPPB	209	289	288
ARPB	296	388	349
PDMA	331	806	906
VGMA	237	359	288
GIPI	206	230	440
PIPI	106	114	161
BUPI	218	283	239
CAPI	330	520	600

Tabela 4 - Resistência à Compressão Simples Não Confinada dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com Cura Normal em Câmara Úmida por períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias (Neves, 1989).

Parâmetro de Thompson (kPa)			
Identificação	PT 7 dias	PT 28 dias	PT 60 dias
JPPB	316	753	841
TEPB	143	370	260
SPPB	147	228	226
ARPB	140	232	193
PDMA	95	570	671
VGMA	98	220	149
GIPI	103	127	336
PIPI	59	67	114
BUPI	58	123	78
CAPI	162	352	432

Tabela 5 - Parâmetro de Thompson dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com Cura Normal em Câmara Úmida por períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias (Neves, 1989).

Resistência à Compressão Simples com Cura Acelerada (kPa)				T= 60°C
Identificação	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h
JPPB	312	351	358	445
TEPB	225	253	321	340
SPPB	203	210	211	198
ARPB	546	422	543	672
PDMA	150	144	142	158
VGMA	227	238	247	247
GIPI	144	185	210	232
PIPI	197	196	196	217
BUPI	303	298	252	376
CAPI	338	420	424	412

Tabela 6 - Resistência à Compressão Simples Não Confinada dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com 1 dia de Pré-Cura em Câmara Úmida e após Tratamento Térmico em Banho-Maria (Cura Acelerada) na Temperatura de 60°C, por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas.

Resistência à Compressão Simples com Cura Acelerada (kPa) T=80°C				
Identificação	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h
JPPB	370	601	637	619
TEPB	209	244	324	380
SPPB	214	206	231	216
ARPB	603	650	737	786
PDMA	239	321	323	338
VGMA	317	317	376	368
GIPI	216	281	394	467
PIPI	130	192	180	172
BUPI	402	386	491	490
CAPI	362	568	736	650

Tabela 7 - Resistência à Compressão Simples Não Confinada dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com 1 dia de Pré-Cura em Câmara Úmida e após Tratamento Térmico em Banho-Maria (Cura Acelerada) na Temperatura de 80°C, por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas.

Resistência à Compressão Simples com Cura Normal (kPa) T=100°C				
Identificação	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h
JPPB	539	862	1187	1146
TEPB	219	462	429	477
SPPB	239	217	265	354
ARPB	462	630	703	701
PDMA	446	630	587	859
VGMA	381	487	560	712
GIPI	350	629	705	735
PIPI	253	262	261	210
BUPI	307	274	239	289
CAPI	505	535	531	604

Tabela 8 - Resistência à Compressão Simples Não Confinada dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com 1 dia de Pré-Cura em Câmara Úmida e após Tratamento Térmico em Banho-Maria (Cura Acelerada) na Temperatura de 100°C, por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas.

Identificação	Resistência à Compressão Simples para Amostras não Submetidas ao Tratamento Térmico (kPa)
JPPB	208
TEPB	206
SPPB	177
ARPB	278
PDMA	150
VGMA	156
GIPI	112
PIPI	108
BUPI	178
CAPI	277

Tabela 9 - Resistência à Compressão Simples Não Confinada dos Solos Lateríticos Estabilizados com 6% de Cal, com 1 dia de Pré-Cura em Câmara Úmida, mas Não Submetidos ao Tratamento Térmico em Banho-Maria (t=0 hora).

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T60,t1)	RCS 7	0,30	39,49	206,69	0,26
RCS(T60,t2)	RCS 7	0,46	18,37	145,93	0,48
RCS(T60,t3)	RCS 7	0,45	19,10	166,00	0,38
RCS(T60,t4)	RCS 7	0,43	21,80	182,47	0,28
RCS(T60,t1)	RCS 28	0,073	84,11	406,02	0,16
RCS(T60,t2)	RCS 28	0,19	59,78	312,49	0,50
RCS(T60,t3)	RCS 28	0,17	63,38	342,78	0,36
RCS(T60,t4)	RCS 28	0,16	65,13	358,40	0,27
RCS(T60,t1)	RCS 60	0,051	88,80	505,71	- 0,12
RCS(T60,t2)	RCS 60	0,099	78,48	395,71	0,29
RCS(T60,t3)	RCS 60	0,066	85,60	429,12	0,15
RCS(T60,t4)	RCS 60	0,054	88,10	440,68	0,10

Tabela 10 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 60°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e RCS (Cura Normal) por Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T80,t1)	RCS 7	0,38	28,00	188,26	0,28
RCS(T80,t2)	RCS 7	0,64	4,85	131,32	0,38
RCS(T80,t3)	RCS 7	0,58	7,81	144,37	0,30
RCS(T80,t4)	RCS 7	0,57	8,30	140,20	0,30
RCS(T80,t1)	RCS 28	0,18	62,17	344,79	0,34
RCS(T80,t2)	RCS 28	0,46	18,44	188,18	0,69
RCS(T80,t3)	RCS 28	0,36	30,82	244,92	0,46
RCS(T80,t4)	RCS 28	0,34	34,06	248,60	0,44
RCS(T80,t1)	RCS 60	0,076	83,55	425,39	0,16
RCS(T80,t2)	RCS 60	0,43	21,09	201,57	0,72
RCS(T80,t3)	RCS 60	0,34	32,86	258,23	0,49
RCS(T80,t4)	RCS 60	0,32	36,08	262,14	0,47

Tabela 11 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 80°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e RCS (Cura Normal) por Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T100,t1)	RCS 7	0,65	4,02	60,61	0,58
RCS(T100,t2)	RCS 7	0,77	0,87	81,70	0,39
RCS(T100,t3)	RCS 7	0,75	1,25	128,94	0,27
RCS(T100,t4)	RCS 7	0,77	0,85	106,39	0,28
RCS(T100,t1)	RCS 28	0,62	5,55	- 62,34	1,38
RCS(T100,t2)	RCS 28	0,72	1,77	- 6,70	0,91
RCS(T100,t3)	RCS 28	0,67	3,30	117,91	0,60
RCS(T100,t4)	RCS 28	0,77	0,88	25,96	0,69
RCS(T100,t1)	RCS 60	0,69	2,60	- 156,50	1,70
RCS(T100,t2)	RCS 60	0,80	0,55	- 80,07	1,11
RCS(T100,t3)	RCS 60	0,74	1,34	70,71	0,74
RCS(T100,t4)	RCS 60	0,83	0,27	- 29,42	0,83

