

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

A INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS EM PROPRIEDADES SELECIONADAS E DE ENGENHARIA DE SOLOS VERMELHOS TROPICAIS DO NORTE E NORDESTE DO BRASIL

Por

AREOBALDO OLIVEIRA AFLITOS

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA - BRASIL
ABRIL - 1981



A257i Aflitos, Areobaldo Oliveira.
A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos vermelhos tropicais do norte e nordeste do Brasil / Areobaldo Oliveira Aflitos.
- Campina Grande, 1981.
266 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1981.
"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".
Referências.

1. Solos Lateríticos. 2. Efeitos de Aditivos Químicos - Brasil - Norte e Nordeste. 3. Engenharia de Solos. 4. Solos Vermelhos Tropicais - Norte e Nordeste - Brasil. 5. Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 624.131.2(81)(043)

A INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS EM PROPRIEDADES SELECIONADAS E DE ENGENHARIA DE SOLOS VERMELHOS TROPICAIS DO NORTE E NORDESTE DO BRASIL

AREOBALDO OLIVEIRA AFLITOS

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

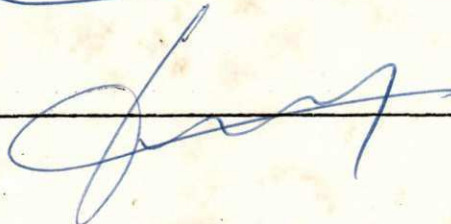
Aprovado por:

COMISSÃO



Presidente





CAMPINA GRANDE - PARAÍBA - BRASIL

ABRIL - 1 9 8 1

R E S U M O

Foram estudados cinco solos lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil, tendo em vista a verificação dos efeitos de aditivos químicos (Ca, NaOH e NaCl) em propriedades selecionadas e de engenharia.

Inicialmente foram determinadas propriedades caracterizantes tais como: área específica, pH, σ , CTC, matéria orgânica, com posição química, amorfos, massa específica real, composição granulométrica e composição mineralógica, etc. Posteriormente verificou-se a influência dos aditivos considerados, em diversas proporções, nas seguintes propriedades; limites de Atterberg, compactação dinâmica e tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS). Finalmente foram pesquisadas correlações e regressões estatísticas, se bem que de validade limitada devido ao pequeno número de solos estudados. Estas interrelações tiveram por objetivo serem utilizadas como dados auxiliares na justificativa de certos comportamentos, bem como poderão eventualmente e com critério, serem utilizadas para previsão de comportamento de outros solos de mesma fisiografia.

Após os estudos realizados observou-se para cada um dos aditivos, o seguinte comportamento global: O cloreto de sódio (NaCl) se mostrou como um agente pouco promissor para melhorar as propriedades estudadas dos solos em relação ao hidróxido de sódio (NaOH), cal e cal + traços de NaOH, apresentando resultados desalentadores para aditar solos nas condições da presente pesquisa. O hidróxido de sódio (NaOH) se mostrou como um promissor agente para

melhorar as características pesquisadas dos solos, não obstante tenha apresentado resultados inferiores a cal e cal + traços de NaOH. A cal se mostrou como um efetivo agente para melhorar as características de plasticidade, resistência a imersão e capacidade de suporte de carga dos solos estudados. A cal + traços de NaOH exibiu resultados superiores a cal e o hidróxido de sódio (NaOH) isoladamente apresentando-se como um agente muito promissor para melhorar as características anteriormente descritas dos solos.

A B S T R A C T

This thesis presents results and techniques used to investigate engineering soil properties affected by chemical additives (Lime, NaOH and NaCl). Soils from North and North-east Brazil were tested.

Initially properties were determined such as specific area, PH, CEC, organic and amorphous material, specific gravity, granulometric, mineralogical and chemical composition. Then were considered the action of additives in several contents, in the following properties. Atterberg limits dynamic compaction and unconfined strength compression. Were used correlation and statistical regression but with limited validity because of the number of samples. The objective to those relations were to help the interpretation of some behaviours of system studied.

The results would be used as guidelines for previous of other soils behaviours. In the research was obtained that the sodium chloride (NaCl), does not show itself like a fair agent to improve the soil properties tested, then the sodium hydroxide (NaOH), lime and lime plus NaOH traces. The sodium hydroxide shows itself like a good agent to improve the soil characteristics studied, but it has a lower result than lime and lime plus NaOH traces. The lime shows itself like a real agent to improve the plasticity characteristics immersion resistance and stand capacity to the tested soils. Lime plus NaOH traces presents better results than lime and the sodium hydroxide only showing itself like a results than lime and the sodium hydroxide only showing itself like a well agent to improve the characteristics as described previously.

spite of the fact that lime and lime plus traces of NaOH are better chemical additives. Lime is an effective agent to improve the characteristics of plasticity, resist the softening effect of water and bearing capacity of tested soils. Lime plus traces of NaOH presents better behaviour than sodium hydroxide (NaOH) used solely and is a promising agent to improve the soil characteristics as described previously.

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

Ao orientador Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, pelos ensinamentos transmitidos, críticas construtivas; revisão do texto e pela dedicação demonstrada, fatos esses que contribuíram decisivamente para conclusão desta dissertação de mestrado.

À Universidade Estadual de Feira de Santana pela licença concedida para realização do Curso de Mestrado, bem como pela ajuda recebida na resolução dos mais diversos problemas.

À ATECEL - Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior, na pessoa do Prof. Francisco Barbosa de Lucena, Coordenador da Área de Geotecnia, pelo apoio constante demonstrando seu espírito empreendedor.

Aos colegas e funcionários da Universidade Federal da Paraíba e Universidade Estadual de Feira de Santana pelo apoio e auxílio na resolução das mais diversas dificuldades. Ao Acadêmico de Engenharia Jeconias Dantas Costa pelos serviços datilográficos e a todos que contribuiram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa ao autor.

SIMECLOGIA UTILIZADA

		Unidade
γ_s	- massa específica aparente seca	kg/m ³
γ_g	- massa específica real	kg/m ³
RCS	- tensão de ruptura à compressão não confinada com imersão	kPa
RCS(*)	- tensão de ruptura à compressão não confinada sem imersão	kPa
LL	- limite de liquidez	%
LP	- limite de plasticidade	%
IP	- índice de plasticidade	%
LC	- limite de contração	%
NP	- não plástico ou não líquido	
hot	- teor ótimo de umidade	%
hntr	- teor de umidade para a máxima tensão de ruptura	%
CBR/ISC	- índice de suporte Califórnia	%
R	- coeficiente de correlação	
S	- nível de significância	
GL	- grau de liberdade	
Ia	- índice de atividade	
IG	- índice de grupo	
EA	- equivalente de areia	
pH	- potencial hidrogeniônico	

		Unidade
σ	- condutividade elétrica	mS (mmho/cm)
A.E.	- área específica	m ² /g
CTC	- capacidade de troca catiônica	meq/100g
ψ	- potencial elétrico	milivolt
ξ	- potencial zeta	milivolt

(*) Rompido sem imersão.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTO	v
SIMBOLOGIA UTILIZADA	vi
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - RESIVÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Solo Vermelho Tropical (Laterita)	5
2.3 - Estabilização de Solos	7
2.4 - Química do Sistema Coloidal	11
2.5 - Sistema Solo-Cal	14
2.5.1 - Troca de Cátions e Floculação/agregação	15
2.5.2 - Carbonatação	16
2.5.3 - Reação Pozolânica	16
2.6 - Sistema Solo-NaOH e Solo-Cal + Traços de NaOH	22
2.7 - Sistema Solo-NaCl	29
CAPÍTULO III - OBJETIVOS DA PESQUISA	36
CAPÍTULO IV - MATERIAIS	38
4.1 - Introdução	38
4.2 - Cal	38
4.3 - Hidróxido de Sódio (NaOH)	38
4.4 - Cloreto de Sódio (NaCl)	39
4.5 - Tipo de Água Utilizada	39
4.6 - Solos	39

	Pag.
4.6.1 - Seleção, Prospecção e Identificação da Amostra de Solos.	39
4.6.2 - Jazidas de Teixeira (TEPB)	42
4.6.3 - Jazida de Cuité (CTPB)	44
4.6.4 - Jazida de Areia (ARPB)	46
4.6.5 - Jazida de Castelo (CAPI)	48
4.6.6 - Jazida de Mosqueiro (MOPA)	50
CAPÍTULO V - MÉTODOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROPRIEDADES DE ENGENHARIA.	54
5.1 - Introdução	54
A - Metodologia dos Ensaios para Caracterização dos Materiais.	54
5.2 - Cal	54
5.3 - Hidróxido de Sódio (NaOH)	57
5.4 - Cloreto de Sódio (NaCl)	57
5.5 - Solos	57
5.5.1 - Preparação de Amostras	58
5.5.2 - Teor de Umidade	58
5.5.3 - Limite de Liquidez	58
5.5.4 - Limite de Plasticidade	59
5.5.5 - Limite de Contração	59
5.5.6 - Massa Específica Real	60
5.5.7 - Análise Granulométrica	60
5.5.8 - Área Específica	60
5.5.9 - Matéria Orgânica	61
5.5.10 - Potencial Hidrogeniônico	61
5.5.11 - Acessórios como Carbonatos	61
5.5.12 - Acessórios como Sulfatos	61
5.5.13 - Capacidade de Troca de Cátions (C.T.C.)	62

	Pág.
5.5.14 - Identificação Mineralógica	62
B - Metodologia dos Ensaios para Avaliação das Propriedades de Engenharia	63
5.6 - Limite de Liquidez	63
5.7 - Limite de Plasticidade	63
5.8 - Ensaio de Compactação e Moldagem dos Corpos de Prova	64
5.9 - Condições de Cura e Ensaio de Compressão não Confinada (RCS) dos Corpos de Prova	65
CAPÍTULO VI - RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
6.1 - Introdução	67
A - Ensaio de Caracterização dos Materiais	67
6.2 - Cal	67
6.3 - Hidróxido de Sódio (NaOH)	68
6.4 - Cloreto de Sódio (NaCl)	68
6.5 - Qualidade de Água	69
6.6 - Limite de Consistência (Atterberg) Solo Natural	69
6.6.1 - Limite de Liquidez	69
6.6.2 - Limite de Plasticidade	69
6.7 - Massa Específica Real	71
6.8 - Análise Granulométrica	73
6.9 - Área Específica	73
6.10 - Característica Geotécnica	77
6.11 - Matéria Orgânica	78
6.12 - Potencial Hidrogeniônico (pH) dos Solos no Estado Natural (1:2,5)	80
6.13 - Acessórios como Carbonatos	81
6.14 - Acessórios como Sulfatos	82
6.15 - Capacidade de Troca de Cátions (C.T.C.)	82

	Pág.
6.16- Identificação Mineralógica	84
B - Ensaio para Avaliação das Propriedades Sele cionadas e de Engenharia	91
6.17- Limite de Consistência (Atterberg) dos Solos Tratados com Aditivos	91
6.17.1 - Sistema Solo-Cal	91
6.17.2 - Sistema Solo-NaOH	102
6.17.3 - Sistema Solo-NaCl	109
6.18- Efeito dos Aditivos sobre Relação Massa Especi fica Aparente Seca e Teor de Umidade	116
6.18.1 - Solo Natural e Tratado com Cal	116
6.18.2 - Solo Tratado com NaOH	130
6.18.3 - Solo Tratado com NaCl	144
6.19- Efeito dos Aditivos sobre a Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada (RCS)	157
6.19.1 - Solo Natural e Tratado com Cal	157
6.19.2 - Solo Tratado com NaOH e com NaCl	169
6.19.3 - Solo Tratado com cal + Traços de NaOH	182
CAPÍTULO VII - INTERAÇÃO ESTATÍSTICA	198
7.1 - Introdução	198
7.2 - Conceitos	198
7.3 - Análise Através de Correlação e Regressão Li near Simples	201
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES	208
8.1 - Solo TEPB	208
8.2 - Solo CTPB	211
8.3 - Solo ARPB	215
8.4 - Solo CAPI	219
8.5 - Solo MOPA	223
8.6 - Generalizações	226

	Pág.
8.6.1 - Sistema Solo-Cal	226
8.6.2 - Sistema Solo-NaOH	227
8.6.3 - Sistema Solo-NaCl	228
8.6.4 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH	228
CAPÍTULO IX - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	230
Referências	232
Bibliografia Indicada	249
Apêndices	253

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

De uma maneira geral estabilizar um solo consiste em corrigir suas propriedades, de forma a compatibilizá-lo a uma utilização específica. Numa etapa prévia, antes dos estudos de estabilização, se faz necessário verificar o comportamento de misturas solo-aditivos, para que se possa observar a influência destes aditivos pelo menos nas propriedades básicas dos solos. Inferindo-se daí quais as melhorias obtidas para o comportamento das propriedades selecionadas dos solos estudados.

A melhoria das características de solos é uma técnica muito antiga. Sabe-se através a história das civilizações, que desde o neolítico o homem já conhecia a compactação; que os Egípcios, Gregos, Mesopotâmios e Romanos construíram sistemas viários engenhosos, utilizando em certos casos aditivos químicos.

Estas técnicas foram aperfeiçoadas na idade média e moderna, e o uso de aditivos químicos vem cada vez mais se intensificando em todas as partes do mundo, como se pode ver a seguir.

Segundo Michaels (1955), a partir de 1930 as necessidades militares da época incentivaram a utilização de aditivos químicos para melhoramento do desempenho das estradas para o tráfego dos veículos militares. A Associação dos produtores de cloreto de cálcio (CaCl_2) em 1936, publicou trabalhos referentes a preparo de mistura de solos com cloreto de cálcio. Earth (1936) reporta métodos para estabilizar materiais com cloreto de cálcio (CaCl_2). O HRB (1936) reporta numa revisão de literatura a história, teoria, métodos de projeto, construção e manutenção de rodovias com

cloreto de sódio. Looker et alli (1938) reportam pesquisas com cloreto de sódio (NaCl) estabilizando calcáreos. Olmstead (1940) descreve métodos para a produção de materiais estabilizados com sais. Em 1952 o MIT (Massachusetts Institute of Technology) reporta nos anais da conferência sobre estabilização de solos uma série de trabalhos sobre as diversas fases desta técnica. Sheeler (1961) reporta um sumário sobre dosagem e dimensionamento de várias misturas de sais para utilização em rodovias. Duarte (1961) reporta resultados de pesquisas com a utilização de hidróxido de sódio (NaOH) para redução da permeabilidade em canais de irrigação. Zolkov (1962) pesquisou as influências de cloretos, hidróxidos de sódio e cálcio nos limites de consistência de argilas altamente plásticas. Willoughy et alli (1968) desenvolveram um método para identificação de produtos de reação em argilas estabilizadas com álcalis. Ingles (1970) reporta os prováveis mecanismos de argilas estabilizadas com álcalis e ácidos inorgânicos. Chadda e Uppal (1971) reportam a utilização de hidróxido de sódio (NaOH) em estabilização de solos lateríticos da Índia. Guida (1971) reporta a utilização de ácido fosfórico (H_2PO_4) para estabilizar solos lateríticos finos do Sudeste do Brasil. Micheev e Petruchin (1963) reportam a utilização de sais para reforço de fundações em indústrias em Moscou. O'Flaherty e Gray (1974) reportam a influência de álcalis metálicos e seus compostos nas propriedades de resistências de misturas solo-cal.

Estes são alguns dos muitos trabalhos ao longo de mais de 50 anos, que demonstram o interesse internacional em fomentar e metodizar uma tecnologia adequada para utilização de aditivos químicos.

No Brasil poucos trabalhos foram efetuados com o uso de aditivos químicos em solos, principalmente nos lateríticos. Se fazendo necessário, portanto o desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento resultante do uso de

aditivos para melhoria de propriedades e numa etapa final estabilização de diversos tipos de solos, mormente os lateríticos que têm comportamento anômalo e são abundantes no Norte e Nordeste do Brasil.

JUSTIFICATIVA - Sentindo a premente necessidade de maiores estudos sobre o comportamento dos solos lateríticos existentes no Norte e Nordeste do Brasil para uso principalmente em rodovias o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) iniciou o estudo desses solos.

Numa etapa inicial através de contrato de consultoria com Lyons Associates foram desenvolvidos estudos preliminares sobre os solos lateríticos brasileiros. Posteriormente, o IPR iniciou estudos mais específicos podendo-se destacar os que são realizados nos laboratórios de solos do DEC/CCT/UFPb. Desta maneira se fazem necessários estudos sobre o comportamento de solos lateríticos, como o que ora se realiza e cujos resultados serão obviamente úteis, como contribuição, no seu sentido mais amplo à engenharia nacional.

Neste estudo prévio da influência de aditivos químicos em solos lateríticos foram selecionados cinco amostras de jazimentos nos Estados da Paraíba, Piauí e Pará de forma a se ter uma relativa diversificação geoclimática destes solos e os seguintes aditivos: cal; hidróxido de sódio e cloreto de sódio em virtude das razões que abaixo passa-se a enumerá-las

Cal, a escolha deste aditivo deveu-se ao fato de ser um material largamente utilizado para a estabilização de solos bem como já existir na atualidade um razoável conhecimento sobre os mecanismos de sua ação nos solos, além do fato ser um material de construção largamente existente no Brasil.

Hidróxido de sódio, a escolha deste aditivo de

veu-se ao fato de recentemente ter sido implantada uma unidade para produção de s \ddot{u} da ca \ddot{u} stica no estado de Alagoas sendo utilizada como mat \acute{e} ria prima a salgema proveniente do estado de Sergipe. Al \acute{e} m de estarem em planejamento duas outras unidades fabris para produ \c o de s \ddot{u} da ca \ddot{u} stica, uma no estado de Sergipe e outra no estado do Rio Grande do Norte onde se utilizar \acute{a} salgema e cloreto de s \ddot{u} dio como mat \acute{e} ria prima. Tamb \acute{e} m deve ser mencionado o fato (ver revis \ddot{a} o bilbiogr \acute{a} fica) de que a s \ddot{u} da ca \ddot{u} stica possibilita modifi \c o \tilde{c} es quando em contato com as fra \c o \tilde{e} s finas dos solos, o que sem d \acute{u} vida ir \acute{a} influenciar no seu comportamento.

Cloreto de s \ddot{u} dio, a escolha deste aditivo deveu-se ao fato de ser o cloreto de s \ddot{u} dio largamente produzido no vizinho estado do Rio Grande do Norte sendo este o primeiro produtor nacional. Deve-se tamb \acute{e} m mencionar, que o cloreto de s \ddot{u} dio tem sido usado para modificar propriedades de solos, n \tilde{a} o havendo contudo evid \acute{e} ncias (ver reviso bibliogr \acute{a} fica) da forma \c o de produtos ciment \acute{c} ios o que restringe o seu uso como aditivo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Esta revisão tem por escopo delimitar a conceitua
ção dos solos vermelhos tropicais estudados, que serão chamados
nesta dissertação de solos lateríticos, como é mais co
nhecido nos meios rodoviários e está de acordo com o termo
original proposto por Buchanan, (1807). Não obstante reconhe
ça-se a existência internacional de uma gama de proposições,
para definição, origem e classificação de solos vermelhos tropi
cais, sendo, segundo Lucena (1976), a mais interessante no mo
mento, a proposta pelo estudo feito em conjunto pelo DNER,
LYONS ASSOCIATES e UNESCO.

Em seguida, apresenta-se uma revisão geral da uti
lização de sais e bases inorgânicas isolados e como tra
ços para solo-cal, solo-cal + cinza volante e solo-cimento.

Separadamente é mostrada uma revisão específica de
cal hidratada, hidróxido de sódio (NaOH), cloreto de sódio
(NaCl) e sempre que possível, enfocando sua aplicação ã so
los tropicais.

2.2 - SOLO VERMELHO TROPICAL LATERIZADO

Está ainda confusa, não obstante a existência de
razoável cabedal de pesquisas, uma definição e classificação
para os solos vermelhos tropicais, que bem se adegue ã enge

nharia civil. O que se tem hoje é um emaranhado de proposições onde solos de mesma classificação se comportam de forma diversa e os de classificação diferentes tendem, às vezes, a um comportamento similar.

O nome "laterite" foi primeiramente empregado na literatura, segundo Ferreira (1976), em 1807, pelo engenheiro inglês Francis Buchanan para designar um material por ele encontrado em Malabar, na Índia, que possuía a peculiaridade de endurecer quando exposto ao sol. Os nativos da Índia chamavam a este material, a esta época, de "itica cullu" em algumas regiões e de "shuri cullu" em outras. Buchanan achou melhor chamá-lo de "laterite"; (palavra que vem do latim *late ritis*, later = tijolo). Vale ressaltar que esse material apresentava cor vermelha e/ou amarela cheio de cavidades e poros, contendo uma grande quantidade de ferro, Buchanan (1807). Entretanto foi ao material em si, não ao ferro, que foi dado por Buchanan o cognome de "laterite". Daí em diante um grande número de definições vem sendo dado para materiais tropicais semelhantes ao descrito por ele.

Segundo Lucena (1976), no Brasil, os solos vermelhos tropicais, dependendo da região onde se encontrem, são popularmente conhecidos pelos nomes de "piçarra", "canga", "tauá", "saibro", "tapiocanga", "moco-ro", "recifes", etc. Já na linguagem técnica dos meios rodoviários são sistematicamente chamados de solos lateríticos.

No Brasil a definição oficial de solos vermelhos tropicais é formulada pelo DNER (1974), inspirada na classificação proposta por Wintercorn e Chandrasenkharan, segundo citação de Lucena (1976) e Ferreira (1976), baseada na relação sílica/sesquióxidos de ferro mais alumínio da fração coloidal menor do que $2\mu\text{m}$, conjuntamente com expansão menor que 0,2% medida no ensaio I.S.C. (DNER-ME-49-74), assim como a presença apreciável de sesquióxidos de ferro, tendência ao concrecionamento, endurecimento sob exposição ao sol e baixo

teor de matéria orgânica.

2.3 - ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilizar um solo consiste em alterar-lhe uma ou mais propriedades, conferindo-lhe a necessária suplementação, afim de torná-lo utilizável em estruturas de terra, isto é, estradas, barragens, etc. A suplementação de propriedades dos solos é de uso muito antigo, reportando-se aos primórdios das civilizações Gregas, Egípcias Mesopotâmias e Romanas entre outras, Cabrera (1979). Para atingir tal objetivo utiliza-se processos mecânicos (físicos), químicos e/ou físico-químicos.

Toda estabilização requer um estudo do solo natural disponível, bem como os meios econômicos e práticos necessários a modificar-lhe as propriedades, obtendo-se assim os parâmetros necessários ao bom desempenho quando em serviço. Assim sendo, os métodos mais usuais para suplementação de características de solos se baseiam na mistura racional de materiais como: solo-solo, solo-cimento, solo-cal e solo-betume, entre outros. No entanto devido a disponibilidade de efluentes industriais e/ou congêneres químicos, tem havido proposições de aplicação de aditivos químicos na estabilização de solos, principalmente em circunstâncias especiais onde soluções temporárias são aceitáveis e/ou altos custos possam ser justificados.

A estabilização física (solo-solo) consiste na modificação da estrutura do solo natural através da indução de energia mecânica em condições específicas de umidade, favorecendo melhor embricamento entre partículas do solo que conduz a uma maior "densificação". Esta estabilização também caracteriza-se pelas variações nas propriedades dos solos através da modificação do estado de tensão do sistema, pela indu

ção de energia térmica, elétrica, redução da pressão intrinsecal (pressão neutra) entre outros processos.

A estabilização química consiste na alteração da estrutura do solo mediante a inserção de produtos que vão reagir com os componentes do solo, ocorrendo consequente formação de novos compostos os quais são responsáveis pelas modificações do comportamento do solo. Em geral ocorre, aliado a este, um processo físico-químico.

Os estabilizantes químicos são inorgânicos ou orgânicos que por sua vez podem ser ácidos, neutros ou alcalinos. Os aditivos inorgânicos são mais empregados que os orgânicos visto que estão menos propensos a restrições comerciais, tais como patentes, marcas registradas e outras.

A ação de agentes químicos nos solos se processa através de efeitos físicos, químicos e/ou físico-químicos. Se ocorrer uma ação efetiva, provavelmente junto com a estrutura formada, aparecerá uma matriz que poderá ser: contínua se recobrir as partículas do solo e as propriedades do sistema assim constituído serão essencialmente as da matriz; ou descontínua se agir principalmente através da modificação da superfície das partículas do solo, (especialmente as do argilo-mineral), e/ou interconectando, (soldando), as partículas deste.

Os fenômenos mais comuns entre solo e aditivo são: variação de temperatura, hidratação, evaporação, sorção, troca de cátions, precipitação, polimerização, oxidação, dissolução e recristalização, entre outros, TRR (1976).

Os aditivos químicos, atuam interagindo aos componentes do solo (normalmente o argilo-mineral) com subsequente precipitação de compostos cimentícios e/ou alterando as propriedades do solo.

Os aditivos ácidos mais utilizados são ácido fosfórico e os fosfatos que atuam com bons resultados em solos cujo argilo-mineral predominante seja a clorita, (onde cal e cimento não tem efeitos bem definidos) ou com solos de ori

gem vulcânica, servindo também para solos lateríticos finos segundo Guida (1971), cujo principal mecanismo de reação se processa através do ataque ácido ao argilo-mineral, dissolvendo o alumínio e precipitando um fosfato hidratado de alumínio, ou sílico-fosfatos. O uso destes aditivos é vetado para aplicação em solos alcalinos, siltes e areias. Estes aditivos não são tóxicos. Experiências de laboratório com HF conduzidas por Ingles e Metcalf (1973), demonstraram a eficácia deste ácido em estabilizar solos, excetuando os ricos em alumínio como os caulins, bauxitos, solos lateríticos, etc., através do ataque a sílica da areia ou argila formando silicofluoretos insolúveis, contudo sua aplicação na prática é pouco viável, uma vez que este é extremamente corrosivo e de alto custo.

Vários sais (*) têm sido ensaiados como estabilizante em laboratório, Thornburn e Mura (1968), no entanto, quer seja pelo seu desempenho pouco adequado, ou por questões econômicas ou por limitada viabilidade técnica e econômica, somente poucos sais têm sido utilizados no campo. O NaCl e CaCl₂, segundo Thornburn e Mura (1968) e O'Flaherty (1978) têm sido os mais utilizados em construções de estradas por mais de 50 anos, no Estados Unidos (U.S.A.), Canadá como também na Europa.

Sais como cloreto de bário (BaCl₂), sulfato de bário (BaSO₄), sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃) e sulfato de magnésio (MgSO₄) foram extensivamente pesquisados pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) e outros e geralmente mostram-se não efetivos conforme Kozan e Pi

(*) Sais são resultantes da neutralização de um ácido por uma base, podem ser neutros, ácidos ou básicos, em decorrência de ser completamente neutralizado ou ainda permanecer hidrogênio ácido H⁺ ou hidroxila OH⁻, respectivamente na estrutura do sal formado. Feltre et alli (1969).

mentel (1965). Katti e Barve (1962) estudando solos pretos expansivos de Poona, Índia, reportam efeitos benéficos de pequenas quantidades de KCl , $MgCl_2$, $BaCl_2$, $NaCl$, $FeCl_3$ e NH_4HPO_4 , tais aditivos tornavam porosa a massa do solo.

Os sais também veem sendo estudados como aditivos secundários para cal, cal-cinza-volante e cimento. Davidson, Mateos e Katti (1959) que pesquisaram a influência de 47 aditivos químicos na tensão de ruptura à compressão não confinada (R.C.S.) de misturas de areia de Ottawa com cal-cinza volante relataram que a maioria dos sais básicos (alcalinos) elevaram em até 200% a tensão de ruptura à compressão não confinada nos 7 dias iniciais de cura, porém este gradiente de ascensão não continuou com a mesma intensidade após 4 meses de cura. O carbonato de sódio (Na_2CO_3) foi considerado o mais promissor dos sais básicos ensaiados. A maioria dos sais neutros utilizados conferiram uma elevação média de 80% na tensão de ruptura (R.C.S.), sendo os mais promissores o KNO_3 , $NaMnO_4 \cdot 3H_2O$, $LiSO_4 \cdot H_2O$, HF , $LiNO_3$. Os sais ácidos não apresentaram apreciável elevação na tensão de ruptura (R.C.S.), sendo deste grupo os mais promissores o $CaCl_2$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$. Os teores de aditivos empregados situaram-se na faixa de 0,5 a 1,0 por cento. Mateos e Davidson (1961) relatam o uso de Na_2CO_3 e $NaCl$ em mistura de areia-cal-cinza volante, onde o Na_2CO_3 mostrou-se efetivo em solos arenosos e loes friável, sendo prejudicial em misturas com argilas montmoriloníticas. O $NaCl$ mostrou-se benéfico para melhoramento de tensões de ruptura a longo tempo em areias e loes friável, estabilizados com cal-cinza volante. Ladd et alii (1968) utilizando Na_2CO_3 como traço químico em mistura solo-cal relatam uma elevação na tensão de ruptura (R.C.S.) de até 150% a 28 dias após cura úmida.

No cimento a adição de sais como aditivos secundários vem sendo investigado mesmo antes de 1940, segundo Thornburn e Mura (1968) mormente o $NaCl$ e $CaCl_2$. Lambe e Moh (1958) estudando misturas de siltes e loes com cimento mais

traços de CaCl_2 , KCl , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ e Na_2CO_3 , relatam que os efeitos destes traços sobre o loes é pequeno, mas o Na_2CO_3 e $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ elevaram a tensão de ruptura (R.C.S.) dos siltes em mais de 150%. Notaram também que não ocorria incremento na massa específica aparente, o que leva a sugerir a formação de adicional agentes cimentícios. Laguros e Davidson (1963) pesquisando a influência de CaSO_4 , Na_2SO_4 , CaCl_2 e Na_2CO_3 como traços (aditivos secundários) em misturas de cimento com siltes, argilas e areias, relatam que o Na_2SO_4 foi o mais efetivo em estabilizar "top-soils" orgânicos que eram ácidos e com baixo teor de argila. Nos solos os aditivos secundários mais efetivos foram CaSO_4 e CaCl_2 ; a avaliação da efetividade foi realizada através de ensaios triaxiais e compressão não confinada. Outros trabalhos têm sugerido (Thornburn e Mura, 1968), que o efeito relativo dos traços químicos depende da textura, do tipo de argilo-mineral e da acidez do solo. A influência das bases hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bem como do sal cloreto de sódio (NaCl) nos solos será considerada posteriormente de forma separada por ser de interesse ao presente estudo.

2.4 - QUÍMICA DO SISTEMA COLOIDAL

O desenvolvimento da "química coloidal das argilas parece ser essencial para uma melhor elucidação da estabilização química de solos, mormente com sais e álcalis.