Tabela 12 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 100°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e RCS (Cura Normal) por Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T60,t1)	PT 7	0,29	41,76	84,48	0,18
RCS(T60,t2)	PT 7	0,48	16,43	34,39	0,36
RCS(T60,t3)	PT 7	0,45	19,16	52,82	0,27
RCS(T60,t4)	PT 7	0,40	25,05	68,79	0,19
RCS(T60,t1)	PT 28	0,042	90,80	284,04	0,08
RCS(T60,t2)	PT 28	0,17	63,38	201,23	0,38
RCS(T60,t3)	PT 28	0,14	68,90	229,86	0,26
RCS(T60,t4)	PT 28	0,13	72,26	245,02	0,18
RCS(T60,t1)	PT 60	0,096	79,20	383,47	-0,20
RCS(T60,t2)	PT 60	0,066	85,67	284,28	0,17
RCS(T60,t3)	PT 60	0,024	94,82	315,90	0,05
RCS(T60,t4)	PT 60	0,054	98,81	327,09	0,09

Tabela 13 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 60°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e Parâmetro de Thompson para Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T80,t1)	PT 7	0,26	46,23	88,18	0,14
RCS(T80,t2)	PT 7	0,57	8,25	37,59	0,25
RCS(T80,t3)	PT 7	0,50	14,58	51,14	0,18
RCS(T80,t4)	PT 7	0,46	18,31	53,78	0,17
RCS(T80,t1)	PT 28	0,12	73,69	244,97	0,19
RCS(T80,t2)	PT 28	0,44	20,60	94,80	0,56
RCS(T80,t3)	PT 28	0,32	36,76	152,05	0,34
RCS(T80,t4)	PT 28	0,28	42,52	162,58	0,32
RCS(T80,t1)	PT 60	0,008	98,19	325,34	0,02
RCS(T80,t2)	PT 60	0,40	25,32	107,69	0,59
RCS(T80,t3)	PT 60	0,30	40,30	165,05	0,37
RCS(T80,t4)	PT 60	0,27	45,70	175,84	0,34

Tabela 14 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 80°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e Parâmetro de Thompson para Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Correlação Linear Simples : $Y = a + bX$					
Variável X	Variável Y	r	α (%)	a	b
RCS(T100,t1)	PT 7	0,56	9,31	-0,99	0,36
RCS(T100,t2)	PT 7	0,66	3,61	11,43	0,24
RCS(T100,t3)	PT 7	0,79	0,65	19,80	0,20
RCS(T100,t4)	PT 7	0,69	2,79	23,25	0,18
RCS(T100,t1)	PT 28	0,62	5,72	-123,43	1,16
RCS(T100,t2)	PT 28	0,72	1,87	-76,50	0,76
RCS(T100,t3)	PT 28	0,71	2,05	9,46	0,54
RCS(T100,t4)	PT 28	0,78	0,72	-56,86	0,78
RCS(T100,t1)	PT 60	0,68	3,02	-218,70	1,48
RCS(T100,t2)	PT 60	0,78	0,75	-150,75	0,96
RCS(T100,t3)	PT 60	0,77	0,96	-38,88	0,67
RCS(T100,t4)	PT 60	0,83	0,32	-113,03	0,73

Tabela 15 - Correlações Lineares Simples entre RCS (Cura Acelerada) na Temperatura de 100°C por Períodos de 1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas e Parâmetro de Thompson para Períodos de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Graus de Liberdade (GL) = 8 para todas as correlações.

Figuras

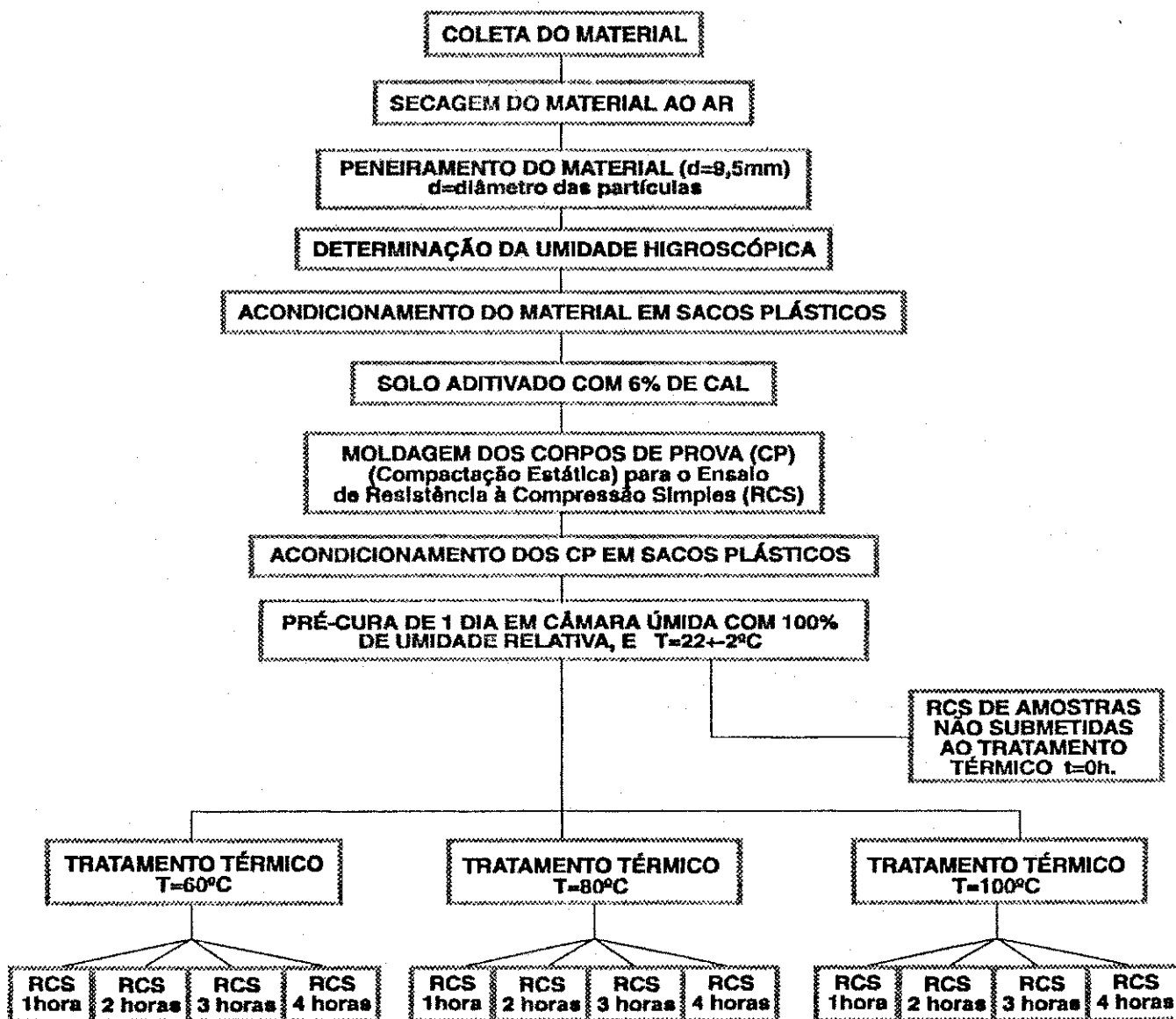


Figura 1A

Fluxograma do Processo de Determinação de RCS de Solos Lateríticos, aditivados com cal, e submetidos a tratamento térmico em banho-maria.