O problema da origem da interação superficial de uma partícula coloidal hidrofílica e da maneira como essa interação influi na floculação ou dispersão das partículas tem sido bastante estudado, sendo as escolas de Grim, Law, Verwey, Overbuk, Kruyt e Demjaguim, (citados por Souza Santos (1975)) as que mais se aproximaram de um modelo final, mostrando-se no entanto contrárias em diversos pontos.

Grim (1945, 1965) e Law (1958, 1959, 1960), citados por Souza Santos (1975), procuram explicar as propriedades coloidais em função apenas da água de solvatação (ligação química entre solvente e soluto) que no caso particular, do solvente utilizado ser água, chama-se hidratação. Existem evidências experimentais indicando que a água adsorvida na superfície dos argilo-minerais, mormente nos planos basais, é constituída por moléculas orientadas de água que tem propriedades diferentes da água líquida, estando bem próximas ao modelo sólido ou rígido^(*). Sua espessura pode ser de três ou mais moléculas e com transição de água sólida para água líquida gradual ou brusca, sendo que esta camada de água deverá ter estabilidade e espessura dependente entre outros fatores, da mineralogia das partículas, da natureza dos cátions, dos ânions adsorvidos e da matéria orgânica. A natureza dessa água e os fatores que influem na sua formação são os elementos fundamentais que determinam as propriedades do sistema. Tal água pode ser eliminada à temperatura relativamente baixa 100 a 150°C (a água de hidroxilas é eliminada à temperatura superior a 300°C). Verway e Overbuk (1948); Kruyt (1952), citados por Souza Santos (1975), bem como Heagler (1964), Melienz e King (1975) referem-se à existência da dupla camada iônica, sendo a interna formada pelos íons adsorvidos à superfície do reticulado cristalino da partícula íons determinadores do potencial zeta e a camada externa constituída pelos íons de carga oposta do eletrólito estabilizante. A primeira hipótese para a existência de uma dupla camada iônica foi proposta por Helmholtz, conforme Mitchell (1976), que

(*) O termo semelhante ao gelo ou com a estrutura de gelo foi evitado mesmo na sua forma mais geral, porque a estrutura dessa camada de água adsorvida difere significativamente daquela do reticulado cristalino do gelo conforme Souza Santos (1980).

no seu modelo sugeriu que a estabilidade dos coloides seria função da diferença de potencial desenvolvida entre as duas camadas rígidas e seria congnominada essa DDP^(*) de "potencial zeta", que pode ser deduzido a partir do modelo de um condensador plano.

$$\text{Potencial zeta} = \frac{4\pi d\sigma}{D} = \frac{4\pi un}{HD} \text{ (em milivolt) } (\xi)$$

onde:

- d = espessura da dupla camada
- σ = carga superficial em Coulomb/cm²
- D = constante dielétrica do meio
- H = DDP que desloca a partícula com uma velocidade **de**
- n = velocidade da partícula em cm/s
- μ = viscosidade

O potencial zeta é função linear da espessura da camada e é quem determina se a partícula coloidal fica em suspensão ou é precipitada. Originando-se daí o conceito de potencial zeta crítico que determina se o sol é estável (movimento browniano) e deflocula, ou instável e flocula, não existindo neutralização de cargas. Assim sendo, este conceito de Helmholtz, admitido por bastante tempo, explicava qualitativamente uma boa parte dos fenômenos coloidais, falhando quanto ao próprio discernimento do potencial zeta crítico que teria um mínimo quando $D = 0$ e $\sigma = 0$ que são impossíveis de ocorrer, pois os íons tem uma dimensão finita e diferente de zero. Bem como, as discrepâncias quanto aos íons de carga oposta a do eletrólito estabilizante e dos íons determinadores do potencial que por estarem em movimento no seio do líquido, não poderiam estar rigidamente ligados, a uma distância fixa, aos íons adsorvidos na superfície da partí

(*) DDP - diferença de potencial

cula. Estes fenômenos levaram a uma reformulação da dupla camada iônica, imaginando-se desta feita um modelo substitutivo com dupla camada iônica difusa, surgindo assim, os modelos modificados por Growy, Chapman e Stern e desenvolvidos por Verway e Overbuk (1948), Kruyt (1952) e Demjaguim (1954), conforme Souza Santos (1975), que procuram aplicar o conceito de forças de atração de longo alcance ao sistema para explicar as conclusões de Helmholtz.

O fenômeno da troca de cátions é muito importante em solos, principalmente na superfície das argilas que normalmente tem carga negativa, conforme Grim (1962). Mielenz e King (1955), Thornburn e Mura (1968) e Souza Santos (1975) admitem que essas cargas negativas resultam de ligações quebradas nos lados das partículas de argila, assim como de possíveis substituições de cátions na estrutura do argilo-mineral; eles propõem tal substituição também como função da "facilidade de substituição ou troca", (série lioterápica). Grim (1962) adverte que esta ordem de disponibilidade de troca catiônica não é absoluta, mas pode variar em função do tipo e quantidade do argilo-mineral presente, bem como da presença em excesso de algum íon que tenderá ser adsorvido em maior escala. Influencia também a percentagem de matéria orgânica, que exhibe capacidade de troca de cátions (C.T.C.), em geral superior a dos argilo-minerais, podendo ainda repelir cátions inorgânicos, reduzindo assim a C.T.C. dos argilo-minerais em si e aumentando às vezes a do conjunto.

2.5 - SOLO-CAL

Está razoavelmente aceita as diversas reações que ocorrem entre a cal e o solo quando misturados, TRR (1976). Troca catiônica e floculação/agregação são reações iniciais e rápidas que influenciam na trabalhabilidade, plasticidade,

massa específica aparente seca, propriedades tensão-deformação e resistência^(*) imediata, após mistura e após cura. A depender do tipo de solo pode ocorrer ou não uma reação pozolânica que consiste na formação de vários agentes cimentícios, os quais contribuem para o aumento da tensão de ruptura (RCS) e durabilidade, do sistema solo-cal e que depende também além do tipo de solo, do tipo de cal, bem como do tempo e temperatura de cura, Anday (1963), A carbonatação da cal é uma reação que pode ocorrer no sistema. Estas reações entre solo-cal tem sido descritas na literatura por: Goldberg e Klein (1952), Hill e Davidson (1960), Herriu e Mitchell (1961), McDowell (1959, 1960), Thompson (1966), Cartmell e Bergh (1969), Harty (1971), Moore (1971), Rosenberg (1974), Ola (1975, 1977), TRR (1976), Ferro (1977), Queiroz de Carvalho (1979). A seguir são sumarizados as mais importantes reações quando da mistura de cal ao solo.

2.5.1 - Troca de Cátions e Flocculação/Agregação

Quando o solo e a cal são intimamente misturados mormente em solos com capacidade de troca catiônica disponível e/ou possível, em virtude da "facilidade de substituição ou troca", Souza Santos (1975), $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Sr^{2+} > H_3O^+$ aliada a concentração de íons trocáveis e/ou adsorvidos, os cátions cálcio e/ou magnésio permutam-se com os íons presentes e/ou adsorvidos no argilo-mineral. Esta reação modifica o potencial elétrico na superfície das partículas, (potencial zeta inferior ao crítico) como resultado o sistema floccula e agrega as partículas de argila produzindo uma modificação na textura e melhoria na trabalhabilidade da mistura.

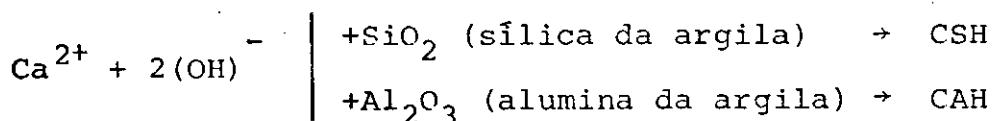
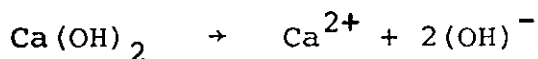
(*) tensão de ruptura à compressão não confinada

2.5.2 - Carbonatação

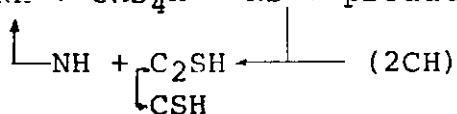
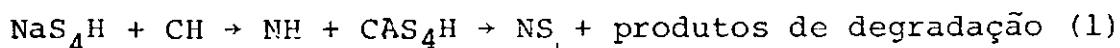
É uma reação indesejável que ocorre com a cal quando reage com o dióxido de carbono (CO_2), da atmosfera, que provavelmente reduz a elevação da tensão de ruptura (RCS) do sistema solo-cal, em diferentes graus, em virtude da formação de agentes cimentícios muito fracos e solúveis, que são os carbonatos de cálcio e/ou magnésio, dependendo do tipo de cal utilizada, a qual seria melhor utilizada na reação pozolânica Eades et alli, (1962). Deve ser uma preocupação constante nas obras afim de minimizá-la e/ou evitá-la para se obter melhores resultados na estabilização com cal.

2.5.3 - Reação Pozolânica

A reação entre cal, água, sílica e/ou alumina formando agentes cimentícios é chamada de reação pozolânica do solo-cal. Pode-se dizer com base na literatura que a cal reage com a sílica ou a alumina formando respectivamente silicato e/ou aluminato de cálcio hidratado. Segundo Transportation Research Board (1976) o que foi dito pode ser sumariado como:



Segundo Ingles e Metcalf (1973), tem-se:



(1) Como a sílica é progressivamente removida, aluminato de cálcio alumina são formados residualmente.

onde:

S = SiO₂

H = H₂O

A = Al₂O₃

N = Na₂O

C = CaO

Segundo Ingles e Metcalf (1973) o mecanismo da reação solo-cal, que é bem semelhante ao do cimento Portland, diferindo em virtude do silicato de cálcio (no cimento), obtido da hidratação do silicato de cálcio anidro que ele possui na sua composição, independentemente do tipo de solo. O que não acontece com a cal que é necessário reagir com os argilos-minerais ou com algum outro fino (provavelmente amorfos de sílica e alumina), originando silicatos e/ou aluminatos que se tornam gels, progredindo imediatamente para coibir e ligar frações de argila no solo bloqueando os poros deste. Com o tempo estes gels se cristalizam em silicato de cálcio hidratado como a tobermorita e "hillebrandite", microcristais que podem também entrelaçar-se mecanicamente. Esta reação somente será possível se houver água suficiente para carrear íons cálcio (Ca²⁺) para a superfície do argilo-mineral, e/ou colocá-los em contatos com outra provável fonte de sílica e alumina (amorfos).

Eades e Grim (1966) sugerem que com a adição de cal um alto pH é desenvolvido no sistema, proporcionando dissolução de sílica e alumina da estrutura da argila que podem reagir com os íons cálcio presentes, resultantes da ionização da cal. Diamond e Kinter (1965) postulam que o processo de reação em um meio altamente alcalino, como no sistema solo-cal, envolve a dissolução dos dados das partículas (silicatos e/ou aluminatos), seguindo-se a precipitação de produtos de reação. Diamond et alli (1966), Ormsby e Bolz (1966) tendem a admitir a idéia de que reações químicas de superfície podem ocorrer e novas fases seriam nucleadas diretamente acima da superfície das partículas de argila. Re

ferem-se também como provável "solução-precipitação e química de superfície", isto é, processo de hidratação - cristalização. Cabrera e Nwamna (1979) estudando as propriedades pozolânicas e mecanismo de reações entre cal e solos vermelhos tropicais (solos lateríticos) mostraram que o mecanismo de reação do sistema solo-cal, pode ser um processo de difusão controlada. Referem-se também à formação de outros agentes cimentícios ao lado dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, por exemplo ferro-aluminato e ferro-silicato de cálcio.

Se o solo tratado com cal é saturado com íons cálcio ou matéria orgânica o processo de estabilização é possível de não ocorrer, devido a capacidade de troca de cátions ser mínima ou não ocorrer significativamente, Queiroz de Carvalho (1979) e Souza Santos (1975). A carbonatação do solo-cal é uma reação indesejável que é possível controlar em laboratório, mas que deve ser uma preocupação constante em construções a fim de minimizá-la, se não evitá-la, pois é um uso provavelmente pouco ideal para cal que seria melhor utilizada na reação pozolânica.

Segundo o TRR (1976) e Queiroz de Carvalho (1979) os mais importantes fatores que influenciam as reações do sistema solo-cal são: tipo, origem da sílica e alumina e possivelmente ferro; (entretanto o sistema solo-cal é bastante complexo e fatores como teor de matéria orgânica ativa minimizam a reação solo-cal); o pH do solo; presença excessiva de sódio trocável; mineralogia da argila; presença de carbonatos; índices sílica/sesquióxidos (de ferro mais alumínio); índice sílica/alumina; entre outros fatores têm participação marcante nos processos de reação do sistema.

No presente momento a significância da presença do ferro na reação solo-cal não está completamente estudada, existem evidências como a anteriormente citada (Cabrera e Nwamna) da presença de agentes cimentícios compostos com ferro. Outros autores, Townsend et alii (1969), discordam e

postulam a inibição da reação solo-cal com a presença do ferro. Do que discordam outros grupos Harty e Tompson (1973), Schofield (1962), Kassiff. (1962), etc. Cartmell e Bergh (1969), estudando solos lateríticos na Niassalândia, Rodésia, verificaram que com a adição de cal estes solos apresentavam um comportamento semelhante quanto a variação no índice de plasticidade que era reduzido. O mesmo não aconteceu com Hayter, Carvius e Morgan (1966) que adicionaram 3% a 4% de cal em relação ao peso seco do solo, não havendo significativas alterações nas características de plasticidade, nem elevação no ISC*; no entanto, o trecho experimental por eles executado não apresentou sinais de ruptura após dois anos em serviço. Cartmell e Bergh (1969) com similar experiência em Zâmbia (Rodesia) citam terem obtido uma elevação na resistência, avaliada pelo ISC, com a adição de 3% de cal. Teores maiores que este apresentaram uma redução no ISC*. Harty e Cairns (1966), estudando solos lateríticos na Nigéria Oriental, referem-se que tais solos ao serem tratados com cal apresentam um comportamento pouco comum em relação ao limite de liquidez. Após misturados solo-cal foram ensaiados imediatamente e após 72 horas, em ambos os casos ocorreu uma redução no índice de plasticidade (IP). Principalmente para os ensaios realizados logo após mistura, tal diminuição se deveu a um alto gradiente descendente do limite de liquidez (LL), haja visto que o limite de plasticidade pouco se alterou e até mostrou uma certa tendência para diminuir. Esses pesquisadores relatam também uma redução na massa específica aparente seca e aumento no teor de umidade ótima do solo tratado com cal se comparado aos valores do solo sem o tratamento, (para teores crescentes de cal na mistura). Cartmell e Bergh (1969) relatam que nem sempre a redução na massa específica aparente seca e aumento do teor ótimo de umidade é diretamente proporcional aos crescentes teores de cal. Ocor

(*) Índice de Suporte California, igual a CBR

rendo às vezes para um menor teor de cal, maior umidade ótima, que para um outro teor maior de cal. Esses mesmos pesquisadores referem-se a um substancial ganho na capacidade de suporte dos solos tratados com cal, avaliado através de ensaios de Índice de suporte Califórnia (ISC) e compressão não confinada (RCS), enfatizam que o benefício na capacidade de suporte tem estreita ligação com o teor de cal e tempo de cura. Hayter e Cairns (1966) e Kassif (1962) também concordam com esse comportamento para o sistema solo laterítico-cal.

Lyon Associates Inc. (1971) após efetivarem um extensivo estudo das propriedades e desempenho de solos lateríticos da África, reportam que utilizando cal para estabilizar aqueles solos, obtiveram crescimento na resistência e durabilidade com a elevação da percentagem de cal na mistura, bem como uma considerável redução no índice de plasticidade. Referem-se também que os solos estudados (de várias partes da África) responderam de diferentes formas à adição de cal. Harty e Thompson (1973) referindo-se aos fatores que afetam a reação pozolânica de solos tropicais e subtropicais em solos classificados como oxissolos e ultissolos. Após a realização de análise estatística relatam que parâmetros como: teor de sílica; alumina; coeficiente sílica/sesquióxidos e sílica/alumina; não afetam significativamente a reatividade à cal LR^(*) para os oxissolos. Enquanto a reatividade à cal nos ultissolos foi significativamente afetada pelo teor de sílica, coeficiente sílica/sesquióxidos e teor de ferro. Justificaram a diferença no comportamento dos ultissolos e oxissolos como decorrente do intemperismo a que os solos foram submetidos. Nos oxissolos o índice sílica/sesquióxidos mostrou-

(*) este parâmetro é determinado pela diferença entre a máxima tensão de ruptura à compressão não confinada do solo-cal e do solo natural moldado no teor de umidade ótima.

se significativa com o índice de intemperismo. Para os ulti solos o pH foi melhor correlacionado. Como conclusão deste estudo estes pesquisadores relataram que os solos tropicais e subtropicais, são solos intemperizados e que a reatividade à cal não poderia ser prevista através de uma única proprie dade, mas embasada no conhecimento de outras propriedades intrínsecas do solo.

Towsend et alli (1969) estudando os efeitos da mol dagem de solos lateríticos, referem-se a ocorrência de bene fícios, visto que existe incremento da resistência, que eles atribuíram ao esfacelamento dos sesquióxidos que recobrem a superfície das partículas (ou até grumos) de argila, aumen tando a percentagem de finos, que por sua vez reduzem a ação abrasiva (atrito entre partículas) do sistema. Estes pesqui sadores estudando a influência dos sesquióxidos nas proprie dades dos solos lateríticos, concluíram: que existem fortes evidências de que os sesquióxidos reduzem a reatividade à cal desses solos; que sua extração minimiza também importantes reações do sistema solo-cal; que a retirada dos sesquióxidos modifica as características dos componentes amorfos; que os amorfos de sílica e alumina são os maiores fomentadores das reações de estabilização.

Ola (1977), pesquisando solos lateríticos da Nigê ria, objetivando detectar o potencial da estabilização com cal nestes solos, relata que adição de cal melhora as carac terísticas de engenharia dos solos como: acentuado aumento no limite de plasticidade e leve aumento no limite de liqui dez com conseqüente redução do índice de plasticidade, cre scimento da resistência avaliada pelo RCS e ISC. Sugeriu que a elevação dos valores da resistência, como provável decor rência da formação de agentes cimentícios silicatos e/ou alu minatos de cálcio.

Queiroz de Carvalho (1979), estudando as proprie dades que afetam a estabilização de solos lateríticos do Nor deste do Brasil, com cal, conclui que os limites de Atter

berg, teor de argila, massa específica aparente seca, teor total^(*) de sílica, alumina e óxido de ferro, óxido de ferro amorfo, entre outros, não são estatisticamente significantes na reatividade à cal desses solos, influenciando no entanto de diferentes formas na mesma. Por outro lado, são muito importantes, pela sua significancia estatística, na reatividade à cal o teor de sílica amorfa, em maior amplitude que os demais, o teor total (*) de alumina na fração argila (isto na forma cristalina e amorfa), o pH e a capacidade de troca de cá tions dependente do pH, (CTC pH₁₀ - CTC pH₇).

Contudo de uma forma completa, as reações do solo-cal até o momento não estão bem conhecidas, necessário se faz empreenderem-se pesquisas de laboratório e campo de forma a propiciar o desenvolvimento de uma tecnologia que permita decisões mais refinadas para tratamento de solos com cal muito principalmente para as regiões de clima tropical.

2.6 - SOLO-NAOH E SOLO-CAL + TRAÇOS DE NaOH

A literatura revisada, Thornburn e Mura (1969) indicou a utilização de NaOH e KOH como sendo os álcalis (bases), que têm sido estudados com mais frequência. O seu uso tem sido referenciado como aditivo secundário para acelerar tratamentos de solos com cimento, cal, cal-cinza volante e como aditivo primário para solos lateríticos.

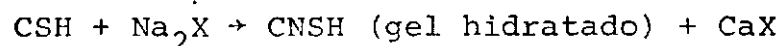
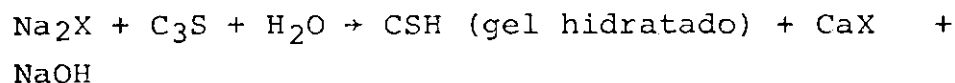
Segundo Wissa e Halaby (1964), resumindo trabalhos anteriores realizados pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) são os seguintes os efeitos do NaOH em solo-cimento e solo-cal:

(*) na forma cristalina mais amorfos

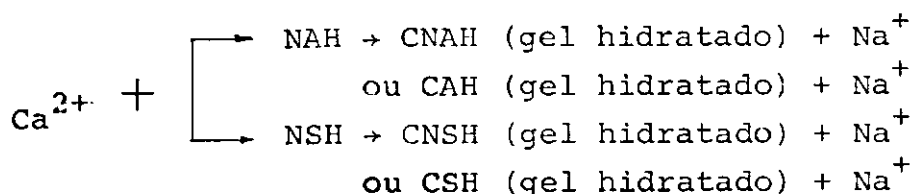
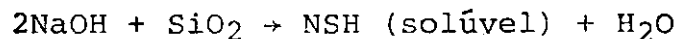
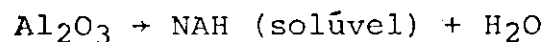
- a) os efeitos dos compostos de sódio variam com o tipo do solo e esta efetividade diminui com a elevada plasticidade e teor de matéria orgânica no solo;
- b) incorporação de NaOH e outros sais ou álcalis metálicos incrementam a resistência^(*), se formam sais insolúveis com o cálcio, bem como a resistência a água^(**) e durabilidade (ciclagem, secagem e moldagem) sendo a concentração ótima de álcali função da quantidade de cal, ou cimento adicionada ao solo (aditivo primário), podendo as vezes se usado em teores muito elevados, (solução de sílica e alumina precipitada), minimizar os efeitos daqueles aditivos (cal, cimento).

A provável reação quando da adição NaOH ou Na₂X ao solo-cimento é a seguinte: (segundo Lambe, Moh et alli (1959)(1962)

- com cimento



- com a sílica ou a alumina do solo:



(*) tensão de ruptura à compressão não confinada

(**) não desagregação quando imersos sem confinamento

onde:

- S = SiO₂
 N = Na₂O
 H = H₂O
 A = Al₂O₃
 C = CaO

Como consequência da incorporação tem-se segundo Wissa e Halaby (1964):

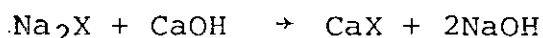
- a) aumento do pH, economizando C₃S₂HX^(*) e hidrolizando CSH, bem como aumento na permuta e intensidade da quantidade da sílica e/ou alumina solubilizada, resultando uma elevação na quantidade e melhor distribuição do gel cimentício (CSH entre outros);
- b) ocorrência de redução na concentração do íon cálcio e aceleração na dissolução de C₃S (silicato tri cálcico) do cimento resultando numa firme estabilização. Retardamento na precipitação do gel silicato de cálcio com apreciável quantidade de sódio (CNSH), que tem um grande volume e endurece rapidamente após formado.

Resumindo: a atividade do íon cálcio é grandemente reduzida e a concentração do íon OH⁻ (ou outro ânion) é bastante elevada, bem como o pH do sistema. A formação do silicato de cálcio, insolúvel, é retardada devido a suspensão do íon Ca²⁺ e a formação de silicatos alcalinos é acelerada (alto pH). O volume de gels hidratados, silicatos e/ou aluminatos é aumentado ficando este material, cimentício, disponível para difusão nos poros como fluido.

Chastanet (1959), Somosekhara (1960) e Davidson et alli (1960), sugeriram que o NaOH pode funcionar como um ca

(*) X - ânion do composto formado com sódio

talizador na mistura solo-cal ou solo-cal-cinza volante. Tal ocorre através do provável mecanismo. Consoante estudos de Laad, Moh e Lambe (1960) (Solo-Cal-NaOH), a adição de compostos de sódio do tipo Na_2X (X é sulfatos, carbonatos ou aluminatos) ao solo-cal ou solo-cal-cinza volante, reduz grandemente a concentração do íon cálcio na solução pelo efeito simplesmente do íon ou pela reação de causticização que pode ser:



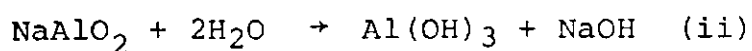
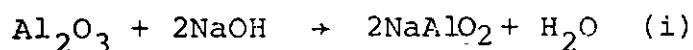
Em primeira instância com a elevação do pH, ocorre uma redução na concentração de íon cálcio, com conseqüente retardamento na precipitação de silicato de cálcio. Com a elevação do pH, aumenta a aceleração do ataque a sílica ou alumina do solo, com a formação de silicato e/ou aluminato de sódio, solúvel, que tem liberdade para difundir-se no meio. Possível redução no pH do sistema, em virtude da neutralização de álcalis livres que reagem com o solo, permite ao íon cálcio reagir com os silicatos e/ou aluminatos distribuídos, formando agentes cimentícios insolúveis, silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratados, mais hidróxido de sódio (NaOH) livre, que poderá ainda interagir com sílica e alumina não atacada, incrementando novo ciclo, se possível.

Resumindo: o inicial ataque da sílica e/ou alumina produz silicatos e/ou aluminatos de sódio intermediários, que reagem subseqüentemente com íons cálcio formando gels cimentícios insolúveis, silicatos e/ou aluminatos de cálcio mais hidróxido de sódio, que fica livres para reagir com sílica ou alumina que não reagiu anteriormente (remanescente). De uma maneira generalizada o NaOH eleva a quantidade de íons hidroxila (OH^-) e acelera a possível reação pozolânica em decorrência da formação de compostos com sílica e alumina do solo, que ficam em disponibilidade para formação de gels cimentícios.

A literatura revisada indicou que os compostos químicos de sódio têm também sido usados como aditivos primários

rios, mormente em "growt". Assim é que: Sandegren (1971) rela ta experiências de campo para verificar as variações nas pro priedades de engenharia de solos na Alemanha; Também Brandl (1971) estudou as modificações oriundas da adição de compos tos químicos, e verificou a relação entre as propriedades químicas e físicas de solos estabilizados; Hurley e Thorn burn (1971), descrevem numa revisão de literatura sobre esta bilização de solos com silicato de sódio; Katti et alli (1970) estabilizaram argilas marinhas com aditivos inorgâni cos; Irby (1972) investigou o uso de compostos químicos para controle de expansão de argilas. Chadda e Uppal (1971), estu dando lateritas da Índia, citam provável estabilização da mesma através do uso de álcalis; Ingles (1970) citado por Ingles e Metcalf (1973) propôs mecanismo de estabilização com o uso de ácidos e álcalis inorgânicos.

Segundo Chadda e Uppal (1971) os solos lateríticos que são ricos em alumina, mas não em tal percentagem que jus tifique uma extração econômica de alumínio, são passíveis de uma estabilização com álcalis, tal se deve ao conhecimento de que, o gel alumina aumenta a resistência (*) e reduz os efeitos de amolecimento provocados pela água, quando presen te em quantidade satisfatória nos solos, como também da gran de solubilidade da alumina em soluções alcalinas, mormente de hidróxido de sódio (NaOH), daí a possível viabilidade de transformar-se o alumínio dos solos lateríticos em hidróxido de alumínio (Al(OH)₃). Baseando-se nessas pesquisas sugeriu a equação a seguir como provável:



Assim sendo o hidróxido de sódio (NaOH) reage com a alumina (Al₂O₃) formando aluminato de sódio (NaAlO₂) em primeira

(*) tensão de ruptura à compressão não confinada

instância. O aluminato de sódio (NaAlO_2), que é instável hidrolisa-se e forma o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) que é gelatinoso e tem efeito cimentante mais hidróxido de sódio (NaOH) que permanece disponível para novas interações com o alumina e/ou sílica, podendo estes últimos solubilizarem-se e formarem com o álcali adicionais agentes cimentícios. Em condições adequadas o hidróxido de alumínio poderá transformar-se em alumina trihidratada que poderá fornecer adicional incremento a tensão de ruptura (RCS) do sistema. Como provável decorrência desse mecanismo apresentam dados com ganho de resistência e melhoramento da resistência ao amolecimento em água. Tais assertivas não tem respaldo em nenhum outro trabalho.

Thornburn e Mura (1968), revisando a literatura referem-se a limitações quanto ao uso do NaOH em sistema solo-cal, inicialmente quanto a temperatura de cura, que segundo Mateos e Davidson (1961) pode modificar bastante os valores da resistência final, referem-se também como não econômicos teores de NaOH maiores que aproximadamente 1%, bem como, possíveis causadores de ruptura por expansão do sistema, se adicionado em teores muito elevados.

Lambe et alli (1959), pesquisando solos de países temperados com cimento e traços de compostos de sódio resumiu: a resistência do solo-cimento pode ser retardada pela presença de alta concentração de compostos de sódio, mas um completo benefício poderá ocorrer após longo tempo de cura; que a concentração ótima de aditivo (derivados de álcalis) para pequeno tempo de cura deve ser mínima, para obter-se o máximo benefício da adição do álcali; que o grau de efetividade dos aditivos diminuem com a plasticidade e teor de matéria orgânica do solo. Ladd et alli (1960), referem-se à adição de silicato de sódio para inibir a atividade da matéria orgânica. Kozan e Feniwek (1965), referem-se ao uso de NaOH como aditivo secundário para mistura de solo-cal, onde ocorreram variações na massa específica aparente seca do sistema, que foi incrementada. Handy (1960) também refere-se para so

lo-cimento, à elevação da massa específica aparente seca do sistema, em virtude do uso de traços de NaOH. Estes pesquisadores são unânimes nas modificações, elevação de massa específica aparente seca, contudo não foram obtidas correlações significativas entre este parâmetro e a resistência^(*) em ambos os sistemas solo-cal e solo-cimento.

Davidson et alli (1959), Lambe (1959), Laguros e Davidson (1963), Mateos e Davidson (1961), Ladd (1960), Handy et alli (1960), Chadda e Uppal (1971), referem-se a adição de NaOH como aditivo secundário e/ou primário ocorrendo sempre um benefício na resistência^(*), massa específica e/ou durabilidade e/ou permeabilidade entre outros parâmetros. Sendo fatores preponderantes: tipo de solo; condições de cura; presença de matéria orgânica; tipo do aditivo primário (da cal e/ou do cimento) e concentração do álcali.

Ingles e Metcalf (1973), relatam como desvantagem do uso do hidróxido de sódio (NaOH), como aditivo primário, o fato dele ser extremamente corrosivo, podendo causar irritações na pele de quem o usa somente com leve contato, bem como, devido a sua carbonatação na presença do dióxido de carbono do ar, reduzindo sua reatividade.

Duarte (1961) utilizando solução de NaOH, para impermeabilização de canais para irrigação, no sul do Brasil, com teores de 0,45% e 0,60% conseguiu reduzir as perdas por infiltração dos canais em 16% sugerindo que devem ser umedecidos os canais antes da aplicação das soluções, resultados semelhantes foram obtidos na Universidade de Viçosa (MG).

O estado atual de conhecimento do uso do hidróxido de sódio (NaOH), em solos suscita investigações que devem ser realizadas objetivando detectar o comportamento dessa mistura, principalmente nos solos vermelhos tropicais.

(*) tensão de ruptura à compressão não confinada

2.7 - SOLO-NaCl

A revisão bibliográfica indicou, ser o cloreto de sódio (NaCl), utilizado antes de 1936, HRB (1936), sendo bastante empregado no Canadá, New York e Maryland a esse tempo, mormente para redução de pó, conforme Looker et alli (1938). Lee (1941), revela a impermeabilização de um lago na Islândia com NaCl reduzindo em 90% a permeabilizade. Belcher (1941) realiza um dos primeiros trabalhos de campo com a utilização de NaCl entre outros aditivos de forma racional e controlada. Rosenquist (1953) relata o uso de NaCl em argilas rápidas, que adquirem resistência podem ser remoldadas e modificam-se, passando à uma argila média a rija, tendo sido, elevado seu limite de liquidez. Diversos trabalhos são então publicados entre outros: Kelly (1953); Hazam (1953); Hilmay e Elgaby (1954), Bolt (1955); Saubern (1956); Frank (1957); Bower e Goertzen (1958); MIT (1958); McLeland (1960); Sheeler (1961); Oyyun (1962); Funada et alli (1963); Kozan e Pimentel (1965); Fiedelman (1966); Ducan (1966) Thornburn e Mura (1968), de mais de 1.000 trabalhos publicados onde é evidenciada a aplicabilidade de NaCl. Pesquisas executadas no laboratório e no campo revelam a utilização desse sal e/ou CaCl_2 com resultados profícuos.

De forma geral uma vital fonte de informações concernentes à reações de solo com compostos químicos, podem ser encontradas nos jornais de agricultura, pois muitos efeitos da adição de sais e bases aos solos podem ser previstos ou explicados com base no conhecimentos da química do solo.

Muitos sais por exemplo: NaCl; CaCl_2 ; NaNO_3 ; NaHCO_3 ; NaH_2PO_4 ; Na_2CO_3 ; Na_3PO_4 ; BaCl_2 ; MgCl_2 ; KCl; KMnO_4 ; Na_2SiO_3 , etc., têm sido estudados como estabilizantes em laboratório, no entretanto devido ao péssimo desempenho, economia (custo) e falta de tecnologia somente o NaCl, CaCl_2 , Na_2SiO_3 têm sido usados com maior frequência, mormente em estradas para

redução de pó e "frost heave" (expansão devido ao congelamento).

O cloreto de sódio (NaCl) atua no solo provavelmente através de reações físico-químicas, assim sendo as propriedades concernentes ao mesmo serão a seguir descritas. O NaCl é normalmente fornecido comercialmente no estado seco consistindo de cristais de granulometria variável de acordo com o processo para sua obtenção sendo higroscópico. Possui a propriedade de reduzir o ponto de congelamento de uma solução. É razoavelmente solúvel em água atingindo nas condições CNTP até 357 g/litro (em água). Eleva grandemente a tensão superficial da água, quando presente em apenas 1 V. (1 a 2 dinas/cm para 72 a 75 dinas/cm a 20°C). Reduz bastante a pressão de vapor quando em solução com água. Possui uma higroscopicidade que pode absorver até 80% de água, O'Flaherty (1974).

A excelente higroscopicidade e delinquecência dos cloretos são propriedades importantes, particularmente em climas secos, onde a umidade evaporada nas estradas durante o dia pode ser readquirida durante a noite. Ocorre também que a estabilidade mecânica emprestada ao solo pela coesão da água é mantida, advindo daí um provável benefício da mistura de NaCl ao solo.

Segundo Thorburn e Mura (1968) e O'Flaherty (1978), o cloreto de sódio, (NaCl), reduzindo a pressão de vapor e aumentando a tensão superficial da água adicionada ao solo minimiza a evaporação e por conseguinte o movimento de umidade no sistema, bem como, a possível cristalização do NaCl na superfície e poros do solo reduz o movimento de água na fase líquida. Qyyum e Kemper (1962), preconizam, que o índice de evaporação é inversamente proporcional à espessura da camada seca e que após inundação da superfície seca, os sais presentes formam uma solução que emigra para o interior da massa, promovendo o intumescimento da argila retardando o movimento de água no solo.

Sheeler (1961), descreve a considerável redução do levantamento do solo devido ao congelamento "frost heave" em

virtude do abaixamento da temperatura e do ponto de congelamento do sistema solo-água, com a adição de NaCl (e outros sais), bem como o decréscimo da permeabilidade do solo. A influência da redução do ponto de congelamento acima referida é também ratificada por outros autores como: Funada (1963); Gow (1961); HRB (1936).

Como referido anteriormente, a estabilização com sais é muito provavelmente obtida através de reações físico-químicas, assim sendo deve ser considerada em duas etapas. Uma física onde interferem as forças elétricas atuantes nas partículas, ladeado pelas propriedades intrínsecas do NaCl, como higroscopicidade, deliquescência, redução da pressão de vapor do ponto de congelamento da solução aquosa e aumento da tensão superficial desta solução. Outra, química decorrente das trocas cationicas prováveis e formação de novos compostos.

Bolt (1955), Hilmy e Elgaby (1954), trabalhando com solos de clima temperado, que possuíam Ca^{2+} e Mg^{2+} (cálcio e magnésio) como íons adsorvidos e portanto alto valor de pH e considerando que Na^+ é substituído por Ca^{2+} , (mas em extensão limitada) mostraram que, se 1% de NaCl (em relação ao peso seco) for adicionado a um solo rico em cálcio ter-se-á 10% a 12% de Na^+ adsorvido e que se 2% de NaCl é adicionado, 22% de Na^+ será adsorvido. Sanborn (1956), questiona não somente, como também a habilidade de Na^+ substituir Ca^{2+} , K^{2+} , Mg^{2+} , etc, devido ao baixo valor do Na^+ na escala de atividade^(*), bem como aos benefícios por ele empregado se adsorvido. Em algumas circunstâncias existem pontos que evidenciam ter o Na^+ adsorvido efetivo desempenho na estabilização de solos. Thornborn e Mura (1968) e Mainfort (1968).

(*) série lioterápica, Saw (1975).

Gow et alli (1961), Marley e Sheeler (1963), McLe land (1964) e Salt Institute (1954), entre outros, têm preconizado que adição de NaCl incrementa a massa específica a parente seca do solo, comportamento este justificado pela soma da massa dos cristais. Uma completa oposição a essa premissa é feita pelos pesquisadores Ogana (1963), Purdue University (1955), Sanborn e Yoder (1956), que explicam a elevação da massa específica do sistema solo-NaCl, como decorrência do enchimento dos espaços vazios entre as partículas em virtude da dispersão da estrutura do solo e orientação das partículas, que dessa forma elevam a massa específica aparente seca. O'Flaherty (1978) relata que como os cloretos são bons lubrificantes pode-se obter a requerida massa específica aparente seca, se estes forem adicionados ao solo, com menor energia do que se somente for utilizada água. Preconiza também que uma compactação pela ação do tráfego é possível de ocorrer, (após um longo período de tempo posteriormente a compactação), em virtude da minimização da evaporação.

Os efeitos do NaCl sobre os limites líquido e plástico dos solos variam bastante com o tipo do solo consoante assertivas de: Funada (1963); Katti e Barve (1962); Sanborn e Yoder (1956); Zolkov (1962); Thorbourn e Mura (1968); O'Flaherty (1978), preconizam que a adição de NaCl ao solo em geral resulta em uma elevação no índice de plasticidade, devido à habilidade do íon sódio Na^+ se tornar altamente hidratado no tempo frio, advindo daí uma possível impossibilidade do uso de NaCl em climas temperados para estabilizar certas bases de rodovias com solo agregado. Looker et alli (1938), Sanborn e Yoder (1956) e Zolkov (1962), referem-se a elevação do limite de contração e redução da contração volumétrica ou linear. A elevação da efetividade do tratamento com NaCl tem maior durabilidade se o solo tratado possui alto valor de limite de liquidez, conforme Thorbourn e Mura (1968).

Looker et alli (1938), Marley e Sheeler (1963), re

ferem-se, que as variações físicas, em conjunção com uma resistente superfície, e redução nas variações de umidade, evitam o desalojamento dos agregados graúdos e propiciam um melhor embricamento das partículas na superfície de rolamento sob a ação do tráfego.

O'Flaherty (1978), refere-se a uma possibilidade de em tempo seco, o NaCl cristalizar-se na superfície da rodovia e em consequência disso formar uma dura crosta, que é capaz de resistir a uma razoável abrasão causada pelo tráfego.

A resistência é também aumentada com a adição de NaCl, sendo este aumento ainda discutível. McLeland (1964), Ogawa et alli (1963) e Zolkov (1962) entre outros apresentam dados que sustentam essa premissa. Sanborn e Yolder (1956), preconizam que o ganho de resistência, somente ocorre, se a elevação da massa específica aparente seca é obtida a baixos teores de umidade. Rosenquist (1953), refere-se a ganhos de resistência em argilas rápidas quando remoldadas com adição de NaCl. Segundo Thorborn e Mura (1968) as variações na resistência, como também na plasticidade avaliadas através os limites de Atterberg, dependem muito do tipo de solo sua composição mineralógica entre outros parâmetros. Marley e Sheeler (1963), referem-se a uma provável cimentação do NaCl com o solo, mas pesquisadores da Purdue University (1955), sugerem que tal efeito é devido a floculação de coloides. Gow, Davidson e Sheeler (1961), mencionam uma possível cimentação em decorrência da solubilização de "calcários e magnesianos" em soluções de cloretos, resultando na precipitação de carbonatos cimentícios. Este tipo de cimentação, se faz presente haja visto que McLeland (1964) obteve valores de resistência à compressão ao estabilizar pedregulhos calcáreos com NaCl.

Sheeler (1961), entre outros, asseveram que a adição de NaCl ao solo, reduz em tempo seco o pó das rodovias e há muitos anos foi bastante usada em estradas próximas à

costa (marítima), sendo o grau de benefício função, em parte do tipo de solo, bem como da adesão ou não das partículas uma as outras. Sendo tal assertiva muito discutida^(*).

Marks e Haliburton (1970), Drake e Haliburton (1972) e Ozier e Moore (1977), aceleraram a cura de misturas solo-cal com traços de NaCl, sendo que teores acima de um otimo, influem negativamente na resistência final do sistema. A variação da resistência versus teor de NaCl, obtida por Mateos e Davidson (1961) é do tipo parabólico com máximas resistências a 7, 28 e 120 dias de cura, com 1% de NaCl. Mateos e Davidson (1961) relatam que a adição de NaCl a misturas solo-cal e cinza volante elevou a resistência imersa nos solos tratados (resultados obtidos, com solo areno argiloso) e que o benefício da adição de NaCl decresce com a percentagem de argila no solo.

Nesta altura, verifica-se não se possuir, ainda, um conhecimento do mecanismo de cimentação e sob que condições ocorre, sendo assim muito difícil predizer os efeitos do NaCl com redutor de pó ou incrementador de resistência. Cloreto de sódio (NaCl) pode ser bastante benéfico como redutor de congelamento em solos ou em agregados que possuam suficiente material fino para interagir. Em geral não reage bem com solos com altos teores de matéria orgânica. A adição de NaCl a solos ou agregados do tipo acima referidos tem seu mais alto grau de importância, se um bom produto de estabilização pode ser obtido e varia demasiadamente com o tipo de solo.

O teor de NaCl nas misturas variam de 0,5% a 3,5% do peso do solo seco, sendo mais frequentemente usado os teores de 0,5% a 1%, é necessário graduar-se a mistura (próximo curva de Fuller's) que deve ter uma razoável quantidade de finos (5% a 15%), com índice de plasticidade entre 5% a 10% para superfícies de rolamento e 0% a 6% para bases, segundo

(*) conforme Thornburn e Mura (1968)

do a experiência em países com climas temperados, Thornburn e Mura (1968).

CAPÍTULO III

OBJETIVOS DA PESQUISA

Foi mostrado no capítulo anterior, que são ainda insuficientes os resultados de pesquisas relativas aos fatores que influenciam a estabilização de solos lateríticos com cal, hidróxido de sódio (NaOH), cloreto de sódio (NaCl) e cal + traços de NaOH. Foi também mostrado, que os dados disponíveis referem-se mormente a pesquisas desenvolvidas, com solos de clima temperado e/ou frio, os quais se comportam diferentemente dos solos de clima tropical e/ou quente.

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar o comportamento de cinco solos vermelhos tropicais, oriundos do Norte e Nordeste do Brasil, quando se lhes adiciona teores (*) (em relação ao peso do solo seco) de: 0,3; 0,5; 1,2; 2,4 e 3,0% de hidróxido de sódio (NaOH); 1,2; 2,0 e 3,0% de cloreto de sódio (NaCl) e 1,0; 4,0; 7,0 e 10% de cal hidratada.

Analizar-se-á particularmente os seguintes aspectos:

1. a influência dos álcalis NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e do sal (NaCl) nas propriedades de plasticidade, dos solos estudados, avaliada através dos limites de Atterberg, comparada às do solo natural;

(*) Teores desta ordem são citados por: Mateos e Davidson (1961), Chadda e Uppal (1971), Sheeler (1961), McLeland (1964), Thornburn e Mura (1963), Marke e Haliburton (1977), Tompson (1966), Harty (1971), TRR (1976), Ferro (1977), Queiroz de Carvalho (1979).

2. o comportamento dos solos estudados, em termos da relação entre a massa específica aparente seca e teor de umidade de moldagem (compactação, energia equivalente ao Proctor Normal 6,05 kg.cm/cm³) quando tratados com NaOH, NaCl e cal hidratada, nos teores anteriormente relacionados, comparado ao solo natural;
3. as variações na tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS), após terem sido os solos em evidência tratados com NaOH, NaCl e cal hidratada e curados em câmara úmida por 27 dias e imersos em água por 1 dia;
4. a influência de traços 0,3% e 1,2% de hidróxido de sódio (NaOH) nos solos tratados com cal, no concernente ao tempo de cura, 7, 28 e 90 dias, avaliada através as modificações na tensão de ruptura à compressão não confinada;
5. a interação dos sistemas solo-cal; solo-NaOH; solo-NaCl e solo-cal+traços de NaOH, com algumas propriedades intrínsecas e de engenharia dos solos, através de análise estatística (análise através correlação e regressão linear simples utilizando-se um programa de estatística para computador, o SPSS (Statistical Package for the Social Sciences - SPSS - versão - H.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve os materiais utilizados na pesquisa: a cal hidratada; o hidróxido de sódio (NaOH); o cloreto de sódio (NaCl); a água; os solos, seu meio ambiente e as características das regiões de onde os mesmos são originários; o programa e a sistemática de amostragem das jazidas.

4.2 - CAL

Foi utilizada uma cal hidratada, conhecida comercialmente como "cal Socal", fabricada pelo processo por via seca, a partir de rochas calcárias, na cidade de Queimadas no Estado da Paraíba.

A cal chegou ao laboratório acondicionada em sacos de papel Kraft, 3 camadas, tendo sido retirada da embalagem original e colocada em seguida em recipientes plásticos que foram lacrados em seguida, afim de não alterar as propriedades da mesma.

4.3 - HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

Utilizou-se um hidróxido de sódio (NaOH) do tipo comercial

cial, denominado "Sóda Caústica Soecia" com textura em escamas, acondicionada em recipientes herméticos.

4.4 - CLORETO DE SÓDIO (NaCl)

Foi utilizado um cloreto de sódio (NaCl) do tipo comercialmente conhecido como sal grosso, obtido através da evaporação da água do mar, pelo conhecido processo das salinas solares, produzido com o nome de sal grosso Mossoró, oriundo do Estado do Rio Grande do Norte. Não deionizado e sem antiumectante, pulverizado no laboratório e com granulometria menor que 0,15mm.

4.5 - TIPO DE ÁGUA UTILIZADA

Com o escopo de minimizar a inserção de variáveis não controladas, utilizou-se água destilada e deionada (onde aplicável).

4.6 - SOLOS

Para o presente trabalho foram selecionados cinco ocorrências de solos vermelhos tropicais (solos lateríticos), dos Estados da Paraíba, Piauí e Pará, cujo posicionamento geográfico encontra-se na Figura 4.1.

4.6.1 - Seleção, Prospecção e Identificação das Amostras de Solos



Figura 4.1 - Localização Geográfica das Jazidas Seleccionadas para a Pesquisa.

A seleção das amostras foi realizada objetivando-se cobrir uma razoável gama de tipos de solos lateríticos, que ocorrem na região, sendo utilizados os seguintes critérios: Experiências e informações locais sobre seu uso em engenharia, aspectos geoclimáticos e comportamento quando o mesmo já tenha sido utilizado como material de construção geotécnica.

As amostras foram retiradas de taludes verticais, cujos perfis geológicos são mostrados nas Figuras 4.6.2, 4.6.3, 4.6.4, 4.6.5 e 4.6.6, para tal foi inicialmente feita uma severa limpeza no perfil, objetivando retirar a camada superficial (onde necessário) e a parte de topo intemperizada, evitando-se assim a contaminação das amostras. No transporte das mesmas, preocupou-se em evitar a perda de finos a fim de não descaracterizá-la.

As amostras são consequência de material dos horizontes B e/ou C, conjuntamente e onde aplicável.

As amostras foram identificadas por abreviaturas, compostas por quatro letras maiúsculas: as duas primeiras dizem respeito ao nome do local de onde foram retiradas, cidades ou lugarejos; as seguintes à abreviatura do Estado de onde a mesma é originária. Assim sendo, tem-se:

TEPB - Solo da jazida de Teixeira no Estado da Paraíba

CTPB - Solo da jazida de Cuité no Estado da Paraíba

ARPB - Solo da jazida de Areia no Estado da Paraíba

CAPI - Solo da jazida de Castelo no Estado do Piauí

MOPA - Solo da jazida de Mosqueiro no Estado do Pará.

4.6.2. - Jazida de Teixeira - TEPB

1. Localização

A jazida de Teixeira está localizada no bordo esquerdo da rodovia PB-306, sentido Teixeira - Princesa Isabel, a 8 km da cidade de Teixeira.

2. Formação Geológica

A jazida está inserida na formação Serra dos Martins. Esta formação consiste de sedimentos argilosos, arenitos solidificados, arenitos ferruginosos, antigos, fortemente cimentados por limonite, bem como, uma capa de pedra canga, laterita fossilizada, Lucena (1976). A litologia desta formação indica que provavelmente foi dela que se originou a formação Barreiras, pela deposição fluvial Beurlen (1964). A formação Serra dos Martins é datada do Terciário e repousa sobre terrenos do Pré-Cambriano, MINTER (1972).

O perfil geológico é mostrado na Figura 4.6.2.

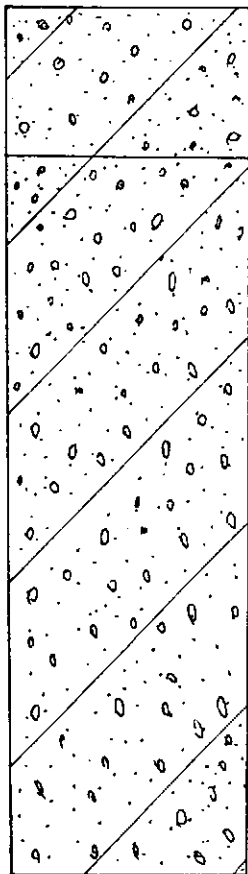
3. Pedologia

O solo da região de Teixeira é classificado como REC3 (Regosol Eutrófico e Solos Leitólicos Eutróficos), com textura arenosa. Consoante o "Mapa Exploratório - Reconhecimentos de Solos" do Estado da Paraíba do Ministério da Agricultura, MINTER (1972).

4. Clima e Precipitação

Segundo a classificação bioclimática de Gaussen, a região de Teixeira pode ser considerada como Xeroquimênica, sub-grupo Termoxeroquimênica de caráter acentuado

- Localização:** Município de Teixeira-Pb, bordo esquerda da Rodovia PB-306 a 8 km deste
- Clima** : Segundo Gaussen, Xeroquimênica (Termoxeroquimênica de caráter acentuado 4 ath) Índice Xerotérmico 100 - 120
- Precipitação Média Anual:** 500mm
- Temperatura Anual:** T. Médio - 28°C
T. Mínimo - 15°C
- Vegetação** : Caatinga Arbórea Aberta ou Densa (árvores caucifólias)
- Pedologia** : REC3 (Regassol Eutrófico e Solos Litólicos Eutróficos, Textura Arenosa)
- Geologia** : Formação Serra Martins/Terciário



Material areno-argiloso com cascalho laterítico
Espessura entre 0,20m e 0,30m

Solo areno-argiloso fino, de cor variegada (vermelho, amarelo e branco) com grande quantidade de concreções miúdas. Espessura observada no corte, média de 2,70m

FIGURA 4.6.2 - Jazida de Teixeira/TEPB - Características Geoclimáticas e Perfil Geológico.

(4aTh), denominada no Brasil como região tropical quente de seca acentuada com índice xerotérmico igual 130.

Segundo Koppen do tipo AW, quente e úmido com chuvas de verão-outono.

A precipitação média anual na região é de 500mm, MINTER (1972).

4.6.3 - Jazida Cuité - CTPB

1. Localização

A jazida Cuité localiza-se no bordo direito da rodovia PB-149, a 700m da entrada da cidade de Cuité. Fisio graficamente encontra-se na Borborema Oriental, Lucena (1976) e IPR/DNER/UFPB/(1980)

2. Formação Geológica

Os sedimentos litológicos da jazida de Cuité indicam a sua inserção na Formação Serra dos Martins, já descrita no item 4.2.6.2.

O perfil geológico é mostrado na Figura 4.6.3.

3. Pedologia

O solo da região de Cuité é classificado como LV e I (Leatrol Vermelho Amarelo Eutrófico), com textura argilosa, MINTER (1972).

4. Clima e Precipitação

Bioclimaticamente, segundo a classificação de Gaus sen pode-se enquadrar a região em que se encontra a jazida Cuité, como Xerotérica, sub-região Termomediterrânea de caráter médio (3bTh), denominada no Brasil de Mediter

râneo ou Nordéstico quente de seca média, com índice xero térmico variando de 100 a 150, apresentando de 5 a 6 meses secos.

Segundo a classificação de Koppen a região pode ser dita como do tipo climático Bsh, semi-árido quente.

A precipitação média anual da região está em torno de 400mm, Lucena (1976), MINTER (1972) e IPR/DNER/UFPB (1980).

4.6.4 - Jazida Areia - ARPB

1. Localização

A jazida Areia localiza-se no bordo esquerdo da rodovia PB-079 no sentido Remígio-Areia a 5 km da cidade de Remígio. Encontra-se na zona fisiográfica do litoral e da mata, Lucena (1976), Beurlen (1964) e IPR/DNER/UFPB (1980).

2. Formação Geológica

Os sedimentos litológicos da jazida indicam sua inserção no Prê-Cambriano (CD), representado na Paraíba por gnaisses e migmatitos que ocorrem associados com granitos, mica-xistos e veios de quartzo.

O perfil geológico encontra-se na Figura 4.2.6.4.

3. Pedologia

O solo da região de Areia é classificado como PE 13, com o horizonte A preeminente, textura argilosa e solos Litólicos Eutróficos com A preeminente, textura média, IPR/DNER/UFPB (1980).

4. Clima e Precipitação

Localização: Município de Cuité-Pb, bordo direito da rodovia PB-149 a 700m deste.

Clima : Xerotérica, (Termomediterrânea de caracter médio 3bTh) Nordéstico quente de seca média. Índice Xerotérmico - 100 - 150mm - Segundo Gausen

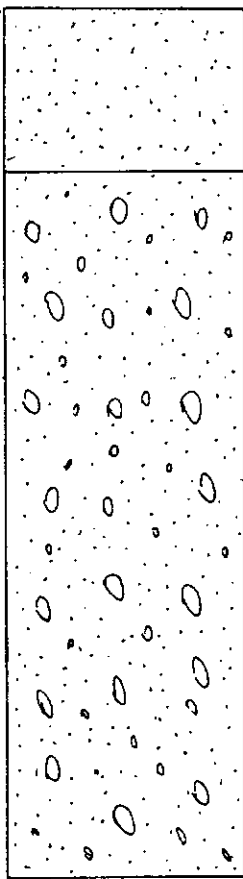
Precipitação Média Anual: 400mm

Temperatura Anual: T. Médio: 28°C
T.Mínimo: 17°C

Vegetação : Caatinga Arbóreo Densa ou Aberta

Pedologia : LVel (Leatrol Vermelho Amarelo Eutrófico) Textura Argilosa

Geologia : Formação Serra dos Martins/Terciário



Húmus com grande quantidade de cascalho laterítico. Espessura média de 0,20 m

Material fino cor amarelada com grande quantidade de concretões de dimensões variadas de cor vermelha escura. Espessura observada no corte média de 2,0 m

FIGURA 4.6.3 - Jazida de Cuité/CTPB, Características Geoclimáticas e Perfil Geológico.

Localização: Município de Remígio-Pb, bordo esquerdo da rodovia PB-079 a altura do km 45

Clima : Segundo Gaussen, Xerotérmica (Submediterrâneo de transição 3 bTh). Índice Xerotérmico: 0 - 40

Precipitação Média Anual: 1000mm

Temperatura Anual: T. Médio: 22°C
T. Mínimo: 19°C

Vegetação : Mata Seca, Mata de Cipó e Agreste

Pedologia : PE13 (Textura argilosa e Solos Litólicos Eutróficos de Textura Média)

Geologia : Pré-Cambriano - Apresentando na Paraíba Gnaisés e Migmatitos

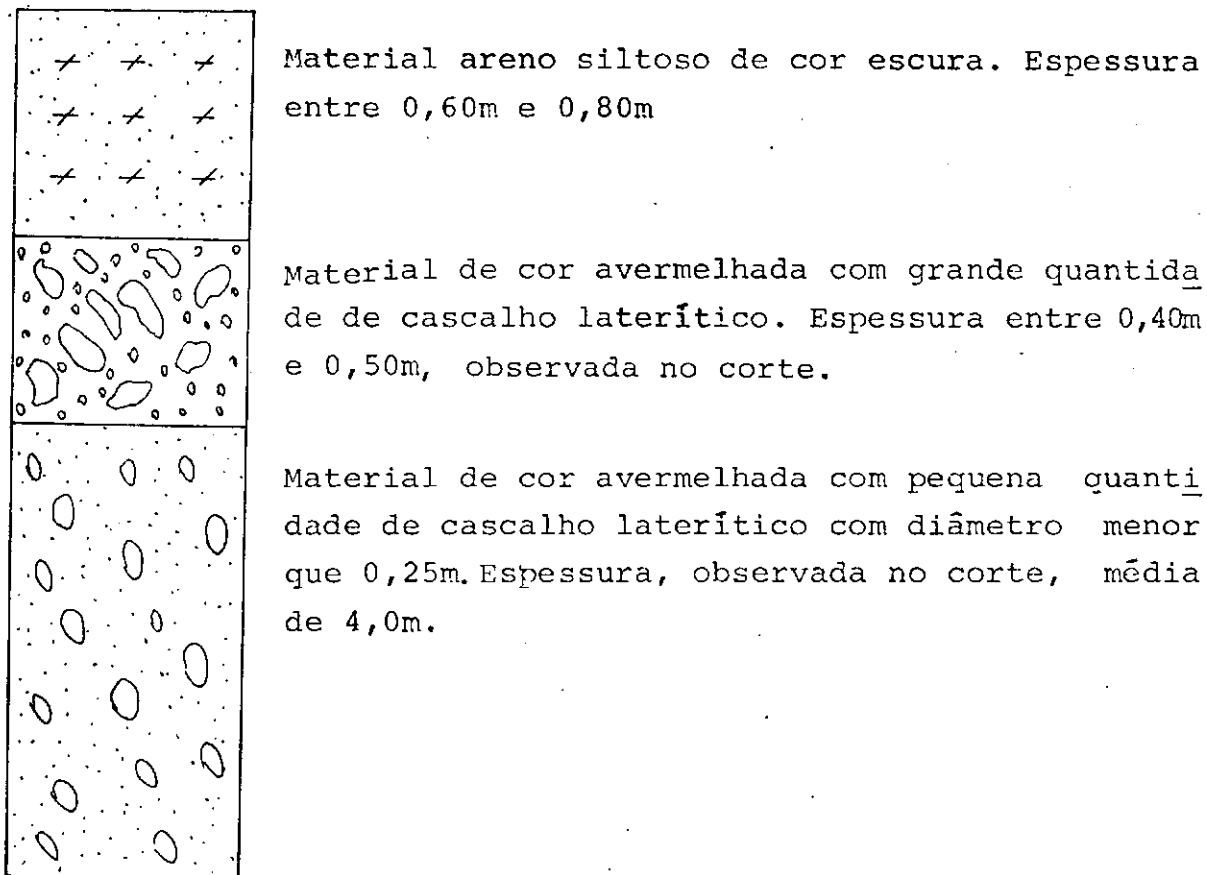


FIGURA 4.6.4 - Jazida de Areia/ARPB - Características Geoclimáticas e Perfil Geológico.

Segundo a classificação de Gaussen, bioclimáticamente pode-se enquadrar a região onde está a jazida de Areia como sendo Xerotérica, sub-grupo submediterrâneo de caráter de transição (3bTh), denominado no Brasil de Mediterrâneo com índice xerotérmico variando de 0 a 40, apresentando de 1 a 2 meses secos.

Segundo a classificação de Koppen pode ser do clima tipo AS quente e úmido com chuvas de outono-inverno.

A precipitação média anual na região é de 1000 mm, Lucena (1976), MINTER (1972) e IPR/DNER/UFPB (1980).

4.6.5 - Jazida Castelo - CAPI

1. Localização

A jazida localiza-se a 5 km da cidade de Castelo no Estado do Piauí, no bordo direito da rodovia de acesso à esta cidade.

2. Formação Geológica

Os sedimentos litológicos da região, onde está localizada a jazida, sugerem a sua inserção na formação denominada Cabeças. Tal formação segundo Pólleus, IPR/DNER/UFPB (1980), data do Devoniano Médio e Superior, tem uma espessura média de 300 metros e é caracterizado por arenitos de tons claros, branco a cinzento-amarelado, com tendência a um vermelho médio, grosseiro, em geral conglomerático e pouco argiloso, DNPM (1971) e SUDENE (1977).

Estrutura em uma extratificação muito espessa de aspecto compacto, às vezes cruzada, bem desenvolvida, ocorrendo intercalação de siltitos e arenitos finos, laminados em tons claros.