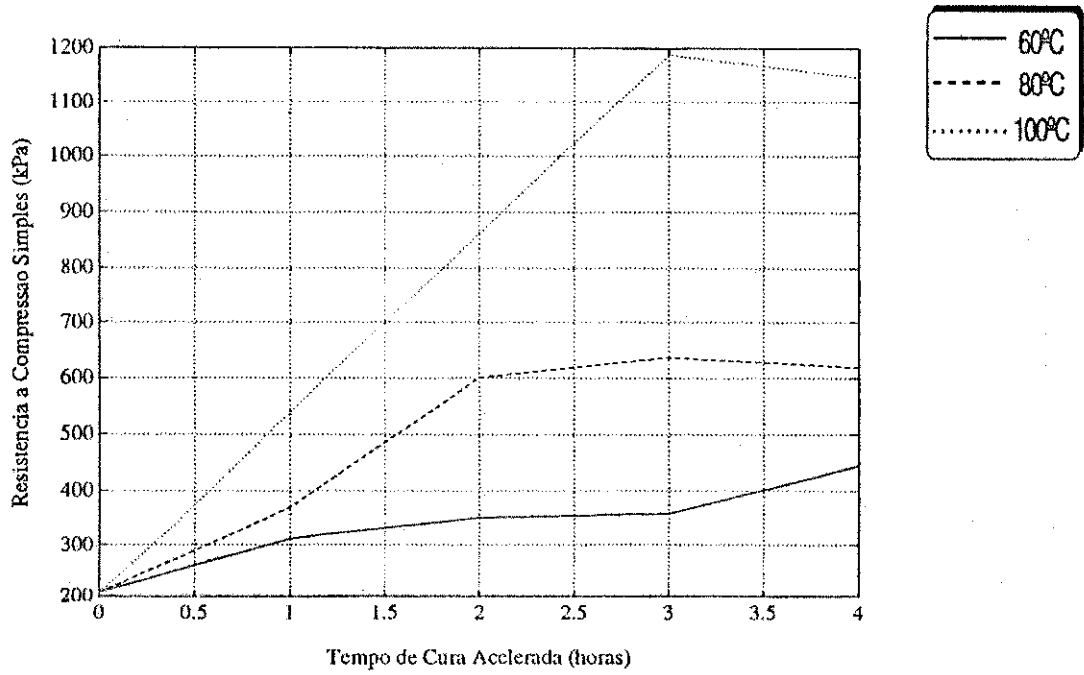


Figura 1 - Solo: JPPB

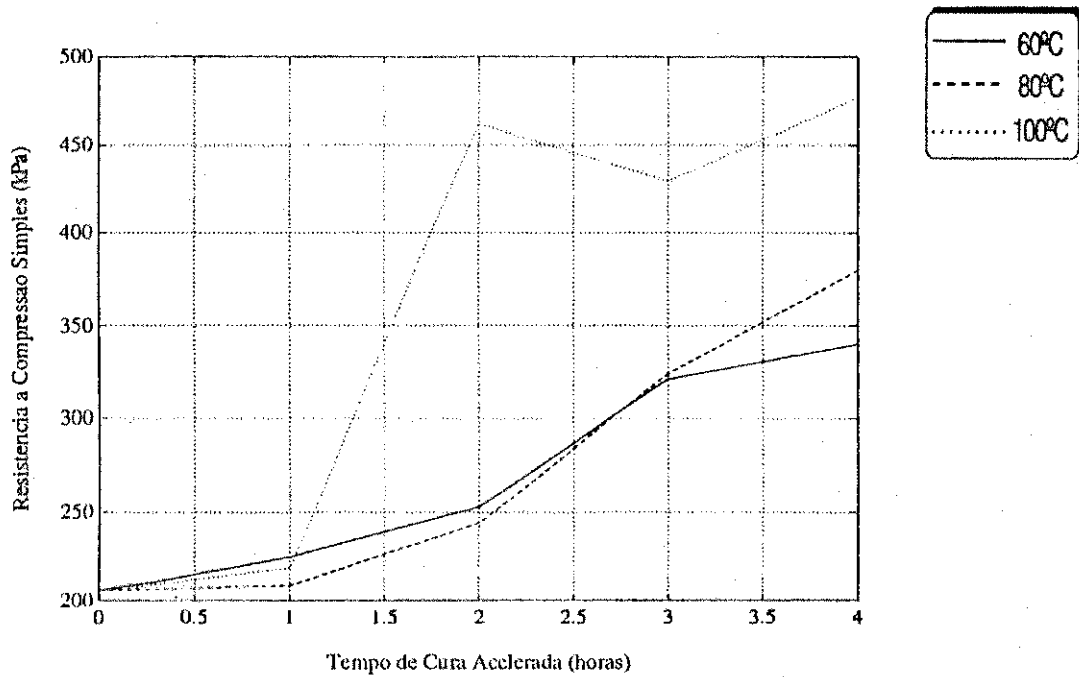


Figura 2 - Solo: TEPB

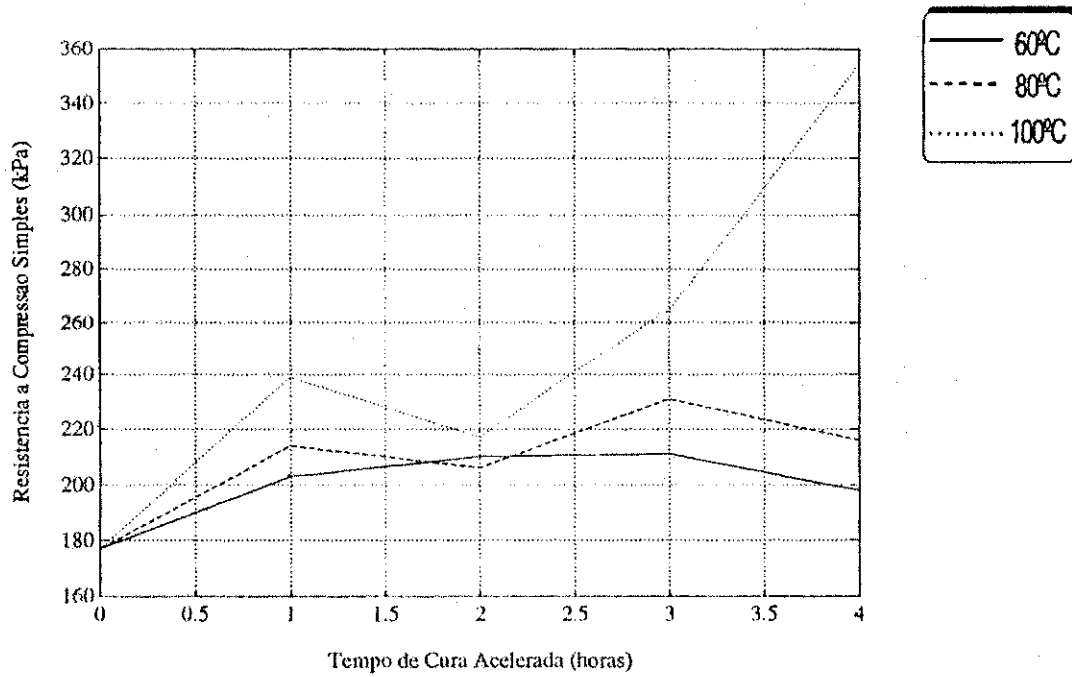


Figura 3 - Solo: SPPB

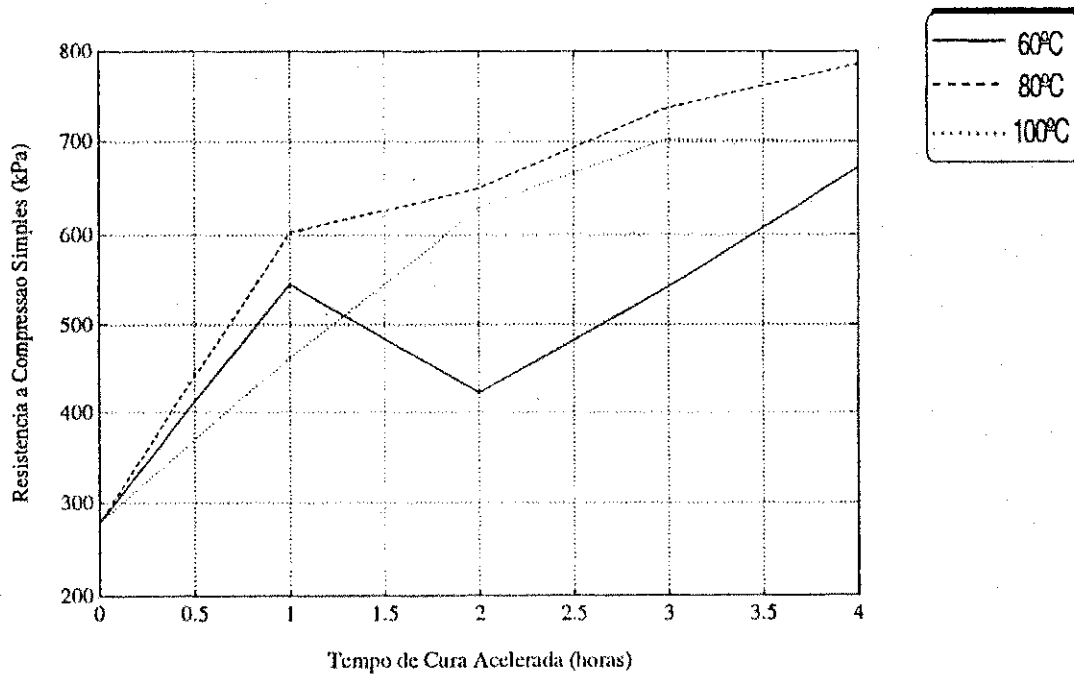


Figura 4 - Solo: ARPB

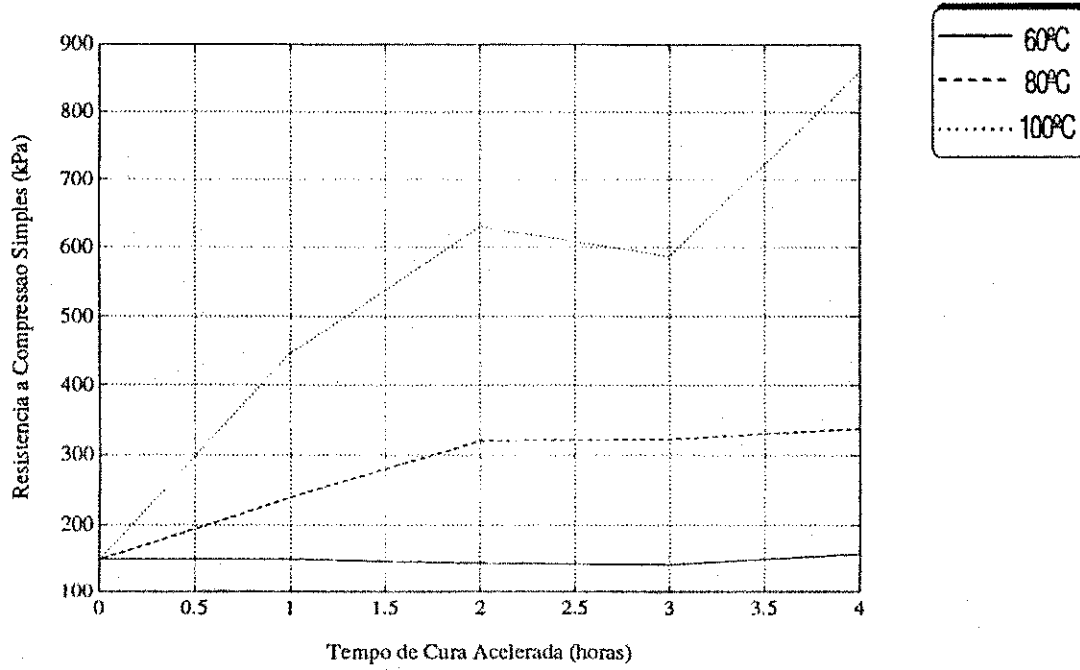


Figura 5 - Solo: PDMA

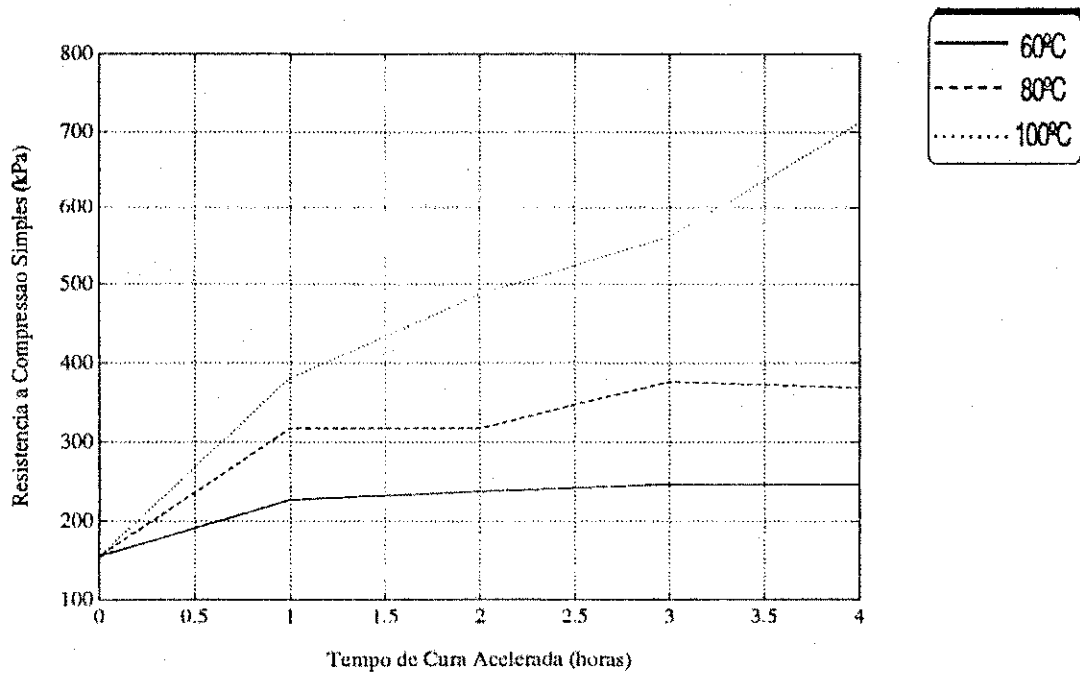


Figura 6 - Solo: VGMA

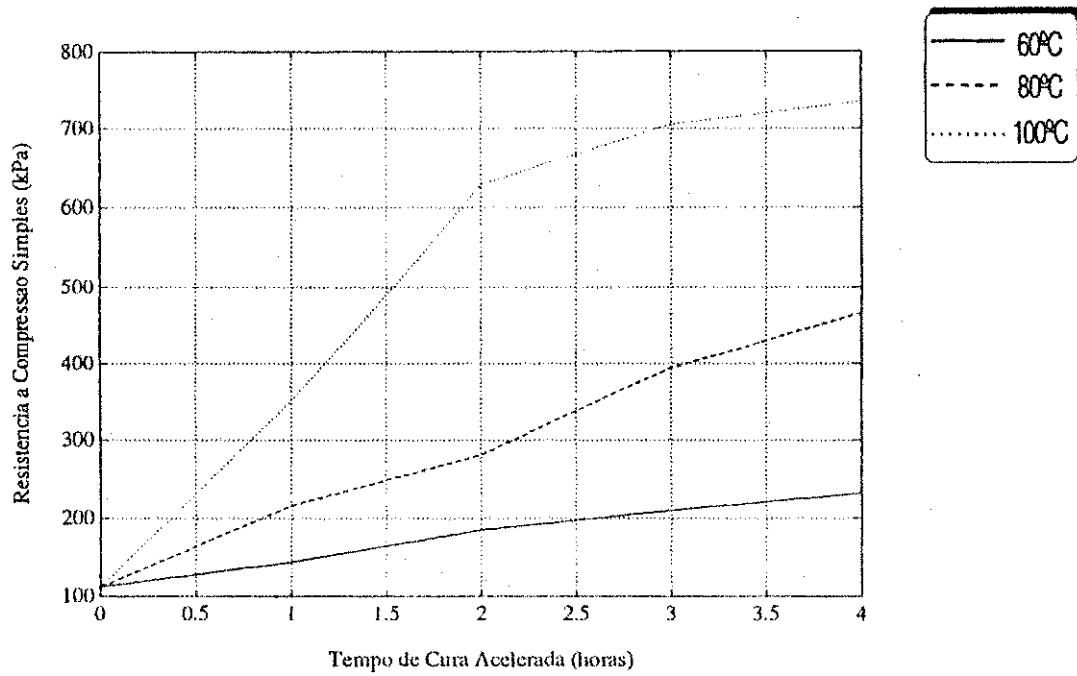


Figura 7 - Solo: GIPI

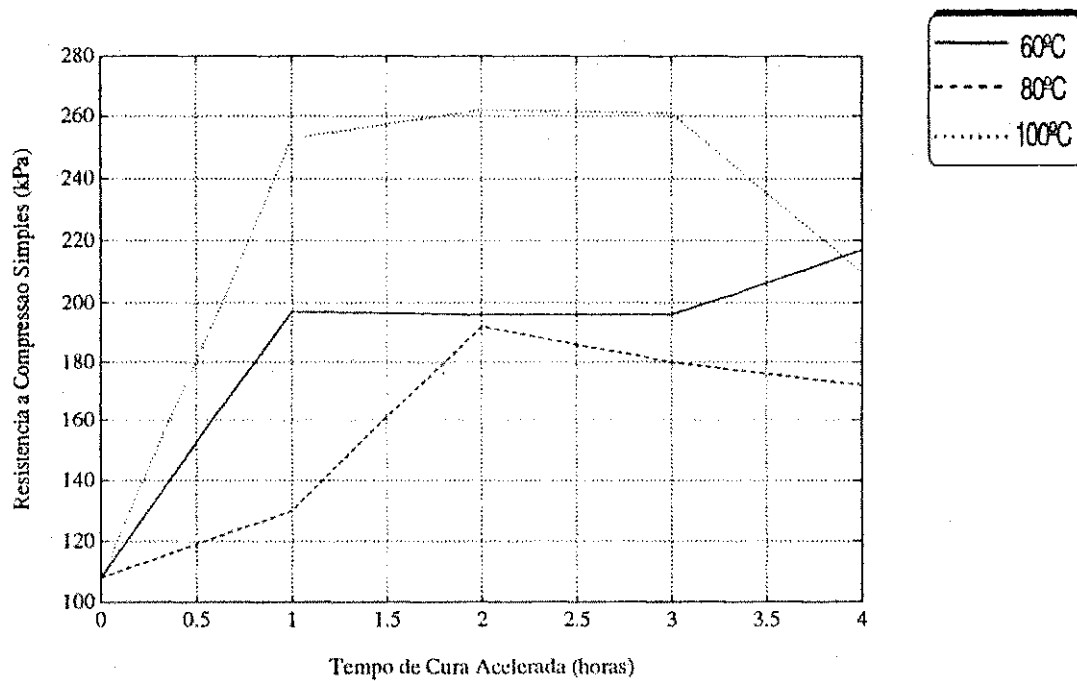


Figura 8 - Solo: PIPI

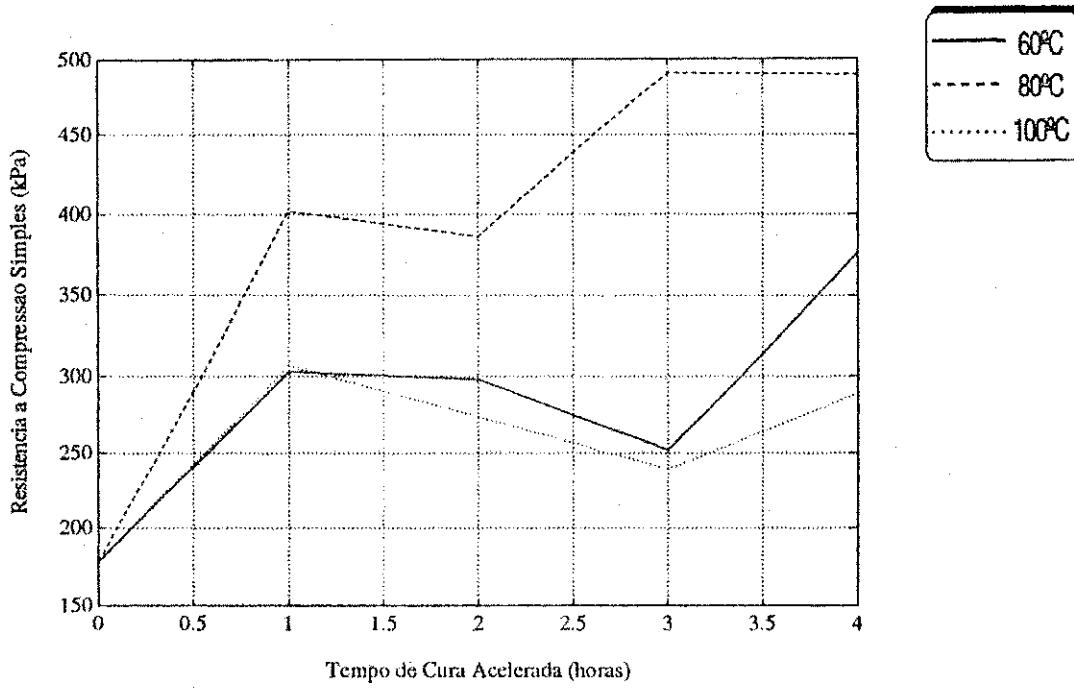


Figura 9 - Solo: BUPI