O perfil geológico é mostrado na Figura 4.6.5.

Localização: Município de Castelo-Pi, bordo direita da Rodovia a altura do km 5.

Clima : Segundo Gaussen, Xeroquimênica (Termoxeroquimênica, 4bTh, Tropical Quente de Seca Média). Índice Xerotérmico - 100 - 150

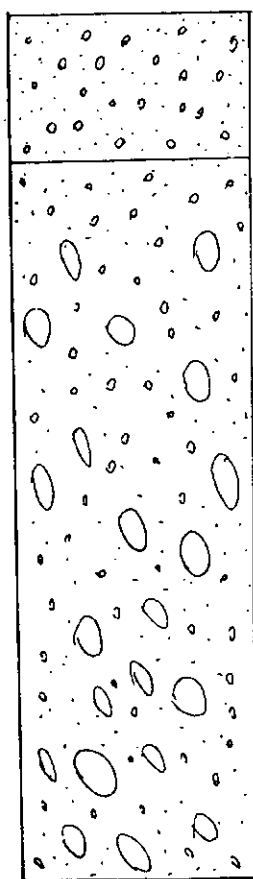
Precipitação Média Anual: 1200mm

Temperatura Anual: T. Média: 29,1°C
T. Mínima: 22,5°C

Vegetação : Floresta Xeromorfa; cerradão

Pedologia : AQ5 - Areias Quartzosas e Solos Litólicos

Geologia : Formação: Cabeças/Devoniano Médio a Superior



Material arenoso com húmus. Espessura média de 0,20 m, observada no corte.

Material laterítico avermelhado com concreções de dimensões variadas com diâmetro máximo de 0,10 m. Espessura observada no corte de 2,0m.

FIGURA - 4.6.5 - Jazida Castelo/CAPI - Características Geoclimáticas e Perfil Geológico.

3. Pedologia

O solo da região de Castelo é classificado como AQS (areias quartzosas e solos litólicos), que caracteriza-se por uma textura arenosa indiscriminada, profundos e razos, excessivamente a bem drenados. Estruturas em grãos simples e indiscriminado. De acordo com o mapa exploratório de solos elaborado pelo DNPM, (1974) para o programa de Integração Nacional, IPR/DNER/UFPB (1980)

4. Clima e Precipitação

Segundo a classificação bioclimática de Gaussen a região onde se encontra esta jazida enquadra-se como Xeroquimênica, sub-região denominada no Brasil de Tropical quente de seca média, a qual apresenta, estação seca de 5 a 6 meses e índice xerotérmico variando entre 100 e 150. Com temperatura no mês mais frio superior a 15°C.

A precipitação média anual é de 1200mm, SUDENE (1974).

4.6.6. - Jazida de Mosqueiro - MOPA

1. Localização

A jazida está situada na ilha de Mosqueiro, localizada no bordo direito da rodovia PA-17, km 35.

2. Formação Geológica

Os sedimentos litológicos da região, onde está localizada a jazida Mosqueiro, sugerem a sua inserção na formação Barreiras, que é caracterizada por sedimentos pouco consolidados, com camadas horizontalmente estratifi

cadras na sua maioria. Com uma predominância de estruturas do tipo arenitos com siltitos com coloração variegada, nas cores vermelha, amarela, branca e rosa. Apresentam também estratificação cruzada, intercalada, com arenitos grosseiros e conglomeráticos, verificando-se ocorrência de argilas basálticas.

A formação Barreiras formou-se provavelmente no Terciário, apresentando (no Pará) espessura variável, podendo em alguns locais atingir até 80 metros. IPR/DNER/UFPB (1980), DNPM (1974).

O perfil geológico é mostrado na Figura 4.6.6.

3. Pedologia

O solo da região de Mosqueiro é classificado como LA3 (Latossolo Amarelo Diatrófico e Areias Quartzosas Diatróficas). Que caracteriza-se por solos formados a partir de sedimentos argilo-arenosos e arenosos do Barreiras e do Quaternário. São solos de textura média (porcentagem de argila entre 15% e 35%), arenosos, profundos a muito profundos, forte e excessivamente drenados, estrutura maciça, DNPM (1974).

4. Clima e Precipitação

Segundo a classificação bioclimática de Gaussen, podemos classificar a região onde está localizada a jazida Mosqueiro como Termoxérica, sub-região Eutermoxérica (6a), denominada no Brasil de Equatorial, apresentando índice xerotérmico zero.

A temperatura do mês mais frio é superior a 20°C, apresentando um período quente quase contínuo, com estações do ano pouco marcadas ou mesmo inexistentes e com um estado hidrométrico muito elevado, superior a 85%.

Localização: Ilha de Mosqueiro-Pa, bordo direito da rodovia PA-17, a altura do km 35

Clima : Segundo Gausson, Termoxérica (Enterroxérica 6a); Equatorial. Índice Xerotérmico - zero

Precipitação Média Anual: 2760 mm

Temperatura Anual: T. Médio: 27,3°C
T. Mínimo: 20°C

Vegetação : Floresta Subtropical

Pedologia : LA3 - Lotossolo Amarelo Diastrófico e Areias Quatzosas Diastróficas

Formação Geológica: Formação Barreiras/Terciário

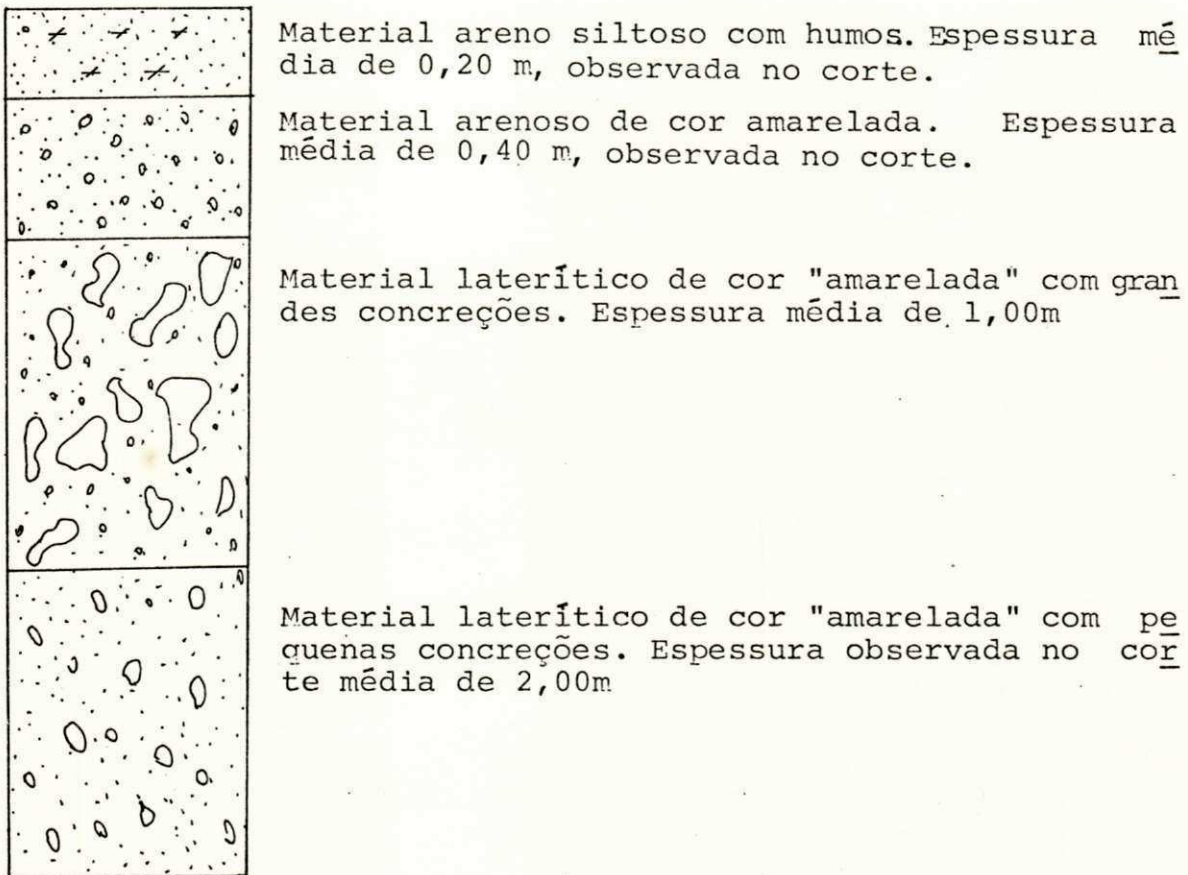


FIGURA 4.6.6 - Jazida de Mosqueiro/MOPA - Características Geoclimáticas e Perfil Geológico.

A precipitação média anual na região é de 2760mm, SUDENE (1974) e DNPM (1974).

CAPÍTULO V

MÉTODOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia empregada para caracterizar os materiais utilizados, bem como para avaliar as propriedades de engenharia selecionadas, que constituem a parte específica da pesquisa.

Os métodos de ensaio normalizados e utilizados serão citados, sendo porém completamente descritos os não padronizados, como também serão explicadas as variações empregadas nos procedimentos de alguns métodos de ensaio.

Serão também apresentados os critérios para aceitabilidade dos ensaios, sua repetibilidade e limites de confiança.

A sequência das operações executadas na pesquisa é mostrada na Figura 5.1-A e 5.1-B diagramaticamente.

Procurou-se executar a maior quantidade possível de ensaios de caracterização, que a primeira vista parece desnecessário, para possibilitar uma análise estatística da interação destas propriedades caracterizantes com algumas propriedades de engenharia dos solos tratados com os aditivos.

A - Metodologia dos Ensaios para Caracterização dos Materiais

5.2 - CAL

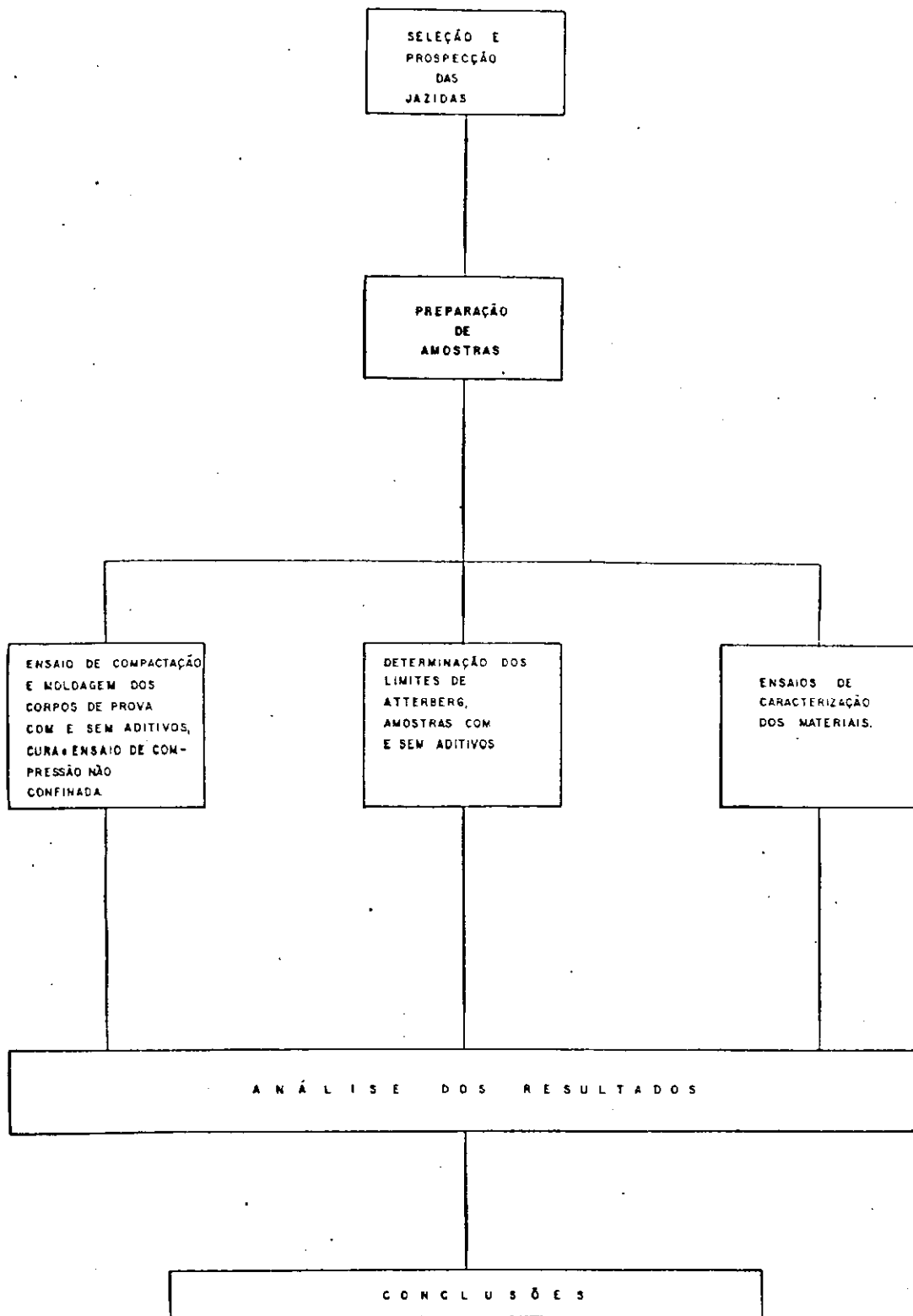


Figura 5.1-A - Fluxograma da Pesquisa

FLUXOGRAMA DOS ENSAIOS

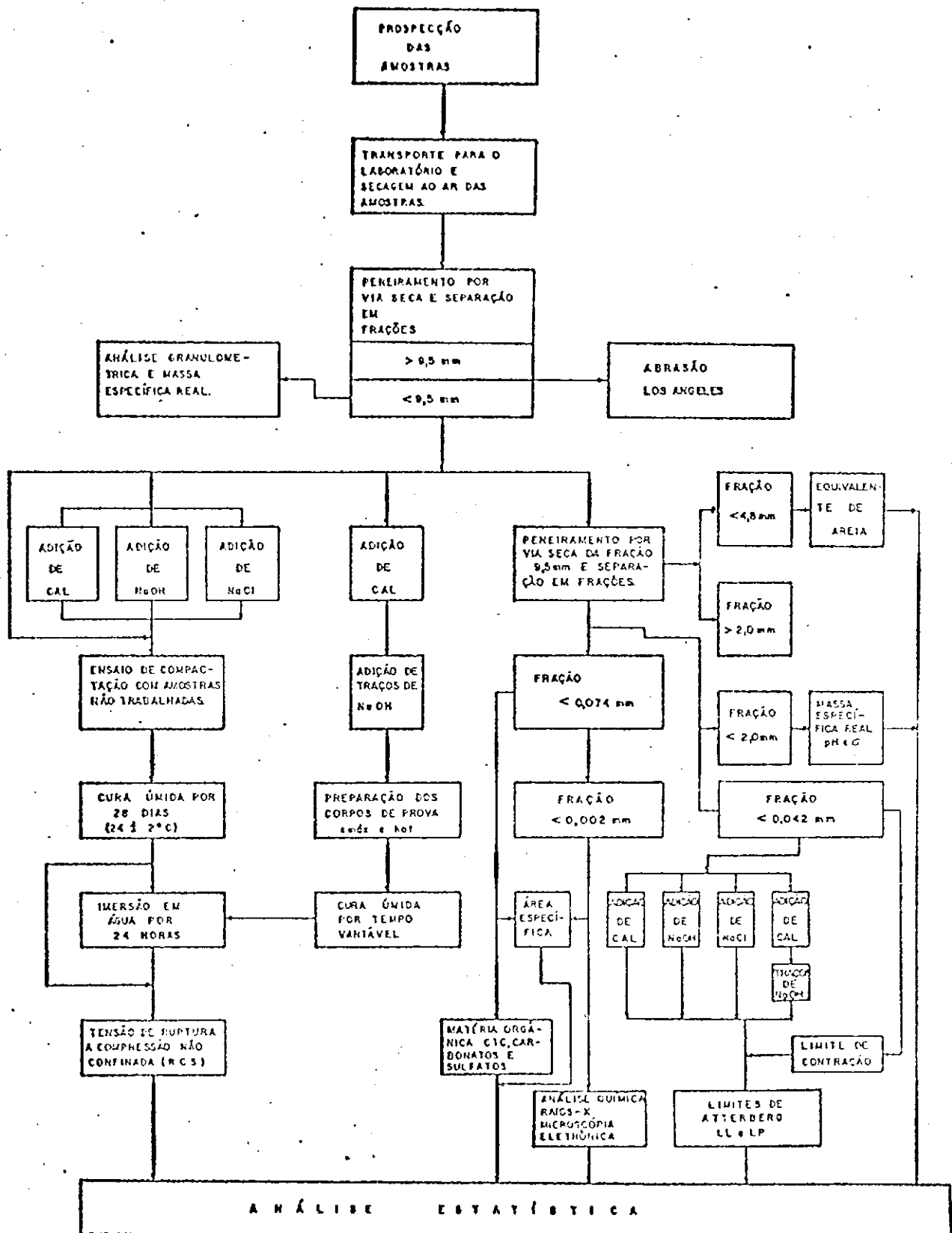


Figura 5.1-B - Fluxograma dos Ensaios

Os ensaios de caracterização da cal utilizada na pesquisa foram executados como normalizado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) MB-342/71 e ASTM - Designation C110-76 (pH). Os resultados reportados são a média aritmética de 3 determinações, que não difere de mais de 3% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 4 algarismos significativos.

5.3 - HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

A determinação do teor de hidróxido de sódio (NaOH) na soda cáustica utilizada na pesquisa foi executada de acordo com o método utilizado no laboratório de Análises Mineraiis do CCT-UFPB - Campus II Campina Grande, através titulação com solução normal de ácido clorídrico (HCl). Os resultados reportados são a média aritmética de 3 determinações, que não difere de mais de 3% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 4 algarismos significativos.

5.4 - CLORETO DE SÓDIO (NaCl)

A caracterização do cloreto de sódio (NaCl) utilizado foi realizada como normalizado pela ABNT-PMB-603/71 Método de Mohr. Os resultados reportados referem-se à média aritmética de 3 determinações, que não difere de mais de 3% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 4 algarismos significativos.

5.5 - SOLOS

5.5.1 - Preparação de Amostras

Após a chegada ao laboratório, as amostras de solo foram preparadas em consonância com o preconizado pelo método de ensaio DNER (1977) ME-41/63, excetuando-se a parte da amostra para os ensaios de compactação e preparação dos corpos de prova, que ao invés de se usar partículas com diâmetros menores que 4,8mm, (conforme recomenda o método MB-33/68 da ABNT) optou-se por partículas menores que 9,5 mm. Justifica-se tal modificação em decorrência de uma melhor adequação as condições reais de uso, bem como baseado no comportamento de solos naturais compactados, onde a rejeição de partículas com tamanho maior que 4,8mm e menor ou igual a 19,0mm não tem efeitos significantes nas propriedades de compactação de solos conforme Bezerra (1976) e R.R.L.(1952), todavia os efeitos de tal procedimento nas propriedades de engenharia de misturas não são conhecidos. Entretanto para o caso, específico desta pesquisa, onde um dos objetivos é estudar as tendências do comportamento dos sistemas solo-cal, solo-hidróxido de sódio, solo-cloreto de sódio e solo-cal+hidróxido de sódio, admite-se não ser de maior importância.

5.5.2 - Teor de Umidade

O teor de umidade nas diversas etapas da pesquisa foi determinado em consonância com o preconizado pela norma BS1377 (1975), ensaio 1(A), tendo sido utilizadas amostras com 150g de solo. Os resultados reportados referem-se a uma média aritmética, de 2 determinações, que não difere de mais de 5% dos valores encontrados isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.3 - Limite de Liquidez

A determinação do limite de liquidez foi realizado

em consonância com o preconizado pela norma do DNER (1977). Os resultados reportados referem-se a uma população de quinze pontos em grupos de 3 pontos. O valor do limite de liquidez adotado foi obtido por regressão linear simples (método dos mínimos quadrados), com coeficiente de correlação (R) sempre maior ou igual que 0,90, nível de significância (S) sempre menor ou igual que 1%, teste bicaudal com grau de liberdade (GL) igual a 13, apresentados com 3 algarismos significativos.

O processo adotado foi adicionando-se necessária quantidade de água a uma massa de 200g de solo seco ao ar, que foi então conveniente homogeneizada e dividida em quatro partes, sendo três partes utilizadas no aparelho de Casagrande e ensaiada separadamente como descrito no método DNER-ME 44-71. Retornando-se então todas as partes para um recipiente, onde novamente adicionava-se água, homogeneizava-se, repartia-se e ensaiava-se a amostra e assim sucessivamente até completar cinco grupos de três pontos que definiam a curva de fluidez e o respectivo limite de liquidez da amostra do solo.

5.5.4 - Limite de Plasticidade

A determinação do limite de plasticidade foi realizada em consonância com o preconizado pela norma do DNER (1977), ME-82-63. Foram determinados 15 valores, para cada amostra de solo. Os resultados reportados são uma média aritmética, que não difere de mais que 5% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.5 - Limite de Contração

A determinação do limite de contração foi realizada em consonância com o preconizado pela norma do DNER (1972) DPTM-87-64. Foram determinados 3 valores para cada amostra

de solo. Os resultados reportados são uma média que não difere de mais que 5% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.6 - Massa Específica Real

A determinação da massa específica real das partículas do solo foi realizada em consonância com a norma BS-1377 (1975). Foram determinados 3 valores para cada amostra de solo. Os resultados reportados são uma média aritmética dos valores, que não diferiram entre si de mais de $0,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ que é a tolerância da norma BS-1377 (1975), apresentados com 3 algarismos significativos.

O acima mencionado refere-se às partículas frações do solo menores que 2,0mm, contudo estudos recentes, IPR/DNER/UFPB (1980), demonstraram que no caso de solos lateríticos é também necessário a determinação da massa específica real das partículas maiores que 2,0mm, geralmente concreções o que foi feito utilizando-se os métodos de ensaio também da BS-1377 (1975). Para melhor adequação da curva de saturação, ($S = 100\%$).

5.5.7 - Análise Granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica dos solos foi realizada de acordo com a norma BS 1377 (1977) ensaio 7(A) com peneiramento por via úmida, até o diâmetro de 0,074mm e sedimentação, método do densímetro, da fração menor que 0,074mm. Os resultados reportados são a média de 3 determinações que não difere de mais que 10% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.8 - Área Específica

A avaliação da área específica dos solos foi reali

zada pelo método gravimétrico proposto por Diamond e Kinter (1968) baseado na adsorção monomolecular de glicerol. Os resultados reportados são a média aritmética, de 3 determinações, que não difere de mais de 5% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.9 - Matéria Orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica dos solos realizada em consonância com o preconizado pela norma BS 1377 (1975) ensaio (B). Os resultados reportados referem-se a média aritmética de no mínimo 2 determinações, que não difere dos valores obtidos isoladamente de mais de 5% apresentados com 3 algarismos significativos. Foi utilizada a fração menor que 0,074mm.

5.5.10 - Potencial Hidrogeniônico (pH)

A determinação do potencial hidrogeniônico (pH) foi realizada em consonância com o preconizado pela norma BS 1377 (1975), ensaio 11(A). Os resultados reportados referem-se à média aritmética, de no mínimo 2 determinações, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.11 - Acessórios como Carbonatos

A avaliação da presença de carbonato foi realizada de maneira qualitativa, através da adição de ácido clorídrico, HCl, observando-se a ocorrência de borbulhamento ou chiado indicativo de dióxido de carbono e conseqüente presença de carbonatos.

5.5.12 - Acessórios como Sulfatos

A avaliação da presença de sulfatos foi realizada

de maneira qualitativa, através da adição de cloreto de bário ($BaCl_2$), observando-se a ocorrência de precipitação de sulfato de bário, ($BaSO_4$), indicativo da presença de sulfatos.

5.5.13 - Capacidade de Troca de Cátions (C.T.C.)

A determinação dos cátions trocáveis foi realizada em consonância com o preconizado pelos métodos de análises de solos do Ministério da Agricultura do Brasil, Vettori (1969). Sendo que os cátions, alumínio, hidrogênio, cálcio e magnésio, foram obtidos por titulação (colorimetria), sódio e potássio, por fotometria de chama. Foram utilizadas 2 amostras, os resultados apresentados são a média aritmética, que não difere mais que 5% dos valores obtidos isoladamente, a apresentados com 3 algarismos significativos.

5.5.14 - Identificação Mineralógica

A determinação da composição mineralógica qualitativa dos solos foi realizada de maneira qualitativa através de difração de raios-X tendo sido utilizado um difratômetro de raios-X, marca Phillips, acoplado a um contador polarizado e registrador gráfico com as seguintes características:

- a. tubo de cobre com espectro $CuK\alpha$, gerado a 45KV e 55mA;
- b. velocidade de varredura - $0,5^\circ/\text{min}$
- c. filtro de níquel;
- d. velocidade do papel (registrador gráfico)-12mm/min.

A identificação mineralógica da fração menor que $2\mu\text{m}$ dos solos foi também realizada através a utilização de um microscópio eletrônico de transmissão marca Siemens Elmiskop 101, 100KV. Sendo empregado a técnica de películas-supor

zada em consonância com o preconizado pela norma do DNER (1977), ME-82-63. Com a variante da adição de conveniente quantidade de aditivo na forma pulverulenta (cal ou NaCl) e/ou solução (NaOH), completa homogeneização visual, adição de água, nova homogeneização e repouso por 10 minutos. Em seguida efetivou-se quarteamento da massa e moldagem dos cilindros, num total de 15 para cada amostra de solo. Os resultados reportados são uma média aritmética, que não difere de mais de 5% dos valores obtidos isoladamente, apresentados com 3 algarismos significativos.

5.8 - ENSAIO DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A relação entre o teor de umidade de moldagem e a massa específica aparente seca foi determinada em consonância com o preconizado pela ABNT (1968), MB-33/1968 - Exceto no concernente ao diâmetro máximo das partículas onde optou-se por partículas menores que 9,5mm ao invés de 4,8mm como recomendado pelo referido método.

Cada ponto da curva de compactação é a média aritmética, de 3 determinações, que não difere de mais que 5% dos valores encontrados isoladamente, com amostras não trabalhadas, visto que reutilização de uma mesma amostra poderia causar degradação do material e possível comprometimento da granulometria do solo, Correa (1981).

O procedimento básico para execução do ensaio de compactação e moldagem dos corpos de prova foi o seguinte:

- a. homogeneização da amostra de solo, por um minuto, num misturador elétrico de eixo vertical rotativo;
- b. colocação do aditivo, se pulverulento (cal ou NaCl) nova homogeneização;

- c. adição de conveniente quantidade de água ou solução (NaOH) e homogeneização por 3 minutos;
- d. retirada do material aderido as laterais do homogeneizador (misturador) com o uso de uma espátula e mistura por mais de um minuto;
- e. compactação dinâmica, em camadas, com o uso de um soquete, onde era induzida uma energia equivalente à do Proctor Normal ($6,05 \text{ kg.cm/cm}^3$) logo após à mistura;
- f. remoção dos corpos de prova do molde, pesagem, identificação com etiquetas e lacragem dos mesmos em sacos plásticos;
- g. os corpos de prova foram moldados com 10,38 cm de diâmetro e 12,70cm de altura.

Para cada tipo de aditivo, cal, NaOH e NaCl moldou-se 5 grupos de 3 corpos de prova com teores de umidade variando ao longo da curva de compactação. Os resultados reportados referem-se à média, de 3 determinações, que não diferem de mais de 5% dos valores obtidos isoladamente apresentados com 4 algarismos significativos. No caso específico de cal + traços de NaOH, foram moldados para cada tipo de solo e teor de NaOH, 3 corpos de prova na umidade ótima do respectivo teor de cal.

5.9 - CONDIÇÕES DE CURA E ENSAIO DE COMPRESSÃO NÃO CONFINADA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram curados à úmido, através de soterramento em areia saturada com água potável, em câmara úmida, durante 27 dias, a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e imersos em água potável por 1 dia. No caso específico de cal

+ traços de NaOH a cura úmida variou em 6, 27 e 89 dias, mais 1 dia de imersão para cada tempo de cura.

Após o período de cura foi mensurado o comportamento dos corpos de prova, através do ensaio de compressão não confinada, utilizando-se para tal uma prensa universal, marca Testop, provida de anel dinamométrico, com uma velocidade de deslocamento de 0,127 cm/min. Utilizou-se um ensaio rápido^(*), com deformação controlada e a cada 0,24% de deformação específica a correspondente carga atuante era anotada, prosseguindo-se o ensaio além da ruptura, inclusive até 30% após a carga máxima.

Os pares, carga (para posterior cálculo da tensão) versus deformação foram determinados para grupos de 3 corpos de prova com mesmo teor de umidade, para 5 pontos ao longo da curva de compactação.

Os resultados reportados referem-se à média aritmética de 3 determinações não diferindo mais de 10% dos valores isolados. Aquelos valores que se afastaram mais de 10% da média foram abandonados, sendo nova média determinada para os demais valores, se não fosse possível novo grupo era então preparado, curado e ensaiado.

(*) em decorrência de nesta velocidade de ensaio não ocorrer significativa dissipação de pressão neutra (poro pressão). TRR (1976).

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais, bem como nos ensaios específicos, onde foram mensuradas propriedades de engenharia escolhidas dos solos, com o escopo de avaliar o seu comportamento, após tratamento com cal hidratada, hidróxido de sódio (NaOH), cloreto de sódio (NaCl) e cal + traços de NaOH.

A - Ensaio de Caracterização dos Materiais

6.2 - CAL

A cal adicionada ao solo é cálcica por possuir menos de 20% de MgO, Petrucci (1968), seus principais componentes e características são mostrados na Tabela 6.2.

Ca(OH) ₂	81,31%
Mg(OH) ₂	3,22%
CaO	59,36%
MgO	3,02%
SiO ₂	3,67%
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	2,39%
Perda ao fogo (1000°C)	26,16%
pH (em água 1:10)	12,3
Massa específica real	2,33x10 ³ kg/m ³

Condutividade elétrica
(em água 1:10) 9,2 mS

Tabela 6.2 - Características da Cal

6.3 - HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)

O hidróxido de sódio (NaOH) adicionado ao solo na forma de soda cáustica comercial, sendo que a mesma apresentou uma quantidade de 81,25% de hidróxido de sódio (NaOH) e demais características mostradas na Tabela 6.3.

NaOH	81,25%
Matéria Orgânica	< 0,50%
Impureza	< 5,00%
Ca ²⁺	< 5,00%
Massa específica real	< 1,84x10 ³ kg/m ³
% passando na peneira	
ABNT nº 100 0,15mm	98,00%

Tabela 6.3 - Características do Hidróxido de Sódio (NaOH)

6.4 - CLORETO DE SÓDIO (NaCl)

O cloreto de sódio (NaCl), adicionado ao solo, foi na forma de sal grosso pulverizado, com 92,32% de NaCl e demais características apresentadas na Tabela 6.4.

NaCl	92,32%
Ca ²⁺	< 0,10%
Matéria orgânica	< 0,50%

Impurezas	< 5,00%
% passando na peneira	
ABNT Nº 100 (0,15mm)	100,00%
Massa específica real	2,24 x10 ³ kg/m ³

Tabela 6.4 - Características do Cloreto de Sódio (NaCl)

6.5 - ÁGUA

A água utilizada foi destilada, com pH igual a 7,1, condutividade elétrica igual a 3,7 μ S e com 0,005% de resíduo de evaporação.

6.6 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA (ATTERBERG) DO SOLO NATURAL

6.6.1 - Limite de Liquidez

O limite de liquidez (LL) dos solos foi determinados em consonância com a norma do DNER (1977), pelo método ME-44/71, tem seus valores mostrados na Tabela 6.6. Os resultados mostrados para limite de liquidez situam-se entre 29,2% (para o solo de CAPI) e 46,5% (para o solo de MOPA), assim sendo, pode-se inferir que estes solos estão entre aqueles de baixa (LL < 35%) à média plasticidade (35% LL < 50%) conforme Terzaghi e Peck (1967). Resultados semelhantes foram encontrados por Queiroz de Carvalho (1979), na faixa de não plásticos a de média plasticidade, com solos de mesma fisiografia.

6.6.2 - Limite de Plasticidade

Os resultados obtidos para o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP) encontram-se na Tabela 6.6, situam-se estes valores entre 19,1% (para o solo de CAPI) e 31,12% (para o solo de MOPA) para o limite de plasticidade. O índice de plasticidade variou entre 6,1% (para o solo de CAPI) e 19,6% (para o solo de MOPA) estando numa faixa de IP, aceitável para solos lateríticos, conforme Vargas (1977), (média de aproximadamente 15%). Valores semelhantes foram reportados por Queiroz de Carvalho (1979) ao estudar solos lateríticos do Nordeste do Brasil.

Ao colocar em gráfico os valores do limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) dos solos na carta de plasticidade de Casagrande, resultou que com exceção dos solos de ARPB e MOPA todos os demais posicionaram-se acima da linha "A". Sendo correlacionáveis através da equação de regressão linear simples (método dos mínimos quadrado).

$$IP = 0,577 (LL - 16,27)$$

$$R = 0,904 \quad S = 0,01 \text{ (teste bicaudal)}; \quad GL = 3$$

(equação 6.6.2)

Solos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)
TEPB	39,6	24,6	15,0	11,5
CTPB	28,6	22,2	6,4	12,7
ARPB	42,0	31,1	10,9	14,3
CAPI	25,2	19,1	6,1	5,5
MOPA	46,5	26,9	19,7	17,9

LL = Limite de liquidez

LP = Limite de plasticidade

IP = Índice de plasticidade

LC = Limite de contração

Tabela 6.6 - Limites de Atterberg e Limite de Contração dos Solos

6.7 - MASSA ESPECÍFICA REAL

Os valores para massa específica real são apresentados na Tabela 6.7. Como pode ser observado a faixa de valores encontra-se entre $2,58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ a $3,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Estes valores são compatíveis com as faixa reportadas por outros pesquisadores. Por exemplo: Tuncer (1969), e Graft et alli (1969) citam valores entre $2,60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e $3,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; Queiroz de Carvalho (1979) cita valores entre $2,69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e $3,16 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Gidigasú (1976) cita valores altos de até $3,76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, que é pouco comum para a fração na qual usualmente se determina a massa específica real, que é a fração menor que 2,0mm conforme DNER (1977).

Pode-se observar na Tabela 6.7 a redução da massa específica real em função da redução do diâmetro das partículas da fração considerada, tal comportamento é explicável à luz de estudos de outros pesquisadores por exemplo: Novais Ferreira e Correia (1965) que atribuem este comportamento em solos lateríticos à maior concentração de óxidos de ferro na fração graúda se comparada à fração mais fina. Lohnes e Demirel (1973) relatam terem encontrado uma positiva e significativa correlação (estatística) entre a massa específica real e o ferro livre bem como entre a massa específica real e o teor de goetita para solos lateríticos.

Queiroz de Carvalho (1979) estudando solos lateríticos do Nordeste do Brasil encontrou equações estatísticas significativas correlacionando massa específica real com percentagem de ferro nas diversas frações dos solos estudados, isto é frações areia, silte e argila, excetuando a fração maior que 2,0mm em virtude da presença marcante do ferro.

Lucena (1976) que estudou solos lateríticos do estado da Paraíba (Brasil) reporta que de uma maneira geral, a composição química das subfrações tem a seguinte prioridade nos compostos na ordem de abundância:

subfração solo (< 9,5mm)
 sílica > alumina > ferro
 subfração concreções (> 9,5mm)
 ferro > sílica > alumina.

Fatores estes que justificam o comportamento da elevação da massa específica real como diâmetro das partículas.

Para este tipo de solos as variações da massa específica real nas diversas frações são bastante peculiares, o que deu origem a tentativas de sistemas de classificação, conforme citações de Tuncer (1961), Lehnes e Demirel (1973), Tuncer e Lohnes (1977).

FRAÇÕES DO SOLO

SOLOS	MÉDIA	2,0mm < d < 9,5mm kg/m ³	d < 2,0mm kg/m ³	d < 0,42mm kg/m ³	d < 0,074mm kg/m ³
	(1 e 2) ^(*)	(1)	(2)	(3)	(4)
TEPB	2,72	2,72	2,72	2,72	2,58
CTPB	2,77	3,03	2,74	2,70	2,61
ARPB	2,77	2,85	2,71	2,70	2,61
CAPI	2,90	3,02	2,76	2,69	2,60
MOPA	2,70	2,71	2,69	2,69	2,59

d = diâmetro das partículas do solo

TABELA 6.7 - Massa Específica Real de Diversas Frações dos Solos ($\times 10^3$)

$$(*) - (1 \text{ e } 2) = \text{média ponderada} = \frac{100}{\frac{\% (1)}{\gamma_g(1)} + \frac{\% (2)}{\gamma_g(2)}}$$

6.8 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As curvas de distribuição granulométrica dos solos são mostradas nas Figuras 6.8-A a 6.8-B e dados acessórios de correntes destas distribuições encontram-se na Tabela 6.8.

Como pode ser verificado nas Figuras 6.8-A e 6.8-B os solos apresentam uma distribuição granulométrica bastante semelhante. Sendo que os solos de CTPB, ARPB e CAPI se enquadram na faixa granulométrica D, da AASHO, conforme Souza (1966) e faixa B do DNER/ESP-47-74 o que não ocorre com os solos de TEPB e MOPA. Os solos de TEPB, CTPB e ARPB são bem graduados. Os solos de CAPI e MOPA apresentam o característico patamar da distribuição granulométrica dos solos lateríticos pedregulhosos que evidencia a falta de material na fração areia, decorrente do processo de formação destes solos, que segundo Harrison (1969) é resultante do intemperismo de rochas, na qual a decomposição química dos silicatos, resultou na formação de sílica secundária; ou como proposto por D'Hoore (1954), teoria da acumulação, provavelmente através concentração de sesquióxidos pela remoção de sílica e bases-acumulação relativa. Estes solos mostram-se como mal graduados, não obstante o solo de CAPI se enquadre na faixa D da AASHO e B do DNER.

Os valores reportados são a média, de três determinações, que não difere mais de 10% dos valores obtidos isoladamente. A análise por peneiramento foi realizada pelo pesquisador Correia (1981).

6.9 - ÁREA ESPECÍFICA

A área específica dos solos determinada pelo método proposto por Diamand e Kinter (1968), baseado na adsorção monomolecular de glicerol tem seus valores mostrado na Tabela

PENEIRAS	SOLOS	TEPB	CTPB	ARPB	CAPI	MOPA
		PQP	PQP	PQP	PQP	PQP
19,1 mm		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
9,5 mm		99,6	91,4	86,2	81,4	90,0
4,8 mm		97,3	76,5	70,4	56,9	76,5
2,0 mm		86,2	57,8	52,8	43,7	70,1
0,42 mm		57,4	43,3	37,1	38,8	64,6
0,074 mm		30,0	21,4	18,0	22,1	44,2
0,002 mm		16,0	10,0	11,0	9,5	21,0

FAIXAS:						
AASHO		-	D	D	D	-
DNER		-	B	B	B	-
D ₁₀		-	0,002	0,001	0,005	-
D		-	1.150	3.300	1,111	-
Cc		-	5,570	0,189	1,000	-

ÁREA ESPECÍFICA (m ² /g)						
d < 0,050 mm		28,7	11,4	16,5	13,1	16,3
d < 0,002 mm		33,6	50,7	38,9	36,8	25,8

d = diâmetro da partícula

PQP = % que passa

D₁₀ = diâmetro efetivo

D = coeficiente de desuniformidade

Cc = coeficiente de curvatura

Tabela 6.8 - Análise Granulométrica, Área Específica e Dados Acessórios dos Solos.

GRANULOMETRIA

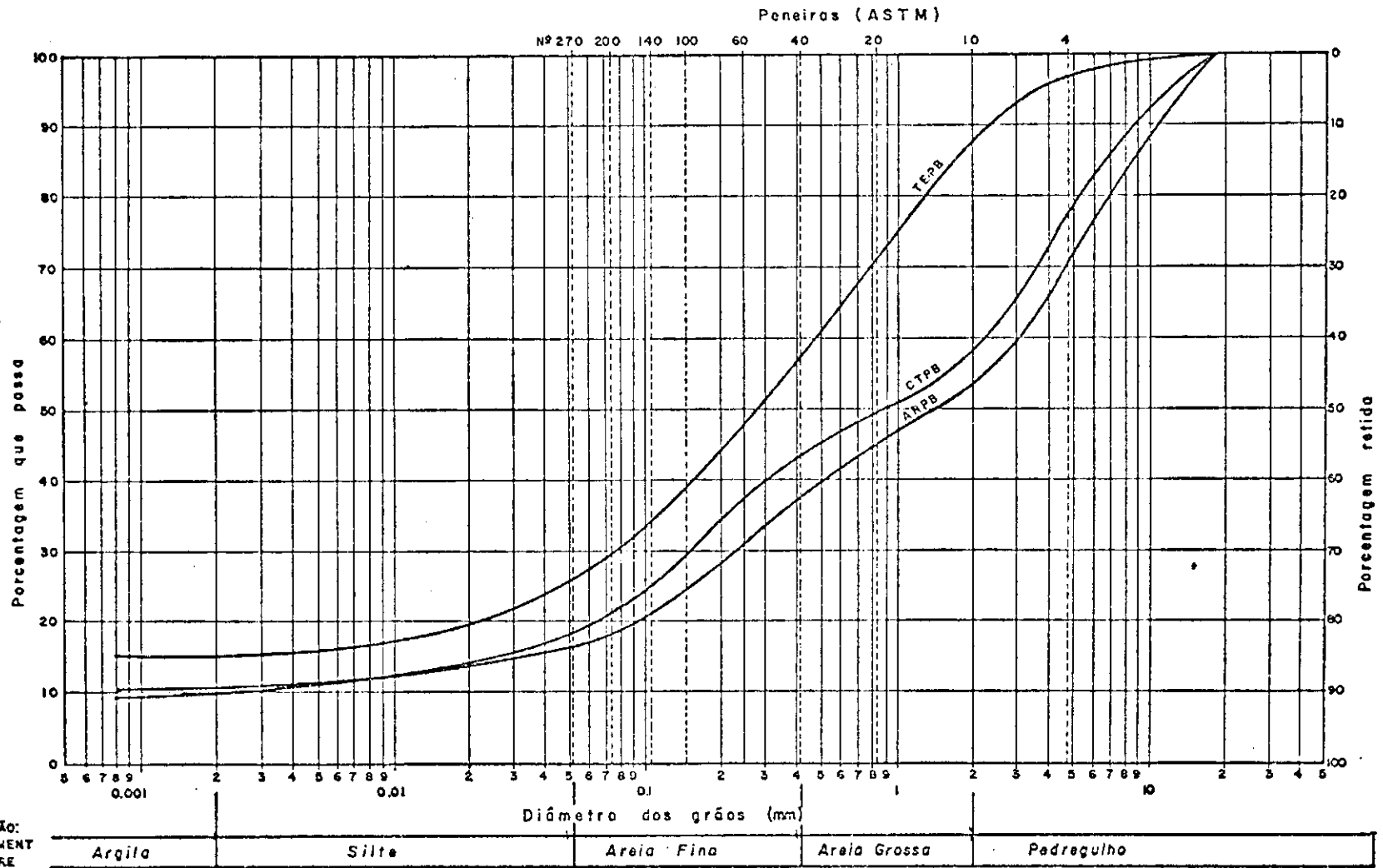


Figura 6.8-A - Curvas de Distribuição Granulométrica dos Solos
TEPB, CTPB e ARPB.

GRANULOMETRIA

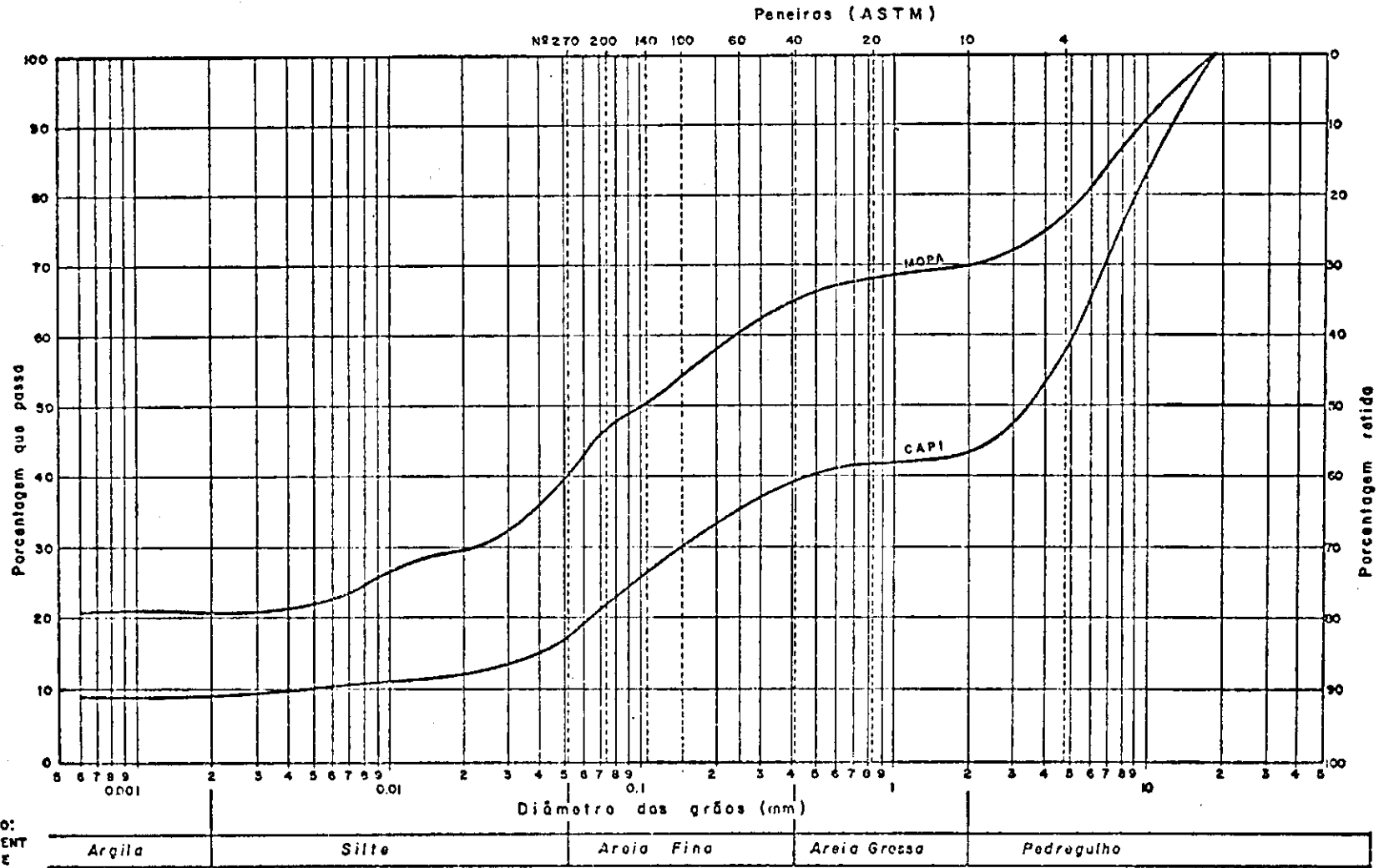


Figura 6.8-B - Curvas de Distribuição Granulométrica dos Solos CAPI e MOPA.

6.8. Como pode ser verificado estes valores quando determinados na fração menor que 0,050mm (silte mais argila) variaram de 11,4 m²/g a 28,7 m²/g. A avaliação da área específica na fração menor que 0,050mm foi realizada em virtude de estudos anteriores efetuados por Lucena (1976) que mostraram evidências de concentração de prováveis componentes amorfos de sílica e alumina, que confere a esta fração valores elevados de área específica não obstante a presença de minerais acessórios como quartzo, anatásio, goetita, entre outros, remanescente também do processo de separação. A área específica da fração menor que 2µmm variou de 25,3m²/g a 50,7 m²/g.

6.10 - CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS

Os resultados dos valores obtidos para o índice de grupo (IG), equivalente de areia (EA), CBR, abrasão "Los Angeles" e a relação sílica/sesquióxidos dos solos estudados encontram-se na Tabela 6.10.

SOLOS	IG	EA (%)	LL (%)	IP (%)	Abrasão Los Angeles	$\frac{S}{R}^{(*)}$
TEPB	1	0	39,6	15,0	-	1,86
CTPB	0	5,0	28,6	6,4	34,8	1,68
ARPB	0	9,4	42,0	10,9	62,2	1,70
CAPI	0	10,7	25,2	6,1	28,8	-
MOPA	5	0	46,5	19,7	35,8	1,83

Tabela 6.10 - Índice de Grupo (IG), Equivalente de Areia, Relação Sílica/Sesquióxido e Abrasão "Los Angeles" dos Solos.

(*) Relação sílica/sesquióxidos, DNER (1974).

O índice de grupo (IG) é um parâmetro empírico, mas que ainda permanece em algumas especificações para base e sub-base granular e estabilizada. Consiste em uma classificação de solos quanto a sua qualidade em função da porcentagem de material que passa na peneira ABNT nº 200 (0,074mm), do limite de liquidez e do índice de plasticidade, é definido por um número inteiro variando de 0 a 20 estando entrando em desuso. Para os solos estudados os resultados variaram de 0 a 5.

O equivalente de areia (EA) é um parâmetro obtido através ensaio normalizado pelo DNER (1977), DPTM-54-63 cuja aceitabilidade bem como a do índice de grupo, entre pesquisadores de solos é discutida. A norma inglesa por exemplo não o normaliza, contudo é parte integrante de algumas especificações para obras rodoviárias. Sua aplicabilidade é muito limitada por ser este tipo de solo geralmente pobre da fração areia, caracterizada pelo patamar nas curvas de distribuição granulométricas. Para os solos estudados os valores variaram de 0,0% a 10,7%.

Como pode ser visto na Tabela 6.10 os solos de CTPB, ARPB e CAPI enquadram-se nas especificações ESP-47 - 74 e ES48-74, vigentes no Brasil para solos lateríticos. Adequam-se completamente para sub-base e a depender do número N de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas para o período do projeto, alguns poderão ser utilizados até para base. Os solos de TEPB e MOPA enquadram-se às especificações apenas para sub-base.

6.11 - MATÉRIA ORGÂNICA

A determinação da matéria orgânica foi realizada consoante metodização da BS 1377 (1975) tendo sido usada a fração menor que 0,050 mm. Os seus resultados estão apresen

tados na Tabela 6.11. Como pode ser visto os valores situam-se entre 0,70% (para o solo de MOPA) e 1,53% (para o solo de CAPI) em relação ao peso do solo seco. Valores semelhantes foram encontrados por Newil (1961) estudando argilas vermelhas da Kenya, entre 0,40% e 1,30%. Queiroz de Carvalho (1979) estudando solos lateríticos do Nordeste do Brasil relata valores na faixa de 0,06% a 0,62%. Muralli et alli (1978) relata valores entre 0,05% e 0,98%. O baixo teor de matéria orgânica dos solos lateríticos é aceito como uma característica desses solos conforme DNER (1976) e Gidigas (1976). Não se encontrou na literatura um limite máximo para o teor de matéria orgânica ser considerado baixo.

Por ser o teor de matéria orgânica ativa nos solos um dos seus componentes indesejáveis quando se pretende estabilizá-los (com os aditivos mais usuais) é que organismos como o DNER (1976), Corps of Engineers e Bureau of Reclamation citados por Ingles e Metcalf (1973), recomendam a não utilização de solos orgânicos e altamente orgânicos (segundo a classificação unificada, SUCS) em obras de engenharia sem que sejam executados estudos específicos do seu comportamento.

Ingles e Metcalf (1973), Rico e Del Castilho (1977) e Queiroz de Carvalho (1979) entre outros autores, são unânimes em asseverar que a matéria orgânica é prejudicial a reatividade da cal adicionada ao solo, vez que, esta (matéria orgânica) possui elevada capacidade de troca de cátions podendo chegar a até 500 meq/100g ocasionando uma prioritária adsorção de íons de cálcio (Ca^{2+}) oriundos da dissociação da cal e reduzindo ou inibindo a reação solo-cal. Podendo também minimizar a solubilização da sílica ou alumina e afetando a reação pozolânica.

Thornburn e Mura (1968), revisando a estabilização de solos como sais e bases inorgânicas, referem-se a perniciosa ação da matéria orgânica, presente nos solos, como decorrente da sua alta capacidade de troca, (como já referido),

que pode ser várias vezes superior à dos argilo - minerais e tendem a substituir os cátions inorgânicos na superfície destes (argilos-minerais), formando um coloide protetor inibindo assim a capacidade de troca e conseqüentemente prováveis reações solo-sais ou solo-bases.

Grim (1962) estudando a influência da matéria orgânica na plasticidade de argilas, refere-se que a influência destas pode elevar ou reduzir a plasticidade em diferentes níveis até destruindo esta propriedade, podendo ocorrer em virtude de uma possível adsorção das moléculas orgânicas aos argilo-minerais e desenvolvimento de uma superfície liofóbica (hidrofóbica). Algumas argilas desenvolvem plasticidade com fluidos orgânicos específicos, contudo não o fazem com água. Pouco se sabe sobre tal mecanismo, todavia é possível que este comportamento ocorra devido a natureza da matéria orgânica, que ao ser adsorvida promova uma superfície liofílica (hidrofílica) em torno do argilo-mineral.

SOLO	Percentagem de Matéria Orgânica, fração 0,050mm
TEPB	0,88
CTPB	1,39
ARPB	1,35
CAPI	1,53
MOPA	0,70

Tabela 6.11 - Teor de Matéria Orgânica dos Solos

6.12 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH) e CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NATURAL

Os resultados obtidos na determinação do pH em conformidade com a BS 1377 (1975), tendo sido utilizada fração

menor que 2,0mm encontram-se na Tabela 6.12. Pode-se observar que os valores do pH dos solos investigados variam de 4,7 para o solo de MOPA e 5,0 para o solo de TEPB, situando-se entre os solos moderadamente ácidos. Buckman e Brandy (1979).

Queiroz de Carvalho (1979) refere-se a faixa de pH de ácido à neutro como características de solos tropicais intemperizados e cita valores entre 4,6 a 6,1. Buckman e Brandy (1979) referem-se a faixa de pH de 5 a 7 como usual para solos de regiões úmidas e 7 a 9 como usual para solos minerais de regiões áridas. Esses autores entretanto não definem o conceito de regiões úmidas e áridas (*).

De Alwis e Pluth (1979), que estudaram solos vermelhos de Sri Lanka, referem-se a valores de pH na faixa de 4,8 a 5,0.

SOLO	pH	Condutividade elétrica µS
TEPB	4,9	$1,68 \times 10^{-1}$
CTPB	4,8	$1,48 \times 10^{-1}$
ARPB	5,0	$1,12 \times 10^{-1}$
CAPI	4,7	$3,35 \times 10^{-2}$
MOPA	4,9	$9,60 \times 10^{-2}$

Tabela 6.12 - Potencial Hidrogeniônico (pH) e Condutividade Elétrica dos Solos

6.13 - ACESSÓRIOS COMO CARBONATOS

(*) estes estudos foram desenvolvidos provavelmente para regiões de clima temperado e/ou frio.

Os solos não apresentaram reações típicas da presença de carbonatos, mesmo a quente, quando em contato com ácido clorídrico (HCl). Ressalta-se que para o solo de CTPB que apresentou, na difração de raios-X, traços indefinidos de calcários, não foi possível detectá-los nesta mensuração qualitativa.

6.14 - ACESSÓRIOS COMO SULFATOS

Os solos de TEPB, CTPB e ARPB apresentaram um precipitado branco quando tratados com BaCl₂, a quente, podendo-se inferir da presença de sulfatos. Os solos de CAPI e MOPA não apresentaram precipitado e portanto indicativo da ausência de sulfato, se comparados aos demais solos.

6.15 - CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (C.T.C.)

Os cátions trocáveis dos solos natural (sem aditivo), foi determinada de acordo com os métodos de análise de solos, Vettori (1969), através solução extratora de acetato de cálcio, pH 7,0 e ácido clorídrico (0,05N), titulado com hidróxido de sódio (0,1 N) e EDTA (0,0125 N) para hidrogênio (H⁺) mais alumínio (Al³⁺) e cálcio (Ca²⁺) mais magnésio (Mg²⁺) respectivamente sendo o sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) determinados no fatômetro de chama.

Os valores obtidos encontram-se na Tabela 6.15, variam de 11,99 meq/100g (para o solo de TEPB) e 5,37 meq/100g (para o solo de MOPA). Estes resultados se comparados com os encontrados na literatura para caulinitas puras, podem ser considerado elevados, contudo é bem conhecido conforme Queiroz de Carvalho (1979), que a caulinita presente em solos se

melhantes a estes é mal cristalizada e podem as ligações que bradas, desbalancear eletricamente o sistema elevando a sua capacidade de troca de cátions, bem como a presença de amorfos de sílica e alumina, podem influenciar nestes valores.

CÁTIONS TROCÁVEIS (meq/100g)

SOLOS	Ca ²⁺ (1)	Mg ²⁺ (2)	Na ⁺ (3)	K ⁺ (4)	Al ³⁺ (5)	H ⁺ (6)	C T C
TEPB	8,76	2,39	0,18	0,49	0,00	0,17	11,99
CTPB	3,79	0,02	0,44	3,20	0,02	3,20	10,67
ARPB	1,64	1,57	0,17	0,10	0,05	3,74	7,27
CAPI	1,02	0,59	0,19	0,14	0,45	4,14	6,53
MOPA	2,44	0,63	0,30	0,18	0,12	1,70	5,37

Tabela 6.15 - Cátions Trocáveis (meq/100g) dos Solos, (determinados na fração menor que 2 μ m)

Carvalho Borba (1981), que determinou a capacidade de troca de cátions (C.T.C.) dos solos objeto do presente estudo, pelo método sugerido por Busemberg e Clemency (1973), reporta os seguintes valores:

SOLOS	CTC (meq/100g)		
	pH-7 (1)	pH-10 (2)	(2) - (1)
TEPB	13,8	18,0	4,2
CTPB	10,9	15,0	4,1
ARPB	8,7	10,6	1,9
CAPI	10,8	11,3	0,5
MOPA	6,9	9,4	2,5

Tabela 6.15.1 - Capacidade de Troca de Cátions da Fração Menor que 2 μ m dos Solos.

Como pode ser observado na Tabela 6.15.1 os valores para a capacidade (total) de troca de cations são mais elevados que os valores dos cations trocáveis apresentados na Tabela 6.15 o que está de acordo com o esperado, em virtude da capacidade de troca de alguns cations não ter sido determinada como pode ser visto na tabela 6.15.

A capacidade de troca de cations, segundo estudos recentes efetuados por Queiroz de Carvalho (1979) em estabilização de solos vermelhos tropicais com cal, mostrou-se como um dos parâmetros que mais influenciam a reatividade do solo-cal, não de forma direta, mas como a diferença da CTC medida a um pH-10 e a um pH-7.

Hilmay e Elgabaly citados por Thornburn e Mura (1968) mostram a influência da capacidade de troca de cations nos sistemas solo-NaCl e NaOH demonstrando a habilidade de adsorção de sódio pelos solos.

6.16 - IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA

A identificação mineralógica dos solos foi realizada através de difração de raios-X e microscopia eletrônica.

A análise das difrações de raios-X revelou que as frações pedregulho, areia e silte são na sua maioria compostas por quartzo, goetita e hematita. Alguns solos exibiram picos característicos dos minerais anatásio, mica e microclina, o argilo-mineral presente nestas frações foi a caulinita. A fração argila apresentou-se composta principalmente pela caulinita que foi o único argilo-mineral identificado, também observou-se pequenas quantidades de goetita, hematita e anatásio.

Na Tabela 6.16 apresenta-se os principais constituintes mineralógicos da fração argila.

SOLOS	CONSTITUINTES MINERALÓGICOS		
	DEFINIDO	FRACO	INDEFINIDO
TEPB	Caulinita	Quartzo	Goetita/Hematita
CTPB	Caulinita/Goetita	Quartzo/Anatásio	Hematita/Calcáreo
ARPB	Caulinita/Quartzo	Anatásio	Hematita
CAPI	Caulinita/Quartzo/ Anatásio	Quartzo	Hematita
MOPA	Caulinita	-	-

Tabela 6.16 - Constituintes Mineralógicos dos Solos
Laudo das Micrografias Eletrônicas.

Solo TEPB - A amostra, apresentou-se constituída por partículas de perfil hexagonal, bem definido, do argilo-mineral caulinita, de finíssima granulometria e de pequena espessura na forma de partículas isoladas e aglomeradas. Em alguns casos observou-se pequena tendência para o enrolamento das bordas das partículas.

Solo CTPB - A amostra apresentou-se constituída por partículas de perfil hexagonal, pouco definido, do argilo-mineral caulinita de fina granulometria e espessuras variáveis. Havendo presença de "stocks" opacos aos elétrons, indicativo de uma difícil desagregação em água. Observou-se a presença de alguns bastões que podem resultar do enrolamento de partículas ou da posição de algumas partículas em relação ao campo observado e finalmente observou-se a presença de uma partícula de mica caracterizada pela presença das típicas franjas de "Moire".