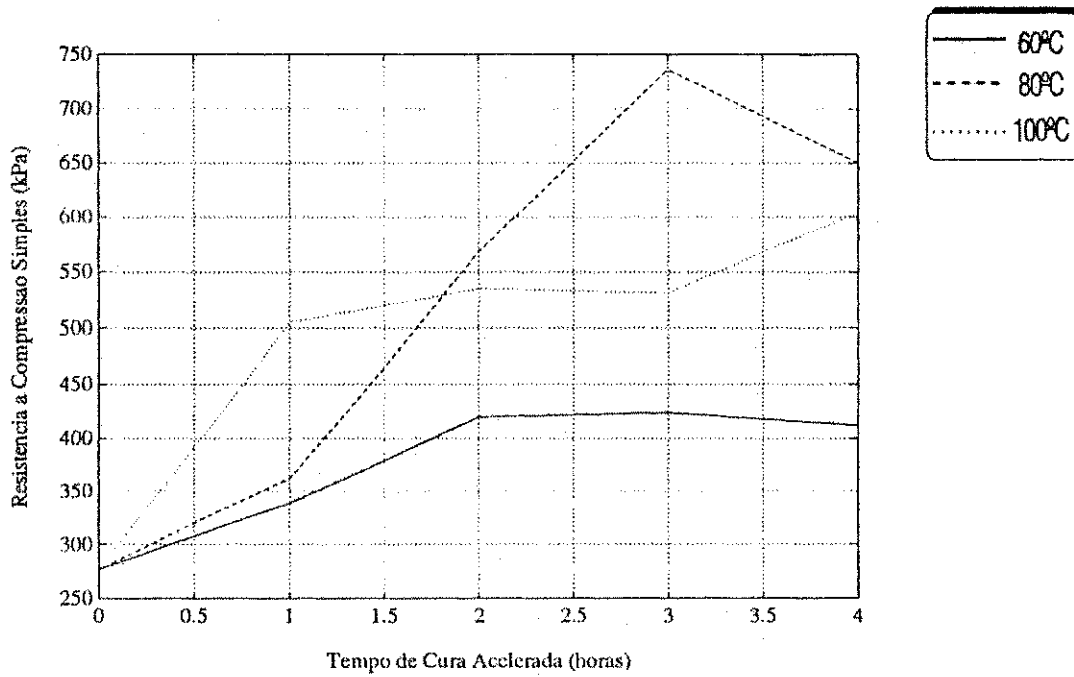


Figura 10 - Solo: CAPI

Referências Bibliográficas

- ABNT, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Ensaio de Caracterização da Cal, MB-342, 1977.
- AFLITOS, A.O., *A Influência de Aditivos Químicos em Propriedades Seleccionadas e de Engenharia de Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil*, Dissertação de Mestrado, CCT/UFPB, Campina Grande, Paraíba, 1981.
- BIRRELL, K.S., *Some Physical Properties of New Zealand Volcanic Ash Soils*, Proc. 15th Aust. N.Z. Conference S.M.F.E., pp. 30-34, Melbourne, 1952.