Solo ARPB - A amostra apresentou-se constituída por partículas de perfil hexagonal, pouco definido do argilo-mineral caulinita de granulometria variável. Havendo a presença de "stocks" opacos aos elétrons, indicativos de uma difícil desagregação em água. Observou-se também a presença de alguns

bastões que podem resultar do enrolamento de partículas, ou da posição de algumas partículas em relação ao campo observado. Houve a presença de uma partícula tubular provavelmente de haloisita e finalmente foi possível observar aglomerados escamosos, de forma geométrica não definida, não identificados.

Solo CAPI - A amostra apresentou-se constituída por partículas de perfil hexagonal, do argilo mineral caulinita, de finíssima granulometria e de pequena espessura, na forma de partículas isoladas e aglomerados. Observou-se frequentemente a presença de pequenos bastões que podem resultar do enrolamento de partículas ou da posição vertical de algumas partículas em relação ao campo observado.

Solo MOPA - A amostra apresentou-se constituída por partículas de perfil hexagonal, bem definido, do argilo-mineral caulinita de fina granulometria e espessuras variáveis. Havendo também a presença de "stocks" opacos aos elétrons, indicativo de uma difícil desagregação em água. Observou-se frequentemente a presença de bastões que podem resultar do enrolamento de partículas ou da posição vertical de algumas partículas em relação ao campo observado.

Em resumo pode-se inferir que:

- a) a análise da difração de raios-X revelou que os solos estudados são compostos por quartzo, goetita, hematita e caulinita. Em algumas amostras, apareceram minerais acessórios como anatásio, mica e microlina;
- b) a microscopia eletrônica confirmou os resultados da difração de raios-X, quanto a presença da caulinita, e acrescentou a existência de "stocks" de difícil desagregação em água. (solos

CTPB, ARPB e MOPA).

Dos materiais empregados no presente estudo pode-se resumir o seguinte:

- a. a cal empregada é do tipo hidratada calcítica, com 81,31% de Ca(OH)_2 ;
- b. a soda cáustica utilizada é do tipo comercial em escamas com 81,25% de NaOH;
- c. o cloreto de sódio empregado é do tipo comercial pulverizado ($d_{\text{máx}}$ 0,15 mm) com 92,35% de NaCl;
- d. a água utilizada na mistura foi destilada com $\text{pH} = 7,1$ e condutividade elétrica igual a $3,7 \mu\text{S}$;
- e. os solos estudados foram originários de regiões tropicais, Norte e Nordeste do Brasil, com características geoclimáticas distintas e bem definidas. Precipitações médias anuais crescentes de 400 mm (CTPB) a 2760 mm (MOPA), índice xerotérmico decrescente e vegetação ascendente de caatinga a floresta subtropical;
- f. o índice de atividade dos solos pesquisados, como definido por Skempton, variou de 0,64 a 0,99. Podendo-se inferir tratar-se de solo inativo do grupo 2, a normal do grupo 3 segundo a classificação de Skempton (1953). (Ver apêndice II);
- g. os solos são vermelhos tropicais, solos lateríticos, conforme DNER (1977) com as seguintes características:
 1. solo de TEPB apresenta $\text{A.E} = 33,6 \text{ m}^2/\text{g}$; $\text{CTC} = 13,8 \text{ meq}/100 \text{ g}$; $\text{pH} = 4,9$; $\sigma = 1,68 \times 10^{-1} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 9,6%; alumina amorfa = 3,2%;

ferro amorfo = 4,2%; sílica/alumina = 2,62; sílica/sexquióxidos = 1,86(*); matéria orgânica = 0,88%; $\gamma_g = 2,72 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; composição granulométrica, 13,8% de pedregulho; 60,2% de areia; 10,0% de silte e 16,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que $2 \mu\text{m}$ argilo mineral caulinita; LL = 39,6%; LP = 24,6%; IP = 15,0%; LC = 11,5%; $\gamma_s = 1687 \text{ kg/m}^3$; hot = 19,0%; abrasão "Los Angeles" = ND; classificação HRB-A-2-6, SUCS (extendida) - SC/CI (Ver apêndice III);

2. solo CTPB apresenta AE = $50,7 \text{ m}^2/\text{g}$; CTC = 10,9 meq/100 g; pH = 4,8%; $\sigma = 1,48 \times 10^{-1} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 12,2%; alumina amorfa = 4,17; ferro amorfo = 0,80%; sílica/alumina = 2,16; sílica/sexquióxido = 1,68; matéria orgânica = 1,39%; $\gamma_g = 2,77 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; composição granulométrica, 42,2% de pedregulho; 39,8% de areia; 8,0% de silte e 10,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que $2 \mu\text{m}$ argilo mineral caulinita; LL = 28,6%; LP = 22,2%; IP = 6,4% e LC = 12,7%; $\gamma_s = 1900 \text{ kg/m}^3$; hot = 14,5%; abrasão "Los Angeles" = 34,8%; classificação HRB-A-2-6, SUCS (extendida) - GC/CL (Ver apêndice III);

3. solo de ARPB apresenta AE = $38,9 \text{ m}^2/\text{g}$; CTC = 8,7 meq/100 g; pH = 5,0; $\sigma = 1,12 \times 10^{-1} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 10,30%; alumina amorfa = 4,32%;

(*) sílica, alumina e ferro amorfos - conforme IPR/DNER - UFPB (1980)

ferro amorfo = 3,78%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxidos = 1,70; matéria orgânica = 1,35%; $\gamma_g = 2,77 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; composição granulométrica, 47,2% de pedregulhos; 34,8% de areia 7,0% de silte e 11,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que $2\mu\text{m}$ argilo mineral caulinita; LL = 42,0%; LP = 31,1%; IP = 10,9%; LC = 14,3%; $\gamma_s = 1710 \text{ kg/m}^3$; hot = 18,8%; abrasão "Los Angeles" = 62,2%; classificação HRB-A-2-6, SUCS (extendida) GM/MI (Ver apêndice III);

4. solo de CAPI apresenta AE = $36,8 \text{ m}^2/\text{g}$; CTC = 10,8 meq/100 g; pH = 4,7; $\sigma = 3,35 \times 10^{-2} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 10,9%; alumina amorfa = 5,17%; ferro amorfo = 1,01%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxidos = ND; matéria orgânica = 1,53%; $\gamma_g = 2,90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; composição granulométrica, 56,3% de pedregulhos, 26,7% de areia 7,5% de silte e 9,5% de argila; composição mineralógica da fração menor que $2\mu\text{m}$ argilo mineral caulinita; LL = 25,2%; LP = 19,1%; IP = 6,1%; LC = 5,5%; $\gamma_s = 2085 \text{ kg/m}^3$; hot = 10,0%; abrasão "Los Angeles" = 28,8%; classificação HRB-A-2-4, SUCS - GC/CL (Ver apêndice III);
5. solo de MOPA apresenta AE = $25,8 \text{ m}^2/\text{g}$; CTC = 6,9 meq/100 g; pH = 4,9; $\sigma = 9,60 \times 10^{-2} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 13,9%; alumina amorfa = 5,29%; ferro amorfo = 0,75%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxidos = 1,83; matéria orgânica = 0,70%; composição granulométrica, 29,9% de pedregulhos, 30,1% de areia, 19,0% de silte e

21,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que 2 μ m argilo mineral cauliníta; LL = 46,5%; LP = 26,9%; IP = 19,7%; LC = 17,9%; γ_s = 1617 kg/m³; hot = 22,9%; abrasão "Los Angeles" = 35,8%; classificação HRB-A-4, SUCS (extendida) GM/MI (Ver apêndice III).

B - Ensaio para Avaliação das Propriedades de Engenharia
Selecionadas

6.17 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA (ATTERBERG) DOS SOLOS TRATADOS COM ADITIVOS

6.17.1 - Sistema Solo-Cal

A adição de cal aos solos estudados modificou de diferentes formas e em diferentes graus os limites de consistência dos mesmos, convergindo no entanto a um comportamento, que foi a redução do índice de plasticidade.

Como pode ser verificado na Tabela 6.18 e Figuras 6.17.1-A, a 6.17.1-E, os solos tiveram em geral não definido seu limite de liquidez (LL); o limite de plasticidade cresceu desde a adição de 1% de cal ou modificou-se para não plástico, com uma consequente redução final do índice de plasticidade. A seguir serão mostrados detalhes do comportamento dos solos.

Solo de TEPB - Na Figura 6.17.1-A observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com incremento de cal. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 5,3% (de 39,6% para 37,5%) no limite de limite de liquidez, de 22,0% (de 25,0% para 30,5%) no limite de plasticidade, e de 53,3% (de 15,0% para 7,0%) no índice de plasticidade; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 5,3% (de 39,6% para 37,5%) no limite de liquidez, de 18,0% (de 25,0% para 29,5%) no limite de plasticidade, de 46,7% (de 15,0% para 9,0%) no índice de plasticidade; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 3,0% (de 39,6% para 38,4%) no limite de liquidez, de 20,0% (de 25,0% para 30,0%) no limite de plasticidade e de 44,0% (de 15,0% para 8,4%) no ín

SOLOS	TEPB			CTPB			CAPI			ARPB			MOPA			
	LL (1%)	LP (1%)	IP (1%)	LL (1%)	LP (1%)	IP (1%)	LL (1%)	LP (1%)	IP (1%)	LL (1%)	LP (1%)	IP (1%)	LL (1%)	LP (1%)	IP (1%)	
NATURAL	39,6	25,0	15,0	28,6	22,2	6,4	25,2	19,1	6,1	42,0	32,6	10,9	46,5	26,8	19,7	
CAL (%)																
1	37,5	30,5	7,0	30,3	23,4	6,9	25,8	NP	NP	40,7	31,2	9,5	40,9	26,8	14,1	
4	37,5	29,5	8,0	33,3	NP	NP	27,1	NP	NP	41,8	34,5	7,3	43,7	30,2	13,5	
7	38,4	30,0	8,4	33,1	NP	NP	25,8	NP	NP	42,4	37,1	5,3	45,6	31,2	14,4	
10	38,1	31,1	7,0	33,0	NP	NP	28,4	NP	NP	41,7	NP	NP	46,5	33,1	13,4	
NaCl (%)																
1,2	34,4	20,1	14,3	27,8	19,8	8,0	22,6	16,1	6,5	40,6	28,1	12,5	35,1	21,3	14,1	
2,0	34,7	19,8	14,9	27,5	19,1	8,4	23,3	14,6	8,7	44,4	26,8	17,6	34,5	21,3	13,2	
3,0	34,2	20,0	14,3	28,7	17,3	11,4	22,5	14,5	8,0	41,2	23,7	17,5	32,5	20,5	12,0	
NaOH (%)																
0,3	31,6	20,7	10,9	23,6	15,7	7,9	17,7	11,3	6,4	27,7	18,7	9,0	25,5	16,5	9,0	
0,5	29,0	20,0	9,0	22,3	14,6	7,7	19,2	11,9	7,3	27,7	18,5	9,2	30,3	19,0	11,3	
1,2	34,3	20,6	13,7	33,6	18,6	15,0	26,2	14,8	11,4	40,9	19,3	21,6	38,3	19,8	18,5	
2,4	38,8	22,9	15,9	44,0	19,8	24,2	28,6	14,5	14,1	55,6	21,3	34,3	41,2	20,4	20,8	
3,0	39,3	21,2	18,1	40,9	19,9	21,0	28,0	15,9	12,1	53,6	22,5	31,1	40,6	20,2	20,4	

LL = LIMITE DE LIQUIDEZ
LP = LIMITE DE PLASTICIDADE
IP = ÍNDICE DE PLASTICIDADE
NP = NÃO PLÁSTICO

Tabela 6.17 - Limites de Atterberg dos Solos Tratados com Aditivo (Cal, NaCl e NaOH)

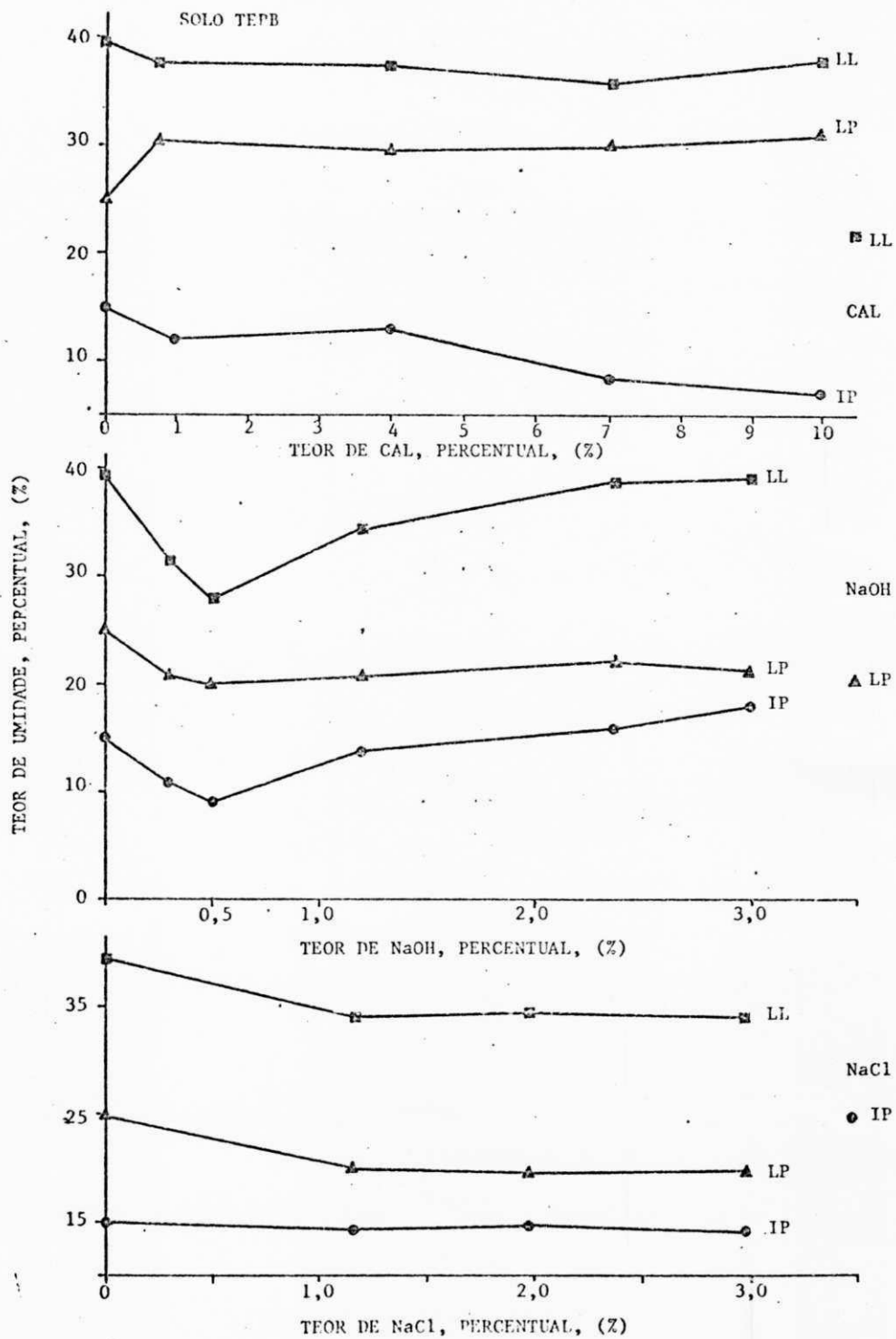


Figura - 6.17.1-A - Limites de Atterberg do Solo TEPB Tratado com Cal, NaOH e NaCl

dice de plasticidade; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 3,0% (de 39,6% para 38,1%) no limite de liquidez, de 24,4% (de 25,0% para 31,1%) no limite de plasticidade e de 53,3% (15,0% para 7,0%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o limite de liquidez tendeu a ser reduzido (em várias intensidades visto que algumas variações estão na faixa de repetibilidade) o que contraria os modelos teóricos; que o limite de plasticidade foi elevado e que o índice de plasticidade foi reduzido.

Solo de CTPB - Na Figura 6.17.1-B observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de cal. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 7,0% (de 28,6% para 30,3%) no limite de liquidez, de 5,1% (de 22,2% para 23,4%) no limite de plasticidade e de 8,0% (de 6,4% para 6,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 4% de cal, ocorreu uma variação de 16,4% (de 28,6% para 33,3%) no limite de liquidez, o limite e o índice de plasticidade se tornaram não plástico; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 15,7% (de 28,6% para 33,1%) no limite de liquidez, o limite e o índice de plasticidade se tornaram não plástico; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 15,4% (de 28,6% para 33,0%) no limite de liquidez, o limite e o índice de plasticidade se tornaram não plástico. Assim sendo pode-se inferir: que o limite de liquidez foi elevado; que o limite de plasticidade foi elevado passando posteriormente a não plástico; que o índice de plasticidade foi modificado passando a não plástico.

Solo de ARPB - Na Figura 6.17.1-C observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de cal. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natu

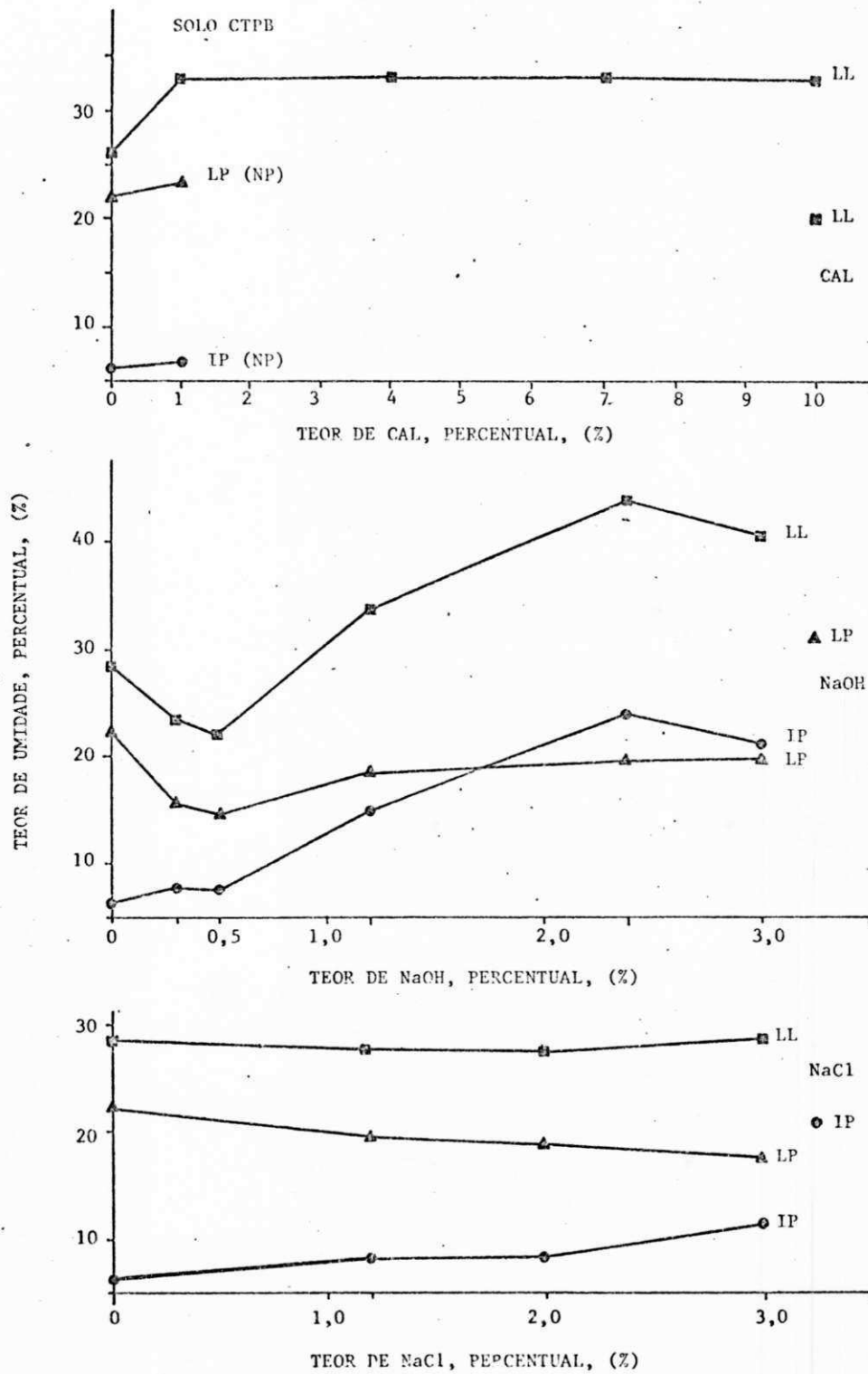


Figura - 6.17.1-B - Limites de Atterberg do Solo CTPB Tratado com Cal, NaOH e NaCl

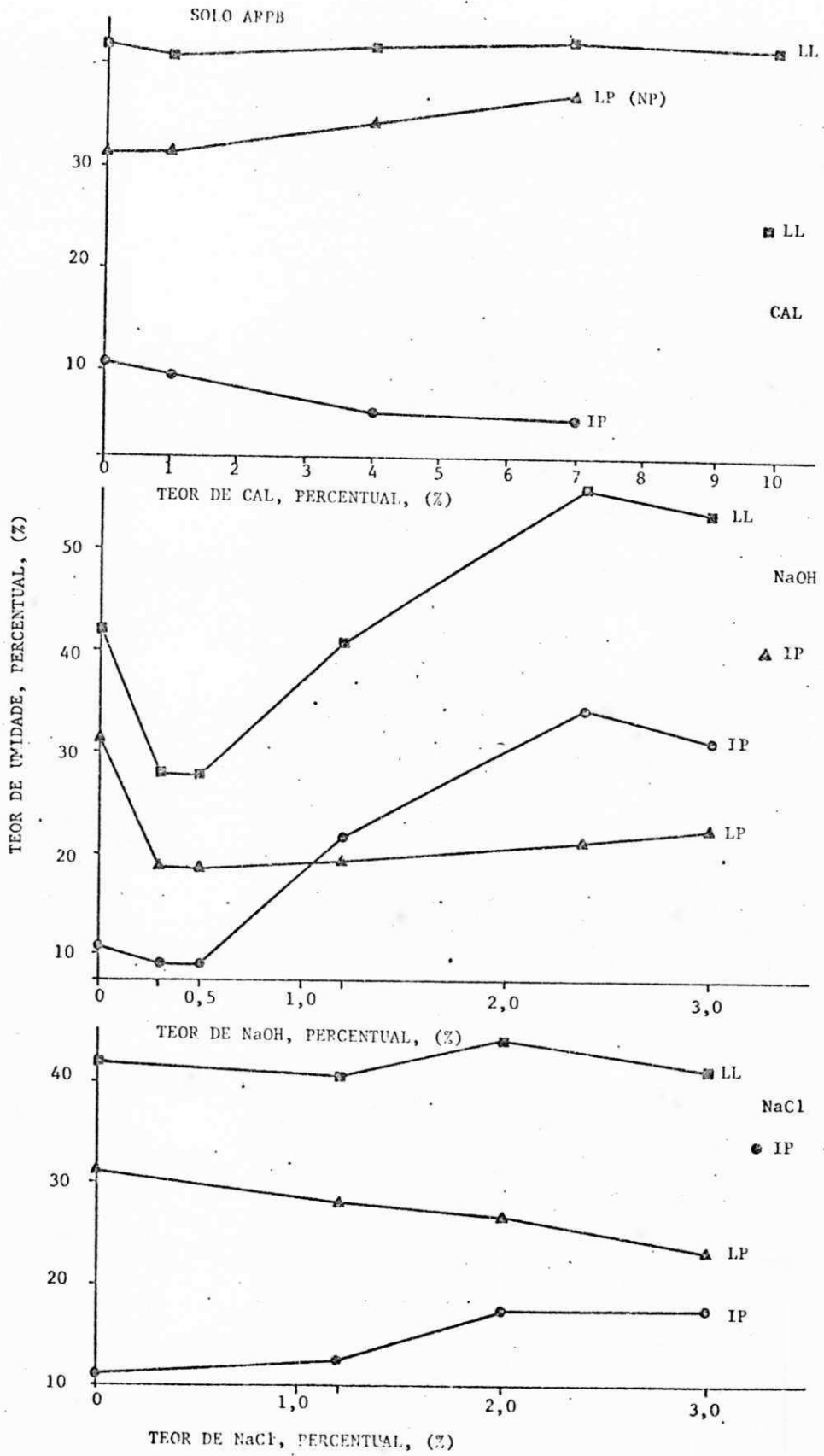


Figura 6.17.1-C - Limites de Atterberg do Solo ARPB Tratado com Cal, NaOH e NaCl

ral foram os seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 3,1% (de 42,0% para 40,7%) no limite de liquidez, de 0,3% (de 31,1% para 31,2%, não houve variação) no limite de plasticidade, e de 12,8% (de 10,9 para 9,5%) no índice de plasticidade; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 0,5% (de 42,0% para 41,3%) no limite de liquidez, de 10,9% (de 31,1% para 34,5%) no limite de plasticidade e de 33,0% (de 10,9% para 7,3%) no índice de plasticidade; para a adição de 7,0% de cal ocorreu uma variação de 0,9% (de 42,0% para 42,4%) no limite de liquidez, de 19,3% (de 31,1% para 37,1%) no limite de plasticidade e de 51,4% (de 10,9% para 5,3%) no índice de plasticidade; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 0,1% (de 42,0% para 41,7%) e o limite e índice de plasticidade se tornaram não plástico. Assim sendo pode-se inferir: que o limite de liquidez não sofreu modificações significantes com a adição de cal; que o limite de plasticidade foi gradualmente elevado, tornando-se não plástico para a adição de 10% de cal; que o índice de plasticidade foi gradualmente reduzido, tornando-se não plástico.

Solo de CAPI - Na Figura 6.17.1-D observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de cal. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 2,4% (de 25,2% para 25,8%) no limite de liquidez, no limite de plasticidade de 19,1% para não plástico, e no índice de plasticidade de 6,1 para não plástico; este comportamento do limite de plasticidade e índice de plasticidade, de se tornarem não plástico ocorreu com as seguintes adições de 4%, 7% e 10% de cal; para a adição de 4%, 7% e 10% de cal as variações no limite de liquidez foram respectivamente de 7,5% (de 25,2% para 27,1%), de 2,4% (de 25,2% para 25,8%) e de 12,7% (de 25,2% para 28,4%). Assim sendo po

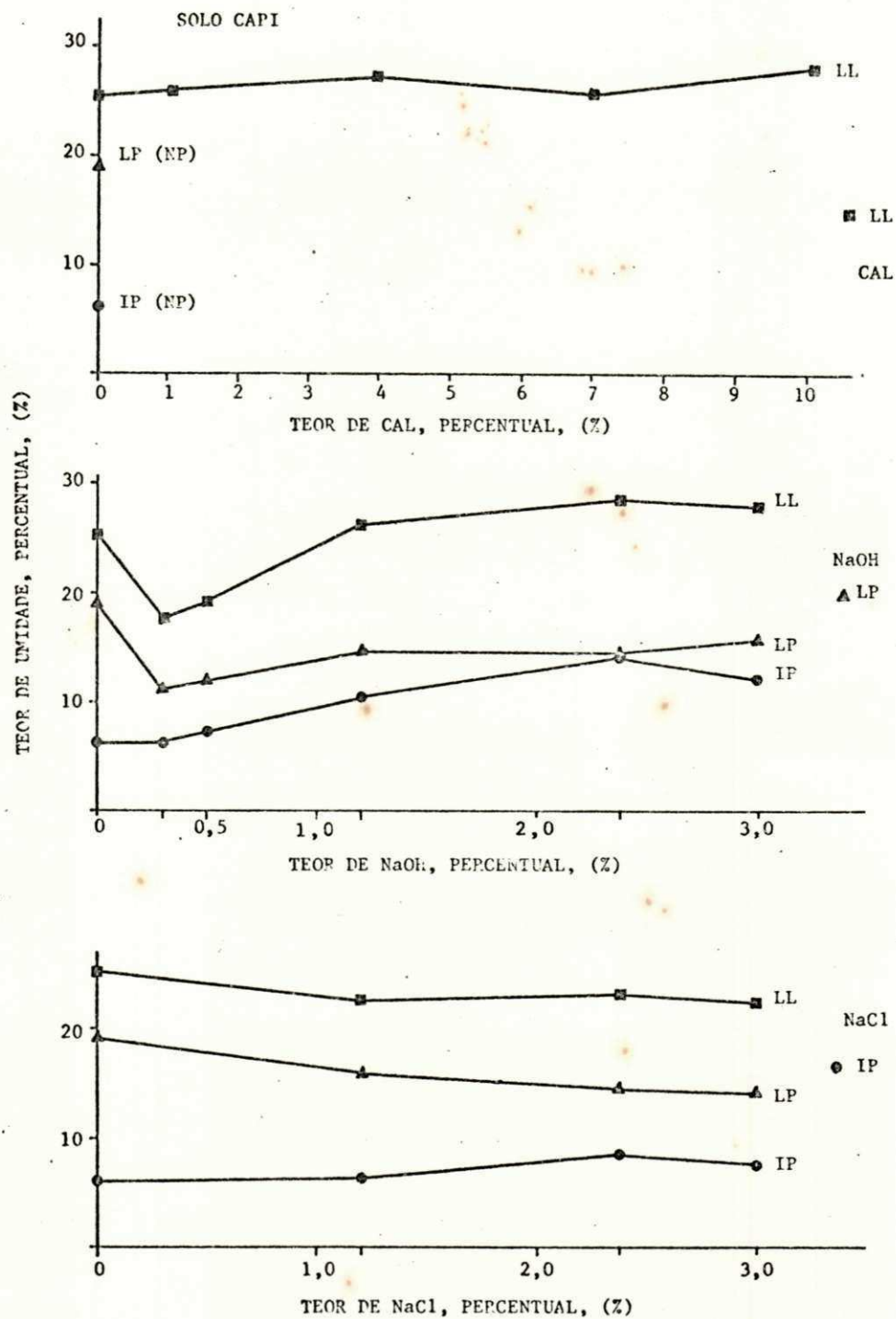


Figura 6.17.1-D - Limites de Atterberg do Solo CAPI Tratado com Cal, NaOH e NaCl

de-se inferir: que o limite de liquidez tendeu a ser elevada; que o limite de plasticidade passou a não plástico com apenas a adição de 1% e que o índice de plasticidade também foi modificado passando a não plástico.