- BISZEWSKI, E., *The Effect of Mixing Time on the Strength of Clay Gravel Stabilised with Hidrated Lime*, Proc. 3rd Regional Africa Conference Mech. Found. Engeneering, Salisburg, Vol.1, pp. 63-67, 1983.
- BORBA, S.M.C., *Estudo das Propriedades Químicas e Mineralógicas de Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil*, Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFRS, 1981.
- CABRERA, J.G. and NWAKANMA, C.A., *Pozzolan Activity and Mechanism of Reaction of Red Tropical Soil-Lime Sistem*, 2nd International Conference on Low-Volume Roads, Transportation Research Board, Iowa, USA, 1979.
- CABRERA, J.G. and NWAKANMA, C.A., *Reaction Products and Strenght of Red Tropical Soil-Lime System*, Cement and Concret Research, 1979.
- COSTA C.V.R. et alli, *Estudo de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal*, 21ª Reunião Anual de Pavimentação, 1986.
- COSTA, R.V.C. e QUEIROZ DE CARVALHO, J.B., *Efeito do Aumento da Temperatura de Secagem no CBR e nos Parâmetros de Compactação de Solos Lateríticos*, Anais da 20ª Reunião Anual de Pavimentação, Vol. 1, pp. 197-208, Fortaleza-CE, 1985.
- COSTA, S.F., *Introdução Ilustrada à Estatística*, 1ª Edição, Editora Habra Ltda, São Paulo, 1988.

- DEERE,D.U. and PATTON,F.D., *Slope Stability in Residual Soils, Proceedings of 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.88-170, México City, 1971.
- DIAMOND,S. and KINTER,E.R., *Mechanics of Soil-Lime Stabilization, An Interpretative Review*, HRR N°92, pp.83-102, 1965.
- DE GRAFT-JOHNSON,J.W.S , BHATIA,M.S. and GIDIGASU,M.D., *The Engineering Characteristics of the Laterite Gravels of Ghana*, Proceedings of the Specialty Session on Engineering Properties of Lateritic Soils, VII ICSMFE, Vol.1, pp.117-128, 1969.
- DE GRAFT-JOHNSON,J.W.S. and BHATIA,M.S., *Engineering Properties of Lateritic Soils*, General Report, Proc. Spec. Session Engineering Properties Lateritic Soils, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 13-43, 1970.
- DINIZ,A.A. e QUEIROZ DE CARVALHO,J.B., *Resistência à Compressão Simples: Avaliação da Metodologia e Influência da Temperatura de Secagem*, Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Vol. 1, pp. 171-181, Florianópolis-SC, 1988.
- DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral, *Levantamento de Recursos Naturais*, Projeto RADAM, 1974.
- EADES,J.L. , NICHIOLES,F.P.,Jr. and GRIM,R.E., *Formation of New Minerals with Lime Syabilization as Provera*,by Field Experiment in Virginia Highway Research Board, Bull.N°335, pp,31-39, 1962.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1980.
- FERREIRA,H.C., *Conceito de Laterita na Engenharia Civil*, Luanda, 1963.
- FERREIRA, H.C. e LUCENA, F.B., *A Utilização de Solos Vermelhos Tropicais (Solos Lateríticos) como Matéria Prima para Uso em Cerâmica Vermelha ou Estrutural*, Cerâmica n°30, pp. 169, 1984.
- FERRO,J.G.O., *Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos*, Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFPB, Campina Grande-PB, 1976.
- FROST,R.J., *Importance of Correct Pretest Preparation of Some Tropical Soils*, Proc. First Southeast Asian Regional Conference on Soil Engineering, pp. 43-53, Bangkok, 1967.

- FRUHAUF,B.**, *A Study of Laterritic Soils*, HRB Proc., Vol.26, pp. 579-546, 1946.
- GIDIGASU,M.D.**, *Identification of Problem Lateritic Soil in Highway Engineering: A Review*, Building and Road Research Institute, Kumasi,Ghana,1974.
- GIDIGASU,M.D.**, *Lateritic and Soil Engineering*, Developments in Geotechnical Engineering, 9 Elsevier scient. Pub. Co., Amsterdam,1976.
- HARTY,J.R.**, *Factors Influencing the Lime Reactivity of Tropicallly and Subtropically Weathered Soils*, Tese de Doutorado, Department of Civil Engineering, University of Illinois at at Urbana-Champaign,USA, pp.102-112,1973.
- HARTY,J.R.** and **THOMPSON,M.R.**, *Lime Reactivity of Tropical and Sub-Tropical Soils*, HRB, 442, pp. 102-112,1973.
- HIRASHIMA,K.B.**, *Highway Experience with Thixotropic Volcanic Clay*, HRB Proc., Vol. 28, pp. 481-494, 1948.
- HOEL, P.G.**, *Estatística Elementar*, 4ª Edição, Editora Atlas, São Paulo, 1981.
- INGLES,O.W.** e **METCALF,J.B.**, *Soil Stabilization*, Principles and Practice, John Wiley and Sons, New York, 1973.
- KAPEL,I.B.**, **NEVES,G.A.** e **FERREIRA,H.C.**, *Previsão da Atividade Pozolânica Através do Uso da Análise Térmica Diferencial - Resultados Preliminares*, Cerâmica 30, p. 169, 1984.
- LAL,N.B.** and **BINDRA,S.R.**, *A simple Mechanical Test for Classification and Determination of Compaction Characteristics for the Tropical Soil of India*, Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia COPPE-UFRJ, CNPq,ABMS, pp.45-52, 1981.
- LIMA,C.G.**, *Estudos Sobre a Reatividade à Cal de Solos Lateríticos*, Visando sua Estabilização, Aplicação a um Solo de Nova Floresta, Paraíba, Campina Grande-PB, 1983.
- LITTLE,A.L.**, *Laterites*, *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.7, p.61, 1967.
- LITTLE,A.L.**, *The Engineering Classification of Residual Tropical Soils*, Proceedings of the Specialty Session - Engineering Properties of Lateritic Soils - VII International Conference on Soil Mechanics

- and Foundation Engineering, Edited by Za-Chienh Moh from Asian Institute of Technology, Vol.1, pp.1-10, 1969.
- LOIHNES,R.A. and DEMIREL,T., *Strength and Structure of Laterites and Lateritic Soils*, Engineering Geology, V.7, pp.13-33, 1973.
- LOUGHNAN,R.A., *Chemical Weathering of the Silicate Minerals*, Elsiver p.154, N.Y., 1969.
- MACEDO,J.A.G., BRASILEIRO,F.E. e FERREIRA,H.C., *Influência da Temperatura de Secagem na Resistência de Agregados Graúdos Medida pelo Ensaio "Los Angeles"*, Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Vol. 1, pp. 51-63, Florianópolis-SC, 1988.
- MACEDO,J.A.G., *Estudo Comparativo das Características Físicas e Mecânicas de Agregados Graúdos Convencional e Não Convencional Visando sua Utilização em Concreto Betuminoso Usinado à Quente*, Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFPB, Campina Grande-PB, 1989.
- MEDINA,J. e PREUSSLER,E.S., *Resilient Characteristic of Soil for Pavement Purposes*, Original Title: Características Resilientes de Solos em Pavimentos, Revista Solos e Rochas, Vol.3, Nº1,pp.3-26,Rio de Janeiro, 1980.
- MEDINA,J. e PREUSSLER,E.S., *Resilient Characteristics of Brazilian Soils*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE vol.108, pp.697-712, 1982.
- MOH, ZA-CHIEH and MOZHAR,M.F., *Effects of Method of Preparation on Index Properties of Lateritic Soils*, Seventh International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 23-35, México, 1969.
- NEVES,G.A., *Influência da Area Específica na Atividade Pozolânica do Sistema Solo Laterítico-Cal*, Dissertação de Mestrado, CCT/DEC/UFPB, Campina Grande-PB, 1989.
- NEWILL,D., *A Laboratory Investigation of Two Red Clays from Kenya*, Geotechnique, Nº11, pp. 218-302, 1961.
- NOGAMI,J.S. e VILLIBOR,D.F., *A New Classification for Highway Purposes*, Proceeding of the Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE-UFRJ-CNPq-ABMS, pp.30-41, 1981.

NOVAIS FERREIRA,H. and **MEIRELES,J.M.F.**, *The Influence of Temperature of Humidification on the Geotechnical Properties of Lateritic Soils*, Proc. of Specialty Session of Engineering Properties of Lateritic Soils, Seventh International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 165- 74, México, 1969.