Solo de MOPA - Na Figura 6.17.1-E observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de cal. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 12,0% (de 46,5% para 40,9%) no limite de liquidez de 0,0% (de 26,8 para 26,8, não ocorrendo variação) no limite de plasticidade e de 31,5% (de 19,7% para 14,1%) no índice de plasticidade, para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 6,0% (de 46,5% para 43,7%) no limite de liquidez, de 12,7% (de 26,8% para 30,2%) no limite de plasticidade e de 31,5% (de 19,7% para 13,5%) no índice de plasticidade; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 1,9% (de 46,5% para 45,6%) no limite de liquidez, de 16,4% (26,8% para 31,2%) no limite de plasticidade e de 26,9% (19,7% para 14,4%) no índice de plasticidade; para a adição de 10% de cal não ocorreu variação 0,0% (de 46,5% para 46,5%) no limite de liquidez, de 23,5% (de 26,8% para 33,1%) no limite de plasticidade e de 32,0% (de 19,7% para 13,4%). Assim sendo pode-se inferir: que houve uma tendência de redução do limite de liquidez com a adição de cal; que o limite de plasticidade foi elevado com a adição de cal e que o índice de plasticidade foi reduzido.

Os solos de CTPB e CAPI se comportaram como não plásticos (NP) com apenas a adição de 1% de cal. Os solos de ARPB necessitou da adição de até 7% de cal, em relação ao peso seco, para se comportar como não plástico (NP). Os solos de TEPB e MOPA, se comportaram como plástico até com 10% de cal, tendo reduzido o IP em 47% e 68%, respectivamente.

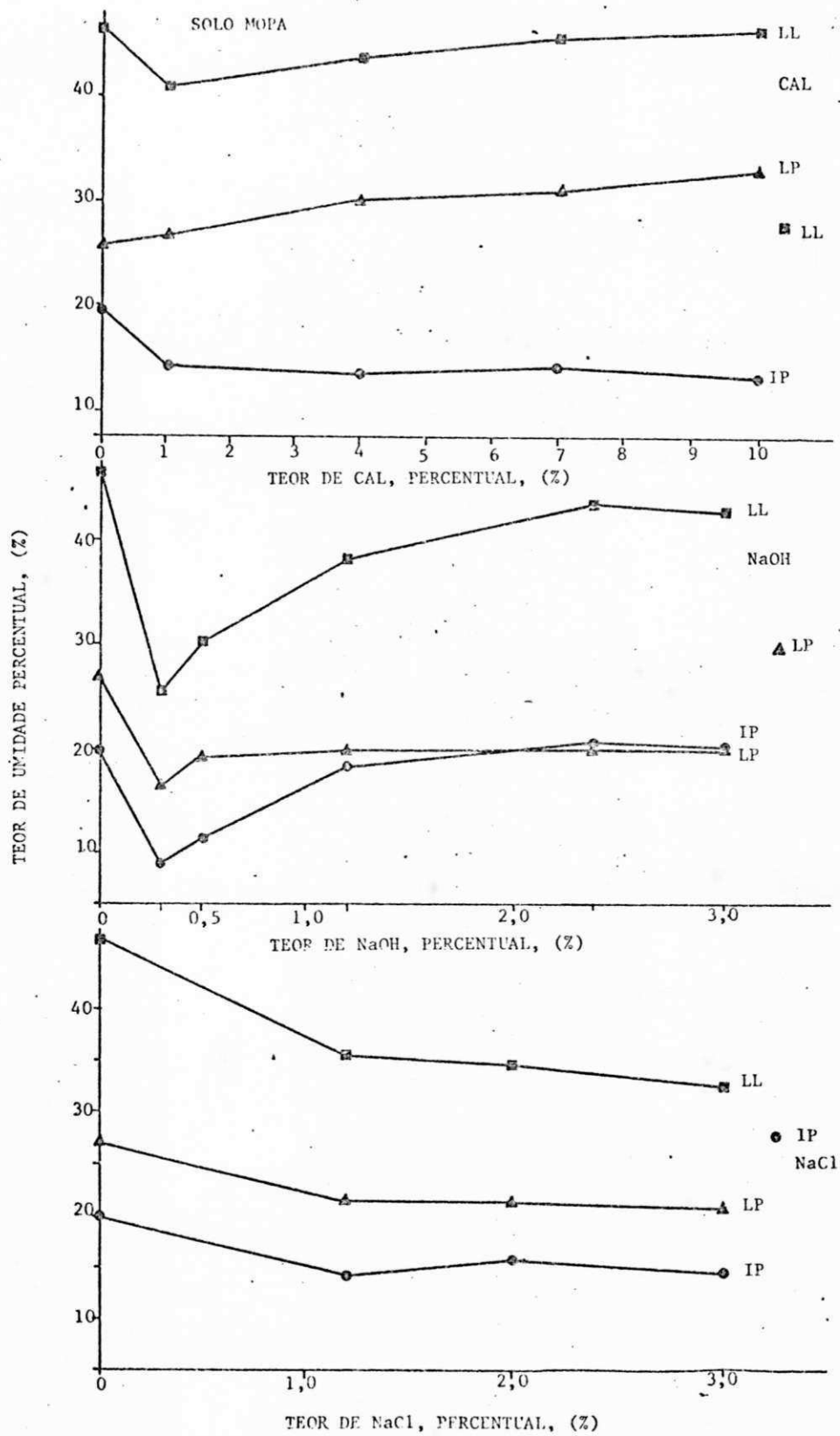


Figura - 6.17.1-E - Limites de Atterberg do Solo MOPA Tratado com Ca, NaOH e NaCl

tivamente.

O mecanismo responsável pela redução da faixa de plasticidade devido a adição de cal a solos, principalmente nos tropicais lateritizados, não está ainda completamente determinado, além de que, estes solos se comportam às vezes de maneira até adversa aos de clima temperado após a adição de cal. Diamond e Kinter (1965) em sua revisão interpretativa dos mecanismos da estabilização solo-cal, reportam que, a redução da plasticidade devido à adição de cal a solos se deve à floculação das partículas de argila, em decorrência do recobrimento dessas partículas por cátions de cálcio com cimentação fraca, tornando o solo granular, no aspecto de friabilidade. Tal assertiva é ratificada por Castro, Mercado e Dantas, citados por Guimarães (1971).

O crescimento do limite de plasticidade até um valor estacionário é resultante da estrutura floculada formada. Quanto ao provável crescimento do limite de liquidez uma explicação, também fenomenológica, é oferecida por Daniels (1971), que postula para solos cauliniticos, o seguinte: "a natureza das partículas floculadas, pode aumentar a atração capilar do solo por água e o tipo dessa água, pode restringir muito o movimento relativo das partículas sob a ação cisalhante do limite de liquidez (LL). Desse modo seria então requerida mais água para separar as partículas, lubrificá-las, que então poderiam fluir sob a ação cisalhante do equipamento usado na determinação do limite de liquidez (LL). Os dados do presente estudo não dão suporte a este modelo.

Souza Santos (1975, 1980) relata que os efeitos do cátion cálcio em argilas cauliniticas, inicialmente incide sobre a água adsorvida à superfície do argilo mineral, tornando-a muito rígida, isto é, com elevada orientação, já podendo exercer uma apreciável força de ligação entre as partículas e tendendo a manter as várias camadas cristalinas unidas, requerendo pois, em decorrência da formação da película de água rígida (orientada) maiores quantidades de água total

e necessária para haver água líquida como lubrificante. Este comportamento é possível, que ocorra quando da adição de cal a solos lateríticos, cujo argilo-mineral predominante é a caulinita e possa explicar a elavação do limite de liquidez (LL). Um outro efeito do cátion adsorvido se faz notar por ser o mesmo de maior carga elétrica, sendo mais fortemente adsorvido, levando a um valor de potencial zeta (menor que o crítico), que torna a partícula instável, isto é, o cálcio atua como agente flocculante. Os flocos formados contêm microporos que retêm a água, (Cabrera e O'Flaerty (1975)) que de outro modo estaria disponível para lubrificação, desse modo, a estrutura flocculada é responsável pelo incremento do limite de plasticidade.

Os solos estudados não apresentaram tendências definidas, quanto a LL, havendo um comportamento contraditório entre eles. Os solos TEPB e MOPA apresentaram um comportamento contrário ao existente na literatura, pois houve um decréscimo do limite de liquidez com o aumento do percentual de cal. Quanto ao LP os resultados seguem os modelos teóricos, pois houve um crescimento do LP com o aumento do percentual de cal ou o solo tornou-se não plástico (NP). Contudo pode-se observar que o IP apresentou um comportamento similar ao preconizado pelos modelos teóricos, pois o IP é reduzido passando até a não plástico (NP) com o aumento percentual de cal.

6.17.2 - Sistema Solo-NaOH

A adição de NaOH aos solos modificou de diferentes formas e em diferentes graus os limites de consistência dos mesmos, convergindo a um comportamento geral peculiar, que consistiu em reduzir inicialmente a plasticidade para baixos teores de NaOH e em seguida elevá-la em função do incremento de aditivo.

Solo de TEPB - Na Figura 6.17.1-A observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaOH. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 20,2% (de 39,6% para 31,6%) no limite de liquidez, de 17,2% (de 25,0% para 20,7%) no limite de plasticidade e de 27,3% (de 15,0% para 10,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 26,3% (de 39,6% para 29,0%) no limite de liquidez, de 20,0% (de 25,0% para 20,0%) no limite de plasticidade, de 40,0% (de 15,0% para 9,0%) no índice de plasticidade; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 13,4% (de 39,6% para 34,3%) no limite de liquidez, de 17,6% (de 25,0% para 20,6%) no limite de plasticidade e de 3,7% (de 15,0% para 13,7%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,4% ocorreu uma variação de 2,0% (de 39,6% para 33,3%) no limite de liquidez, de 3,4% (de 25,0% para 22,9%) no limite de plasticidade e de 6,0% (de 15,0% para 15,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaOH de 0,3% (de 39,6% para 39,3%), de 15,2% (25,0% para 21,2%) no limite de plasticidade e de 20,7% (de 15,0% para 13,1%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o comportamento do limite de liquidez, limite de plasticidade e do índice de plasticidade pode ser assemelhado a uma curva de defloculação típica, não obstante alguns dados não dêem suporte a este modelo.

Solo de CTPB - Na Figura 6.17.1-B observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaOH. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 17,5% (de 23,6% para 23,6%) no limite de liquidez, de 29,3% (de 22,2% para 15,7%) no limite de plasti

cidade e de 23,4% (de 6,4% para 7,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 22,0% (de 23,6% para 22,3%) no limite de liquidez, de 34,2% (de 22,2% para 14,6%) no limite de plasticidade e de 23,4% (de 6,4% para 7,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 17,5% (de 23,6% para 33,6%) no limite de liquidez, de 15,3% (de 22,2% para 13,7%) no limite de plasticidade e de 134,4% (de 6,4% para 15,0%); para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 53,8% (de 23,6% para 44,0%) no limite de liquidez, de 10,8% (de 22,2% para 19,3%) no limite de plasticidade e de 278,1% (de 6,4% para 24,2%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 43,0% (de 23,6% para 40,9%) no limite de liquidez, de 10,4% (de 22,2% para 19,9%) no limite de plasticidade e de 228% (de 6,4% para 21,0%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o comportamento do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade pode ser assemelhado a uma curva de defloculação típica, não obstante alguns dados não dêem suporte a este modelo.

Solo de ARPB - Na Figura 6.17.1-C observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaOH. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 34,0% (de 42,0% para 27,7%) no limite de liquidez, de 39,8% (de 31,1% para 13,7%) no limite de plasticidade e de 15,6% (de 10,9% para 9,2%) no índice de plasticidade; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 34,0% (de 42,0% para 27,7%) no limite de liquidez, de 40,5% (de 31,1% para 13,5%) no limite de plasticidade, de 15,6% (de 10,9% para 9,2%) no índice de plasticidade; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 2,6% (de 42,0% para 40,9%) no limite de liquidez, de 37,9% (de 31,1% para

19,3%) no limite de plasticidade e de 93,2% (de 10,9% para 21,6%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 32,4% (de 42,0% para 55,6%) no limite de liquidez, de 31,5% (de 31,1% para 21,3%) no limite de plasticidade e de 214,6% (de 10,9% para 34,3%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 27,6% (de 42,0% para 53,5%) no limite de liquidez, de 27,7% (de 31,1% para 22,5%) no limite de plasticidade e de 135,3% (de 10,9% para 31,1%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir que o comportamento do limite de liquidez, do limite de plasticidade e índice de plasticidade pode ser assemelhado a uma curva de defloculação típica, não obstante alguns dados não dêem suporte a este modelo.

Solo de CAPI - Na Figura 6.17.1-D observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaOH. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 29,3% (de 25,2% para 17,7%) no limite de liquidez, de 40,8% (de 19,1% para 11,3%) no limite de plasticidade e de 4,9% (de 6,1% para 6,4%) no índice de plasticidade; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 23,8% (de 25,2% para 19,2%) no limite de liquidez, de 37,7% (de 19,1% para 11,9%) no limite de plasticidade e de 19,7% (de 6,1% para 7,3%) no índice de plasticidade; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 3,9% (de 25,2% para 26,2%) no limite de liquidez, de 22,5% (de 19,1% para 14,3%) no limite de plasticidade e de 56,9% (de 6,1% para 11,4%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 13,5% (de 25,2% para 28,6%) no limite de liquidez, de 24,1% (de 19,1% para 14,5%) no limite de plasticidade e de 131,1% (de 6,1% para 14,1%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma

variação de 11,1% (de 25,2% para 20,0%) no limite de liquidez, de 16,3% (de 19,1% para 15,9%) no limite de plasticidade e de 93,4% (de 6,1% para 12,1%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir que o comportamento do limite de liquidez, limite de plasticidade e do índice de plasticidade pode ser assemelhado a uma curva de defloculação, não obstante alguns dados não dêem suporte a este modelo.

Solo de MOPA - Na Figura 6.17.1-E observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaOH. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 45,2% (de 46,5% para 25,5%) no limite de liquidez, de 38,4% (de 26,3% para 16,5%) no limite de plasticidade e de 54,3% (de 19,7% para 9,0%) no índice de plasticidade; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 34,8% (de 46,5% para 30,3%) no limite de liquidez, de 29,1% (de 26,3% para 19,0%) no limite de plasticidade e de 43,1% (de 19,7% para 11,2%) no índice de plasticidade; para adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 17,6% (de 46,5% para 33,3%) no limite de liquidez, de 26,1% (de 26,3% para 19,3%) no limite de plasticidade e de 6,1% (de 19,7% para 18,5%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 11,4% (de 46,5% para 41,2%) no limite de liquidez, de 23,9% (de 26,3% para 20,4%) no limite de plasticidade e de 5,5% (de 19,7% para 20,2%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 12,7% (de 46,5% para 40,6%) no limite de liquidez, de 24,6% (de 26,3% para 20,2%) no limite de plasticidade e de 3,4% (de 19,7% para 20,4%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o comportamento do limite de liquidez, do limite de plasticidade e do índice de plasticidade pode ser assemelhado ao de uma curva de defloculação típica.

Os valores obtidos para os limites de Atterberg dos solos estudados no estado natural (sem aditivo) e após tratados com 0,3; 0,5; 1,2; 2,4 e 3,0% de NaOH, em relação ao peso do solo seco, encontram-se na Tabela 6.13 e Figuras 6.17.1-A a 6.17.1-E. Como se observa a adição de 0,3 e 0,5% de NaOH reduziu o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) sendo o gradiente de redução do limite de liquidez (LL) maior que o do limite de plasticidade (LP), ocorreu uma inicial redução do índice de plasticidade. Com o incremento de NaOH, 1,2; 2,4 e 3,0%, observa-se o aumento do limite de liquidez (LL), bem como do limite de plasticidade (LP), em decorrência do gradiente de elevação do limite de liquidez (LL) ser maior que o do limite de plasticidade (LP) amplia-se então o índice de plasticidade (IP).

Os resultados da influência da adição de NaOH nos limites de Atterberg dos solos, devem ser analisados com as devidas cautelas devido à própria metodologia do ensaio que induz altos coeficientes de variação (de até 15%) na reprodutibilidade, Marinho (1976). No presente estudo a repetibilidade foi considerada satisfatória tomando-se como padrão o preestabelecido e descrito no capítulo 5, itens 5.6.1 e 5.6.2.

O mecanismo responsável por tais variações ainda não são bem conhecidos, contudo uma explicação fenomenológica pode ser considerada. O comportamento dos limites de Atterberg versus teor de aditivo é típico de uma curva de defloculação. Segundo Souza Santos (1975) o mecanismo que resulta na curva de defloculação é o seguinte: o sistema argila-água disperso possui inicialmente uma alta viscosidade, logo LP elevado, pois possui flocos agregados ou aglomerados de vários tipos, com a adição dos teores iniciais de NaOH ou outro defloculante similar, modifica-se a concentração eletrolítica do meio havendo adsorção nas faces menores das partículas de caulinita, de hidróxila (OH^-) estabelecendo-se um potencial zeta acima do crítico, ocorrendo repulsão entre

as partículas de caulinita, nas interações, tipo face-face, face-lado e lado-lado que são destruídas, junto com os aglomerados resultando na diminuição da viscosidade até um mínimo bem como dos limites de Atterberg. Prosseguindo-se a adição de eletrólitos o sistema atinge novamente o potencial zeta crítico, ficando, novamente instável, havendo tendência a a gregação ou aglomeração das partículas e uma ascensão da viscosidade (elevação do limite de plasticidade) isto é, o ramo ascendente da curva de defloculação.

Um outro efeito do cátion sódio trocável, se faz notar na superfície do argilo-mineral. A água adsorvida "rígida ou orientada" forma uma película bastante espessa, porém com pequena orientação, isto é, uma "água frouxa", de modo que essa água exerce pouca força de ligação entre as partículas dos argilo-minerais, diminuindo a força de cisalhamento necessária para o deslizamento das partículas lamelares entre si, originando modificações na plasticidade. Resalta-se que o ânion em evidência é hidroxila. Calil (1972) reporta dados que exemplificam este comportamento em argilas para cerâmica branca.

Estes principais efeitos do cátion sódio sobre argilas caulínicas provavelmente ocorreram também com solos lateríticos, cujo argilo-mineral predominante é a caulinita. Desta forma, tem-se as modificações no limite de plasticidade, decorrentes do sistema disperso em maior ou menor intensidade e o limite de liquidez elevado ou reduzido em função da maior ou menor força de ligação entre as partículas. No caso específico dos solos estudados, a luz dos modelos teóricos descritos, verificou-se que o comportamento destes solos é bastante similar a este modelo. Ocorrendo inicialmente um decréscimo do LL e do LP até um valor mínimo, com percentual de aditivo próximo à capacidade de troca de cátions, posteriormente observa-se o seu crescimento, isto corresponde a uma curva de defloculação típica, como referido, onde a ação do sódio influencia na formação de uma camada de água ligada

"frouxa" que facilita o deslizamento de partículas com redução da viscosidade, implicando num menor consumo de água. Posteriormente a este mínimo tem-se uma tendência à flocculação com aumento da viscosidade do sistema havendo portanto, a necessidade de mais água. Quanto ao comportamento do IP, inicialmente decrescente, somente no caso do solo CTPB não se observou a curva em forma de "U", provavelmente devido aos valores específicos de LL e LP sem aditivo. Após um valor mínimo do IP todos os demais valores são crescentes em virtude dos fenômenos já descritos pela LL e LP.

Observou-se uma grande variação nas características de plasticidade após a adição de NaOH. Pequenos teores da ordem da capacidade de troca de cátion, implicam em baixos valores do LL, LP e IP, enquanto que teores mais elevados da ordem de 4 a 5 vezes a CTC, implicaram em LL, LP e IP bem mais elevados. Essas características devem ser cuidadosamente controladas pois podem implicar em diferentes classificações para estes solos quando submetidos a sistemas que se baseiam na carta de plasticidade de Casagrande. (SUCS)

6.17.3 - Sistema Solo-NaCl

A adição de NaCl aos solos modificou de diferentes formas e em diferentes graus os limites de consistência dos mesmos, convergindo a um comportamento em geral peculiar, que consistiu em reduzir os limites de liquidez (LL) e o de plasticidade (LP) não obstante para alguns solos ampliasse a faixa de plasticidade.

Os valores para os limites de Atterberg dos solos estudados após tratadôs com 1,2; 2,4 e 3,0% de NaCl em relação ao peso seco do solo, encontram-se na Tabela 6.17.3 e Figuras 6.17.3-A a 6.17.3-E.

Solo de TEPB - Na Figura 6.17.1-A observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaCl. Os valo

res são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 13,1% (de 39,6% para 34,4%) no limite de liquidez, de 19,6% (de 25,0% para 20,1%) no limite de plasticidade e de 27,3% (de 15,0% para 10,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 12,4% (de 39,6% para 34,7%) no limite de liquidez, de 20,0% (de 25,0% para 19,3%) no limite de plasticidade e de 0,7% (de 15,0% para 14,9%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 13,4% (de 39,6% para 34,3%) no limite de liquidez, de 20,0% (de 25,0% para 20,0%) no limite de plasticidade e de 4,6% (de 15,0% para 14,3%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o limite de liquidez foi reduzido; que o limite de plasticidade também foi reduzido e que o índice de plasticidade tendeu a ser reduzido. Parece haver uma tendência dos limites de Atterberg descreverem o ramo descendente de uma curva de defloculação típica.

Solo de CTPB - Na Figura 6.17.1-B observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaCl. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 2,3% (de 20,6% para 27,9%) no limite de liquidez, de 10,0% (de 22,2% para 19,8%) no limite de plasticidade e de 25,0% (de 6,4% para 3,0%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 3,0% (de 20,6% para 27,5%) no limite de liquidez, de 13,9% (de 22,2% para 19,1%) no limite de plasticidade e de 31,3% (de 6,4% para 8,4%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 0,3% (de 20,6% para 20,7%) no limite de liquidez, de 22,1% (de 22,2% para 17,3%) no limite de plasticidade e de 25,0% (de 6,4% para 3,0%) no

índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que praticamente não houve modificação no limite de liquidez, visto que os valores estão na faixa de repetibilidade do ensaio; que o limite de plasticidade foi reduzido e que o índice de plasticidade foi elevado.

Solo de ARPB - Na Figura 6.17.1-C observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaCl. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 3,3% (de 42,0% para 40,6%) no limite de liquidez; de 9,6% (de 31,1% para 28,1%) no limite de plasticidade e de 14,7% (de 10,9% para 12,5%) no índice de plasticidade; para adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 5,7% (de 42,0% para 44,4%) no limite de liquidez, de 13,3% (de 31,1% para 26,3%) no limite de plasticidade e de 61,5% (de 10,9% para 17,6%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 1,9% (de 42,0% para 41,2%) no limite de liquidez, de 23,8% (de 31,1% para 23,7%) no limite de plasticidade e de 60,6% (de 10,9% para 17,5%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que o limite de liquidez praticamente não foi modificado, visto que os valores estão na faixa de repetibilidade do ensaio; que o limite de plasticidade foi reduzido e que o índice de plasticidade foi elevado.

Solo de CAPI - Na Figura 6.17.1-D observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaCl. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 10,3% (de 25,2% para 22,6%) no limite de liquidez, de 15,7% (de 19,1% para 16,1%) no limite de plasticidade e de 6,6% (de 6,1% para 6,5%) no índice de plasticidade.

de; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 10,3% (de 25,2% para 22,6%) no limite de liquidez, de 23,6% (de 19,1% para 14,6%) no limite de plasticidade e de 42,6% (de 6,1% para 3,7%) no índice de plasticidade; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 10,7% (de 25,2% para 22,5%) no limite de liquidez, de 24,1% (de 19,1% para 14,5%) no limite de plasticidade e de 31,1% (de 6,1% para 3,0%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir: que os limites de liquidez e de plasticidade foram reduzidos enquanto o índice de plasticidade foi elevado.

Solo de MOPA - Na Figura 6.17.1-E observa-se o comportamento dos limites de Atterberg com o incremento de NaCl. Os valores são mostrados na Tabela 6.17. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 23,9% (de 46,5% para 35,4%) no limite de liquidez, de 20,5% (de 26,3% para 21,3%) no limite de plasticidade e de 23,4% (de 19,7% para 14,1%) no índice de plasticidade; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 25,3% (de 46,5% para 34,5%) no limite de liquidez, de 20,5% (de 26,3% para 21,3%) no limite de plasticidade e de 32,9% (de 19,7% para 13,2%); para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 30,1% (de 46,5% para 32,5%) no limite de liquidez, de 23,5% (de 26,3% para 20,6%) no limite de plasticidade e de 39,1% (de 19,7% para 12,0%) no índice de plasticidade. Assim sendo pode-se inferir que os limites de Atterberg foram modificados e reduzidos. Parece haver uma tendência destes parâmetros a descreverem o ramo descendente de uma curva de defloculação típica.

Como pode ser verificado com a adição de NaCl, os solos TEPB, CTPB, CAPI e MOPA tiveram seus limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) em geral reduzidos de 20% a 25%. O índice de plasticidade no solo de TEPB praticamente

não se modificou, pois os valores estão na faixa de repetibilidade de ensaio ($\pm 5\%$ em relação à média), no solo de MOPA este foi reduzido em 25%, nos solos de CTPB, CAPI e ARPB, o índice de plasticidade, aumentou, em até 75% (ARPB). Parece haver uma tendência em elevar o índice de plasticidade (IP) nos solos arenosos. Os solos de CTPB e ARPB diferentemente dos demais apresentaram uma ligeira ascensão no limite de liquidez contudo este valor está bastante próximo da faixa de repetibilidade do ensaio, donde se pode advir que praticamente não houve modificação no limite de liquidez destes solos. Os limites de plasticidade de todos os solos foram reduzidos, com o incremento de NaCl.

Consoante com as observações de Marinho (1976), que utilizou solos do mesmo tipo dos dessa pesquisa, os ensaios para determinação dos limites de Atterberg apresentam um alto coeficiente de variação (até 15%) na reproduzibilidade, daí a necessidade de cautela quando da interpretação dos seus resultados. No presente estudo a repetibilidade dos ensaios foi considerada satisfatória comparada aos critérios descritos nos itens 5.6.1 e 5.6.2, (Métodos).

Os fenômenos que ocorrem quando da adição de NaCl são um pouco similares aos que ocorrem com a adição de NaOH, devendo-se observar que as principais diferenças resultam do fato de ser o cloreto de sódio (NaCl) um sal neutro enquanto que o hidróxido de sódio (NaOH) é uma base forte, que pode eventualmente ser utilizada como agente defloculante em argilas para cerâmica ou em esmectitas para uso como agente tixotrópicos para fluido de perfuração de poços de petróleo. Essas similaridades e diferenças existentes fazem com que a ação do cloreto de sódio (NaCl) seja menos enérgica do que a do hidróxido de sódio (NaOH). Observando-se o comportamento do limite de plasticidade cuja interpretação fenomenológica é bem mais simples do que a do limite de liquidez, por não envolver esforços de cisalhamento, escoamento de líquidos, etc., verifica-se que com o aumento do percentual de

NaCl há um decréscimo do limite de plasticidade (LP) fato justificado no item anterior pela ação do cátion sódio. O baixo gradiente de decréscimo resulta do fato já citado anteriormente ou seja em virtude de ser o cloreto de sódio um sal neutro. Quanto ao limite de liquidez (LL) no caso dos solos CTPB, ARPB e CAPI não se observou uma tendência bem definida, entretanto para os solos TEPB e MOPA os valores são decrescentes com o aumento do teor de NaCl como seria de se esperar. No que se refere ao índice de plasticidade (IP) nenhuma generalização poderá ser feita, pois para o solo TEPB, praticamente não há alteração, para os de CTPB, ARPB e CAPI os valores foram crescentes enquanto que para o solo MOPA os valores foram decrescentes em relação ao teor de aditivo.

Em resumo pode-se observar que:

- a. o cátion sódio produziu na plasticidade dos solos, variações mais intensas que o cátion cálcio, quando adicionado na forma de hidróxido;
- b. para o sistema solo-NaOH, pequenos teores de aditivos da ordem da capacidade de troca de cátions, implicaram em baixos valores de LL, LP e IP, enquanto que os teores mais elevados da ordem de 4 a 5 vezes a CTC, implicaram em LL, LP e IP bem mais elevados;
- c. com a adição do hidróxido de sódio (NaOH), os limites de Atterberg tenderam a exibirem um comportamento similar de uma curva de defloculação típica nos solos mais argilosos;
- d. o cátion cálcio conferiu ao índice de plasticidade (IP) dos solos um comportamento similar ao preconizado pelos modelos teóricos, pois o IP é reduzido passando até a não plástico (NP) com o incremento de cal;

- e. o limite de liquidez dos solos após tratados com cal não apresentou, tendências definidas, havendo um comportamento oposto de um para ou tro solo;
- f. a ação do cátion sódio quando adicionado na forma de cloreto de sódio (NaCl) (sal neutro), não é tão evidenciada quanto na forma de hidróxido de sódio (NaOH) (base forte);
- g. o limite de plasticidade dos solos é reduzido com o aumento percentual de cloreto de sódio;
- h. o limite de liquidez de alguns solos, após tratados com cloreto de sódio (NaCl), não exibiu tendências bem definidas, somente em dois dos solos estudados estes valores decresceram com o incremento deste aditivo;
- f. uma análise comparativa após a adição de cal, NaOH e NaCl, mostra que inegavelmente as maiores variações ou os maiores efeitos são devidos a adição de NaOH (uma base forte), seguindo-se a cal (uma base menos forte) e finalmente do NaCl (um sal neutro).

6.18 - EFEITOS DOS ADITIVOS NA RELAÇÃO MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA E TEOR DE UMIDADE

6.18.1 - Solo Natural e Tratado com Cal

Os resultados das máximas massas específicas aparente seca e correspondente umidade ótima para os solos no estado natural e após tratamento com cal, encontram-se na Tabela 6.18.1. As correspondentes curvas de compactação encontram-se nas Figuras 6.18.1-A e 6.18.1-E.