PERSONS,B.S., *Laterite Genesis,Location and Use*, Plenum Press, London, p.103, 1976.

PROGRESS REPORT, *Characterization,Identification and Classification of Tropical Soil*, First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soil, Brazilian Society for Soil Mechanics, Rio de Janeiro, Brazil, 1981-1985.

QUEIROZ DE CARVALHO,J.B., *Soil Properties Affecting the Lime Stabilization of Red Tropical Soils from North East Brazil*, Tese de Doutorado, Universidade de Leeds, Inglaterra, 1979.

QUEIROZ DE CARVALHO,J.B. e **CABRERA,J.G.**, *A simple Method for the Assessement of Pozolanic Activity in Red Tropical Soils*, VI Congresso de Mecânica dos Solos E engenharia de Fundações, Lima, Perú, 1979.

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

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

QUEIROZ DE CARVALHO,J.B., *Efeito da Secagem na Plasticidade de Solos Lateríticos*, Anais da 19ª Reunião Anual de Pavimentação, Vol. I, pp. 83-97, Rio de Janeiro, 1984.

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

RUDDOCK,E.C., *Properties and Position in Lateritic Ground*, Proceeding of Specialty Session on Engineering Properties of Lateritic Soils, VII ICSMFE, vol.1, pp.11-21, México,1969.

SILVEIRA,L.C.S., *Influência da Temperatura de Secagem no Limite de Liquidez de Solos Tropicais*, Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação, Vol. 1, pp. 675-688, Florianópolis-SC, 1988.

- SLABAUGH, N.H. e PARSONS, T.D., *Química Geral*, 2ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, Rio de Janeiro, 1982.
- SOUZA SANTOS, P., *Tecnologia de Argilas*, Vol. II, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1976.
- SPIEGEL, M.R., *Estatística*, Editora McGraw-Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1980.
- SUDENE e MA (Ministério da Agricultura), *Levantamento Exploratório - Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba*, Boletim Técnico, nº 15, Série Edofologia, Rio de Janeiro, 1972.
- SUDENE, *Departamento de Solos*, Mapa de Regiões Bioclimáticas e Mapa de Isoietas, Recife, 1974.
- SUDENE, *Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste*, Recife, 1977.
- TAXONOMY, *A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, Agriculture Hand Book 436, U.S. Dep. Agric. p.754, Washington D.C., 1975.
- TERZAGHI, K., *Design and Performance of the Sasumua*, Proc. of the Institution of Civil Engineers, Vol. 9, pp. 369-395, London, 1958.
- THOMPSON, M.R., *Lime Reactivity of Illinois Soils*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE pp.67-92, September, 1966.
- TOWNSEND, F.C., MANKE, P.G. and PARCHER, J.V., *The Influence of Sesquioxides on Lateritic Soil Properties*, HRB 374, pp. 80-92, 1971.
- TRAJANO, C.M.V. e FERREIRA, H.C., *Influência do "Dopping" de Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio no Sistema Solo-Cal Aplicado a Solos Vermelhos Tropicais*, Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFPB, Campina Grande-PB, 1991.
- TUNCER, E.R., *Engineering Behaviour and Classification of Tropical Soils in Relation to Soil Genesis*, Iowa State University, Ph.D Thesis, 1976.
- VALLERGA, B.A., VANTIL, C.I. and RANAMAND, N., *Engineering Properties of Lateritic Materials in Thailand Road Construction*, Proceeding of Specialty Session on Engineering Properties of Lateritic Soils, VII ICSMFE, Vol.2, pp.109-121, 1969.
- VARGAS, M., *Introdução à Mecânica dos Solos*, McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

VARGAS,M., *The Use of Atterberg Limits in the Classification of Tropical Soils*, Proceeding of the VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Vol.5, pp.262-278, 1982.

WALLACE,K.B., *Structural Behaviour of Residual Soils of the Continually Wet Highlands of Papua New Guinea*, Geotechnique, N°23, pp. 203-218, 1973.

WINTERKORN, F.M. and CHANDRASENKHARAN, E.C., *Lateritic Soil and Their Stabilization*, Highway Research Board Bulletin N°44, pp.10- 29, 1951.

Apêndice

Método de Ensaio Utilizado para a Determinação da Resistência à Compressão Simples Não Confinada

A metodologia para a determinação da resistência à compressão simples não confinada de solos lateríticos, baseia-se nos trabalhos de Thompson (1966), Queiroz de Carvalho (1979), Aflitos (1981) e Neves (1989).

As amostras utilizadas foram beneficiadas em peneira ABNT 9,5mm (3/8"), obtida antes por quarteamento.

Para a determinação da resistência à compressão simples, as amostras foram colocadas em um cilindro de 5cm de diâmetro (d) e 10cm de altura (x). Foram compactadas estaticamente em molde projetado para este fim. A quantidade de solo necessária à moldagem de corpo de prova para a compactação estática é baseada na seguinte expressão:

$$P_s = \gamma_s \text{ máx} \cdot V$$

$$P_h = P_s (1+h_i)$$

$$V = \pi \cdot d^2 \cdot x / 4$$

$$P_a = P_s \cdot ((h_{ót} - h_i) / 100)$$

$$P_{cal} = P_s \cdot (\%)_{cal}$$

onde:

P_s - massa do solo seco, em g;

$\gamma_s \text{ máx}$ - massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação dinâmica, em g/cm^3

d - diâmetro interno do cilindro, em cm.

x - altura do cilindro, em cm.

P_h - massa específica aparente do solo úmido, em g.

$h_{ót}$ - teor de umidade ótima em que se deseja moldar o corpo de prova, em (%).

h_i - umidade higroscópica, em (%).

Pa - massa de água a adicionar a fim de se obter a umidade desejada, em g.

Pcal - massa de cal a ser adicionada em relação ao Ps, em g.

Inicialmente a carga foi aplicada no topo do cilindro até se obter um corpo de prova com $12,5\text{cm} \pm 0,1\text{cm}$ de altura. A seguir o molde foi invertido e aplicado uma carga na base do cilindro até uma altura de $10\text{cm} \pm 0,1\text{cm}$, deixado durante o tempo de 2 min.

Após a moldagem, os parâmetros de compactação foram verificados de forma a se reproduzir os dados obtidos no ensaio dinâmico. Quando os resultados de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima dos corpos de prova diferiam em mais de 5% dos valores do ensaio dinâmico, novos corpos de prova eram moldados.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado com deformação controlada a uma velocidade de $0,127\text{cm/min}$.

O aparelho para determinação de resistência à compressão simples é constituído de pratos entre os quais os corpos de prova foram comprimidos, sendo as deformações medidas por um defletrômetro e a carga por um anel dinamométrico. O valor máximo da carga aplicada dividido pela área do corpo de prova, são os valores da resistência à compressão simples não confinada.