Solo de TEPB - Na Figura 6.18.1-A observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.1. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 2,3% (de 1687 kg/m^3 para 1648 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 5,3% (de 19,0% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 1,3% (de 1687 kg/m^3 para 1665 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 7,9% (de 19,0% para 20,5%) para o teor de umidade ótima; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 6,0% (de 1687 kg/m^3 para 1585 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 10,5% (de 19,0% para 21,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 4,6% (de 1687 kg/m^3 para 1610 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 11,0% (de 19,0% para 21,1%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que somente para a adição de 7% de cal promoveu modificações cujos valores estão fora da repetibilidade do ensaio, sendo a máxima massa específica aparente seca reduzida e o teor de umidade ótima elevado. A

SISTEMA SOLO-CAL

	TEPB	CTPB	ARPB	CAPI	MOPA
0,0% CAL					
γs	1687	1900	1710	2085	1617
hot	19,0	14,5	18,8	10,0	22,9
RCS	NRI	NRI	NRI	NRI	NRI
RCS(*)	(243)	(177)	(239)	(154)	(317)
1% CAL					
γs	1648	1880	1685	2020	1620
hot	20,0	14,8	18,3	11,5	23,2
RCS	NRI	NRI	NRI	75	NRI
hntr	-	15,8	-	12,8	-
4% CAL					
γs	1665	1850	1695	2000	1610
hot	20,5	13,5	20,0	11,7	24,5
RCS	350	148	256	148	370
hntr	16,5	14,5	19,0	11,0	24,3
7% CAL					
γs	1585	1805	1709	2020	1610
hot	21,0	15,8	19,3	11,5	22,5
RCS	575	278	238	177	380
hntr	21,8	14,6	18,5	12,6	24,0
10% CAL					
γs	1610	1780	1680	1975	1610
hot	21,1	16,3	19,5	11,8	23,5
RCS	655	260	236	188,0	450
hntr	21,0	18,6	18,2	12,8	24,0

γs = máxima massa específica aparente seca, (kg/m³)

RCS = máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, (kPa)

hot = teor de umidade ótima, (%)

hntr = teor de umidade para a máxima tensão de ruptura (RCS), (%)

NRI = não resistiu à imersão

(*) = sem imersão

Tabela 6.18.1 - Máxima Massa Específica Aparente Seca (kg/m³), Teor Ótimo de Umidade (%), Máxima Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada (kPa) e Respectivo Teor de Umidade de Moldagem (%).

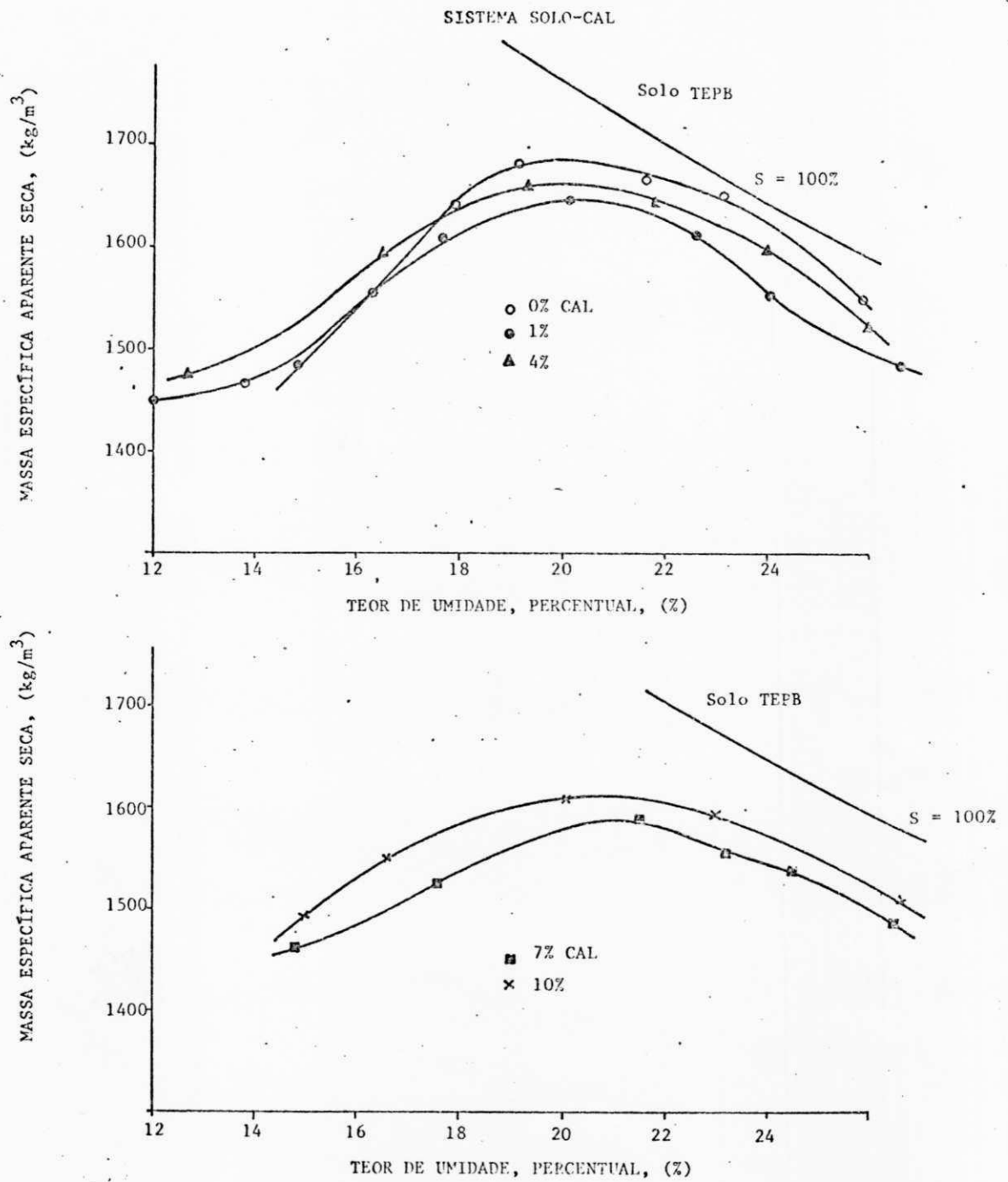


Figura - 6.18.1-A - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

adição de 1,4% e 10% de cal também apresentaram a elevação característica para a umidade ótima.

Solo de CTPB - Na Figura 6.18.1-B observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores obtidos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.19.1. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 1,1% (de 1900 kg/m^3 para 1880 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 2,1% (de 14,5% para 14,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 2,6% (de 1900 kg/m^3 para 1850 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 6,9% (de 14,5% para 13,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 2,6% (de 1900 kg/m^3 para 1850 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 8,9% (de 14,5% para 15,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 6,3% (de 1900 kg/m^3 para 1780 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 12,4% (de 14,5% para 16,3%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir: que os teores de 1%, 4% e 7% de cal adicionados ao solo não modificaram de fato a máxima massa específica do solo-cal em relação ao solo natural, o que ocorreu para a adição de 10% de cal; que a adição de 1% de cal também não modificou significativamente o teor de umidade; que a adição de 4% de cal reduziu este parâmetro, enquanto a adição de 7% e 10% elevou o teor de umidade ótima do sistema solo-cal em relação ao solo natural. Observa-se assim tendências a redução da máxima massa específica aparente seca e elevação do teor de umidade ótima.

Solo de ARPB - Na Figura 6.18.1-C observa-se em forma de gráfico

SISTEMA SOLO-CAL

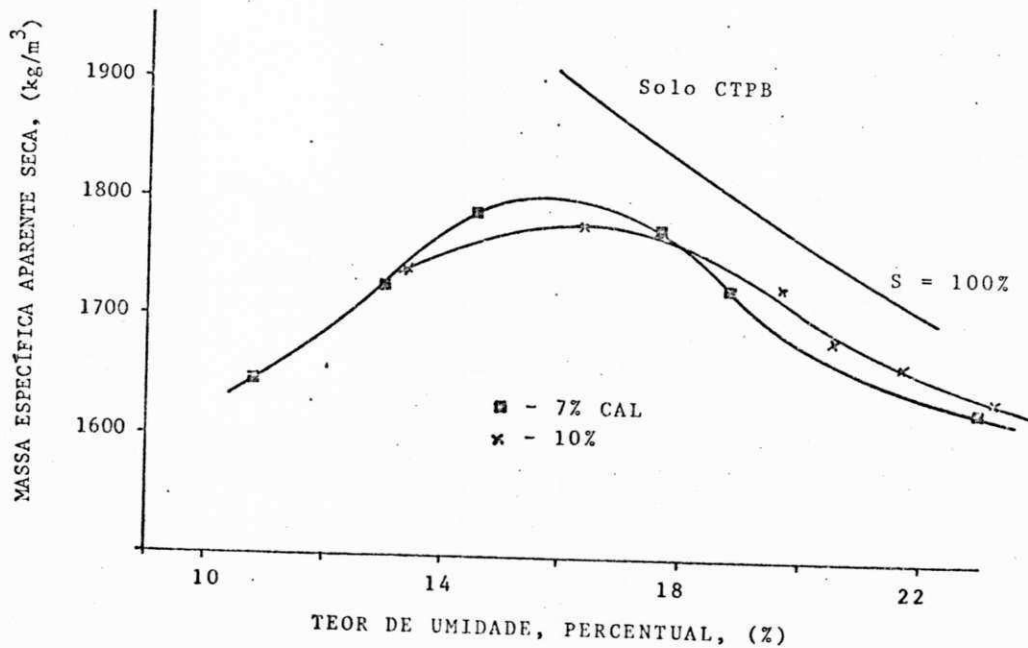
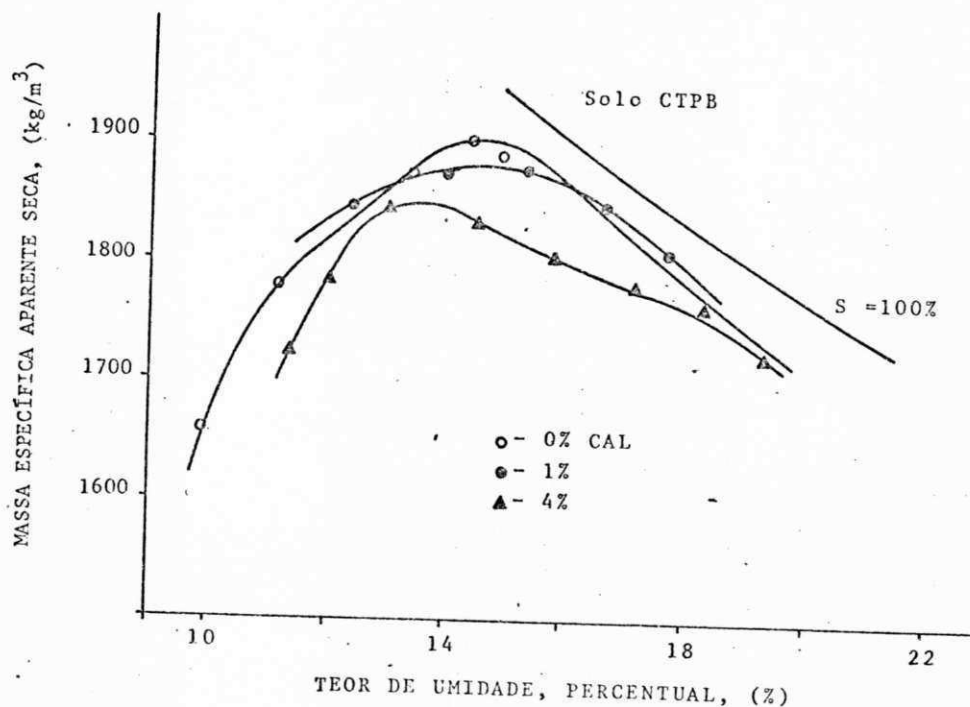


Figura 6.18.1-B - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

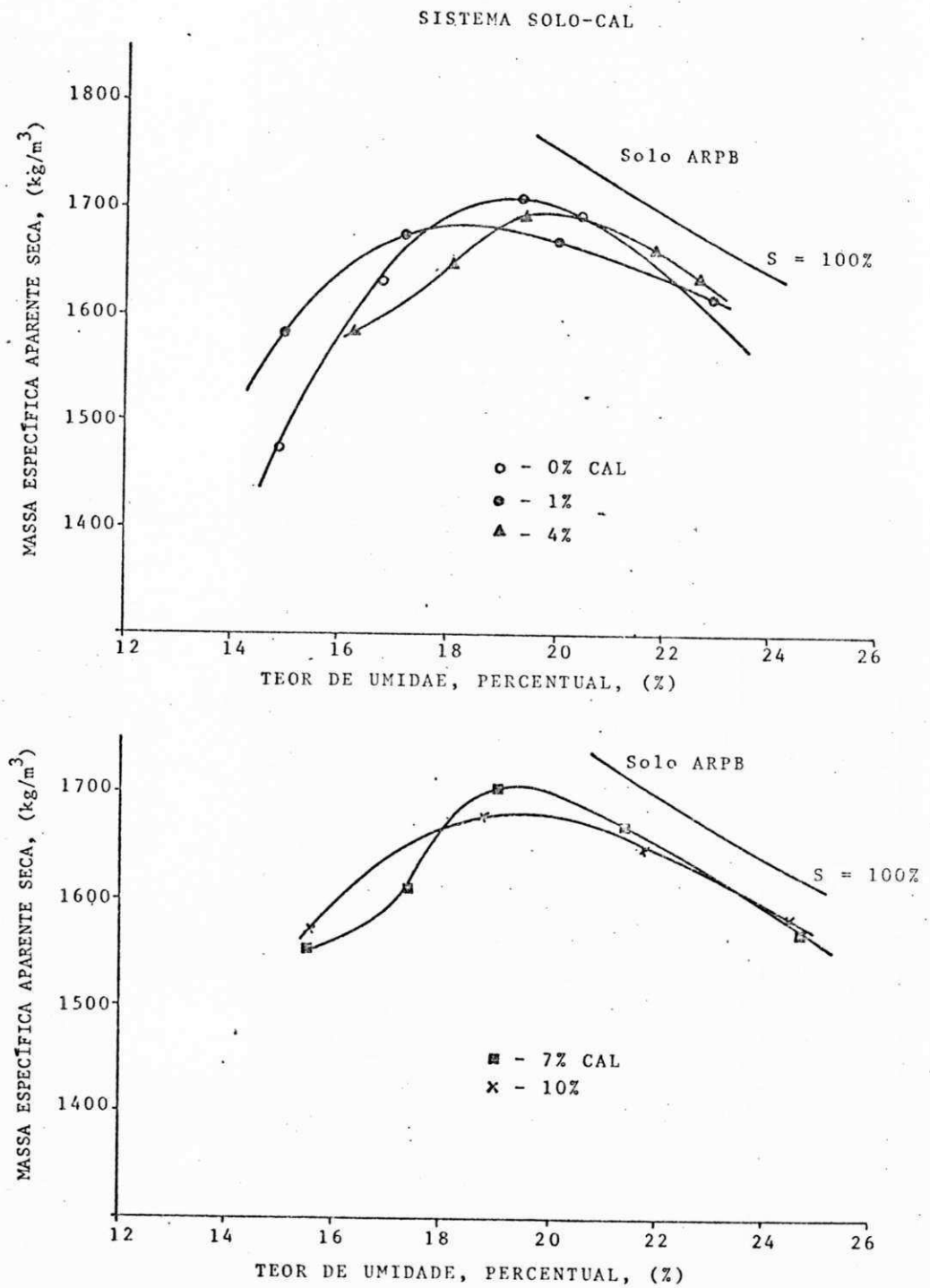


Figura 6.18.1-C - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

fico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores obtidos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.19.1. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 1,5% (de 1710 kg/m^3 para 1685 kg/m^3) de 2,7% (de 18,8 para 18,3%) para o teor de umidade ótima; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 0,1% (de 1710 kg/m^3 para 1695 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 6,4% (de 18,8% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 0,1% (de 1710 kg/m^3 para 1709 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 2,6% (de 18,8% para 19,3%) no teor de umidade ótima; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 1,8% (de 1710 kg/m^3 para 1680 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 3,7% (de 18,8% para 19,5%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que com excessão do teor de umidade ótima para a adição 4% de cal, as variações produzidas pela adição de cal estão na faixa de repetibilidade do ensaio, o que indica que não ocorreram modificações na relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade.

Solo de CAPI - Na Figura 6.18.1-D observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores obtidos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.19.1. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 3,1% (de 2085 kg/m^3 para 2020 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 15,0% (de 10,0% para 11,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 4,1% (de

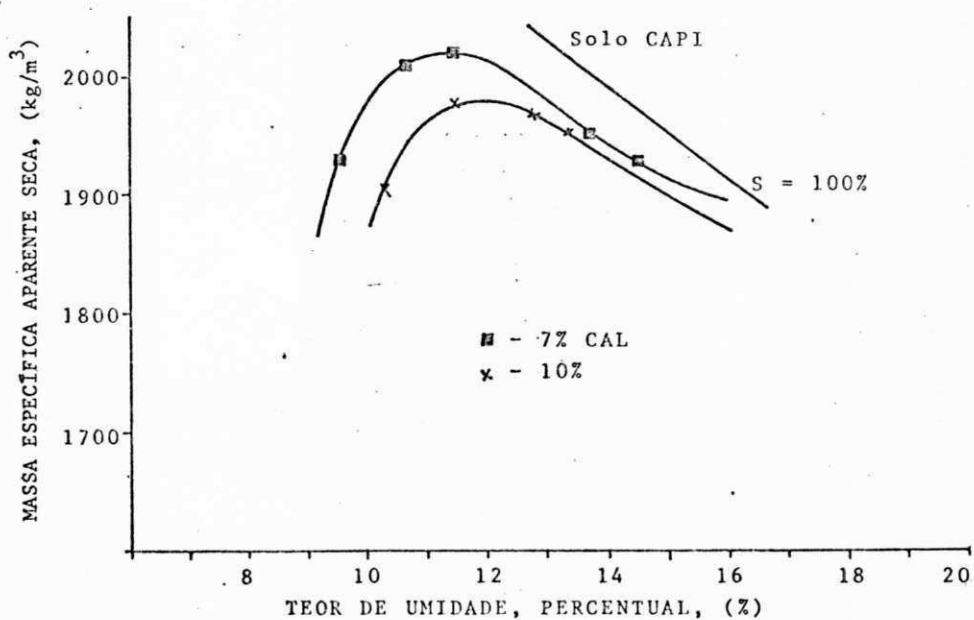
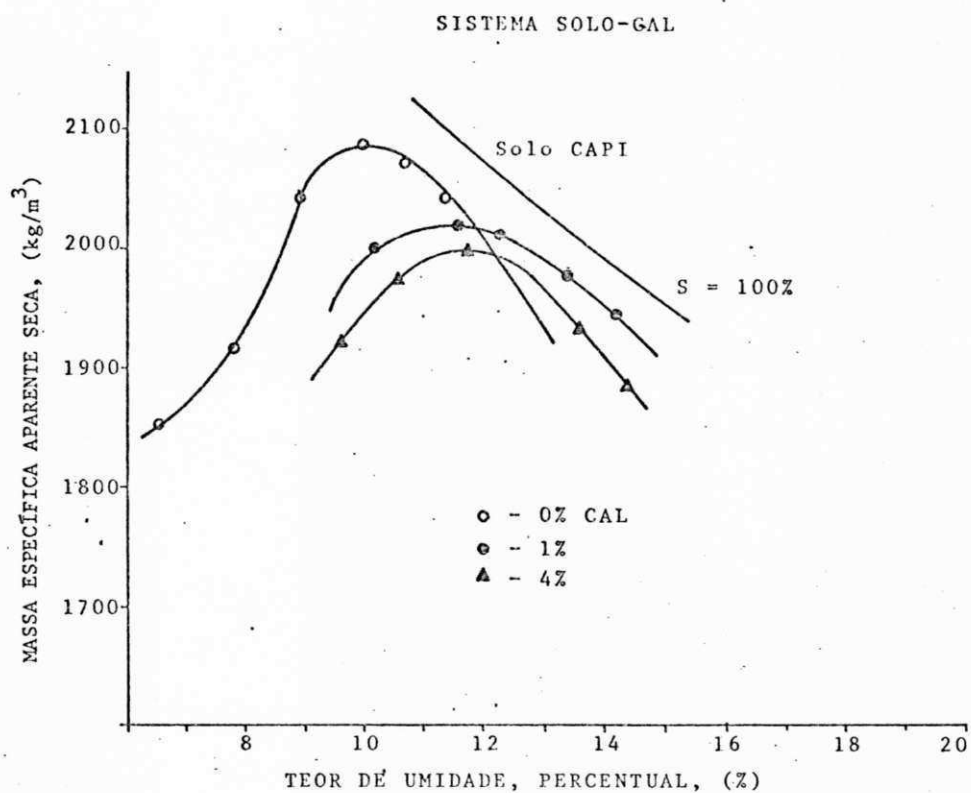


Figura 6.18.1-D - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

2085 kg/m³ para 2000 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 17,0% (de 10,0% para 11,7%) no teor de umidade ótima; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 3,1% (2085 kg/m³ para 2020 kg/m³) e de 1,5% (de 10,0% para 11,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 5,3% (de 2085 kg/m³ para 1975 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 18,0% (de 10,0% para 11,8%) no teor de umidade ótima. Assim sendo, pode-se inferir que com a excessão da adição de 10% de cal, todas as demais variações, na máxima massa específica aparente seca estão na faixa de repetibilidade do ensaio, enquanto que o teor de umidade ótima foi elevado. O que indica que a modificação na relação entre a máxima massa específica aparente seca e o teor de umidade ótima foi originada pela elevação desta última.

Solo MOPA - Na Figura 6.18.1-E observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores obtidos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.19.1. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-cal em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1% de cal ocorreu uma variação de 0,2% (de 1617 kg/m³ para 1620 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 1,3% (de 22,9% para 23,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 4% de cal ocorreu uma variação de 0,4% (de 1617 kg/m³ para 1610 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 1,7% (de 22,9% para 22,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 7% de cal ocorreu uma variação de 0,4% (de 1617 kg/m³ para 1610 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 7,0% (de 22,9% para 24,5) no teor de umidade ótima; para a adição de 10% de cal ocorreu uma variação de 0,4% (de 1617 kg/m³ para 1610 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 2,6% (de 22,9% para 23,5%) no

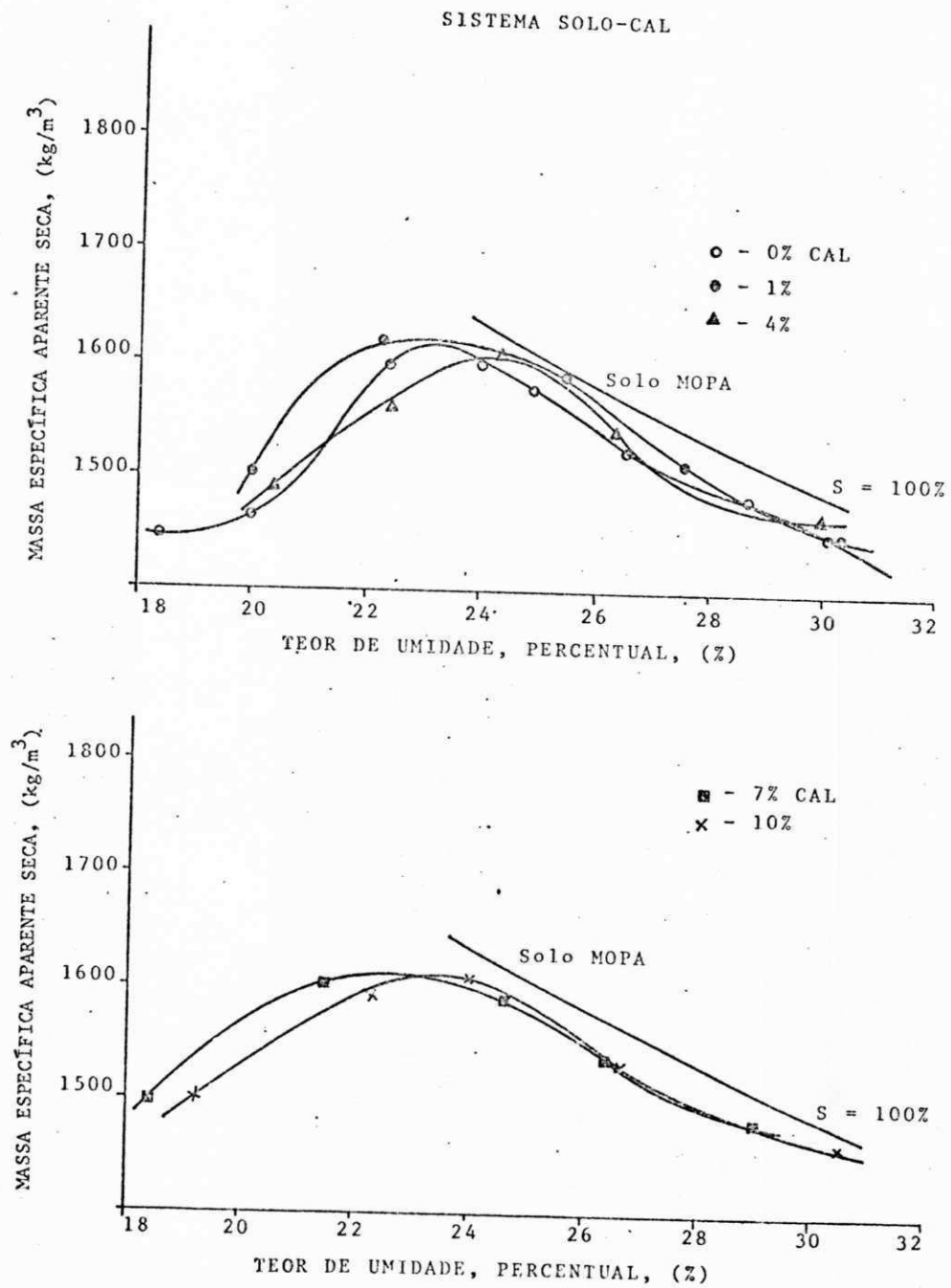


Figura 6.18.1-E - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir: que com excessão do teor de umidade ótima, que para a adição de 7%, foi elevado todas as demais variações estão na faixa de repetibilidade do ensaio. O que índica que não ocorreram modi ficações significativas na relação entre a máxima massa es pecífica aparente seca e o teor de umidade ótima no solo-cal em relação ao solo natural.

A gama de valores para o solo natural, sem aditi vo, está compreendida entre 1617 kg/m^3 (MOPA) a 2085 kg/m^3 (CAPI) para a máxima massa específica aparente seca e entre 10,0% (CAPI) e 22,9% (MOPA) para a umidade ótima.

Para os solos após tratamento com 1%; 4%; 7% e 10% de cal ocorreu em alguns solos uma tendência de redução na máxima massa específica aparente seca e uma tendência a au mento na umidade ótima, excetuando-se as umidades para os so los ARPB (1% de cal) e CTPB (4% de cal) e a massa específica aparente seca para o solo MOPA (1% de cal) que tiveram um comportamento anômalo. Comportamento semelhante foi verifica do por diversos pesquisadores. Entre outros podemos citar Ferro (1976), Queiroz de Carvalho (1979), utilizando solos do mesmo tipo que os desta pesquisa. Bem como por Cartmell e Berg (1969) e Ola (1975 e 1977) que pesquisaram solos late ríticos de outros países. A redução da massa específica apa rente seca e elevação do teor ótimo de umidade, após a adi ção de cal nos solos se prende a vários fatores que até o momento não estão completamente explicados. Para Hayter e Cairns (1966) se deve ao efeito combinado da alteração granu lométrica e ao efeito da massa específica real da cal, que no presente estudo tem um valor de $2,33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, bem como a do solo, onde varia de $2,58$ a $3,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Outros pes quisadores ampliam o conceito de alteração granulométrica e referem-se a agregação/floculação das partículas causadas pe la cal, aumentando o índice de vazios e conseqüentemente re duzindo a massa específica aparente seca, como também elevan

do a umidade ótima. Concordam também com a influência da baixa massa específica real da cal. As assertivas acima justificam em parte as modificações na massa específica aparente seca, não esclarecendo completamente o aumento da umidade ótima, todavia admite-se que o aumento da granulometria, pela floculação eleve o índice de vazios ocasionando uma possível maior retenção de água, que aumentaria a umidade ótima. Queiroz de Carvalho (1979) e Lambe (1968) definem o aumento no grau de floculação como decorrente da elevação da concentração eletrolítica e consequente redução do potencial elétrico (Ψ) do sistema solo-água, pela adição da cal. Fatos como esses podem justificar o comportamento tanto para massa específica aparente seca, sua redução pela floculação e aumento da umidade ótima pela apreensão de água pelo sistema floculado e desequilibrado eletricamente (teoria da dupla camada difusa). Cabrera e O'Flaherty (1975) objetivando circunscrever o mecanismo de floculação sugerem que com a adição de cal ao sistema solo-cal-água, ocorre a adsorção de íons cálcio na superfície das partículas de argila, possibilitando sua floculação. Os flocos formados contêm microporos que retêm a água, que de outro modo estaria disponível para lubrificação durante o processo de compactação e que aumentam o teor ótimo de umidade. A redução da máxima massa específica aparente seca, é devido ao sistema poroso originado pela floculação.

Souza Santos (1975 e 1980) estudando o efeito do cálcio como cátion trocável em argilas cauliníticas, refere-se a dois pontos. O efeito inicial deste cátion incide sobre a película de água adsorvida, na superfície dos argilos minerais, que se torna muito mais rígida, isto é, com elevado grau de orientação ou cristalinidade, assim sendo, a água sofre uma força de ligação apreciável. Esta película de água rígida, por reduzir a água livre do sistema, aumentando a quantidade de água total necessária para se ter água líquida agindo como lubrificante. É provável que este mecanismo

também ocorra quando da adição de cal a solos lateríticos, cujo argilo-mineral predominante é caulinita, sendo também responsável pela elevação do teor de umidade ótima^(*). Como pode ser verificado na Tabela 6.18.1, a umidade ótima do sistema solo-cal em relação a umidade ótima do solo natural foi em geral, aumentada nas seguintes proporções máximas: para o solo TEPB em 5,5%; para o solo de CTPB em 12,4%; para o solo ARPB 6,3%; para o solo de MOPA em 6,9%. Um outro efeito do cálcio como cátion trocável é decorrente da sua carga elétrica que o torna mais fortemente adsorvido (série liotrópica ou de Hofmeister, citada por Saw (1979)), tendendo inclusive a manter as várias camadas cristalinas unidas (efeito oposto ao da clivagem). Ocasionalmente, portanto, modificações no potencial zeta crítico, que torna as partículas instáveis e floculando o sistema. Dessa forma o sistema floculado e provavelmente melhor agregado, passa a exibir menores valores para massa específica aparente seca do (sistema) solo-cal se comparada à do solo natural.

Como pode ser verificado na Tabela 6.19.1 a máxima massa específica aparente seca do solo tratado com cal, tendeu de uma maneira geral a ser reduzida em relação à do solo natural nas seguintes proporções: para o solo de TEPB em 6,0%; para o solo de CTPB em 6,3%; para o solo ARPB em 1,8%; para o solo CAPI em 5,3% e para o solo MOPA em 0,4%^(**).

A Figura 6.18.1-F apresenta a evolução das máximas massa específica aparente seca e teor de umidade ótima com o incremento de cal. Pode-se observar que os solos menos argilo

(*) os dados obtidos nem sempre se comportam de acordo com estes modelos

(**) as modificações nos solos de ARPB e MOPA estão na faixa de repetibilidade do ensaio não dando suporte aos modelos anteriormente descritos.

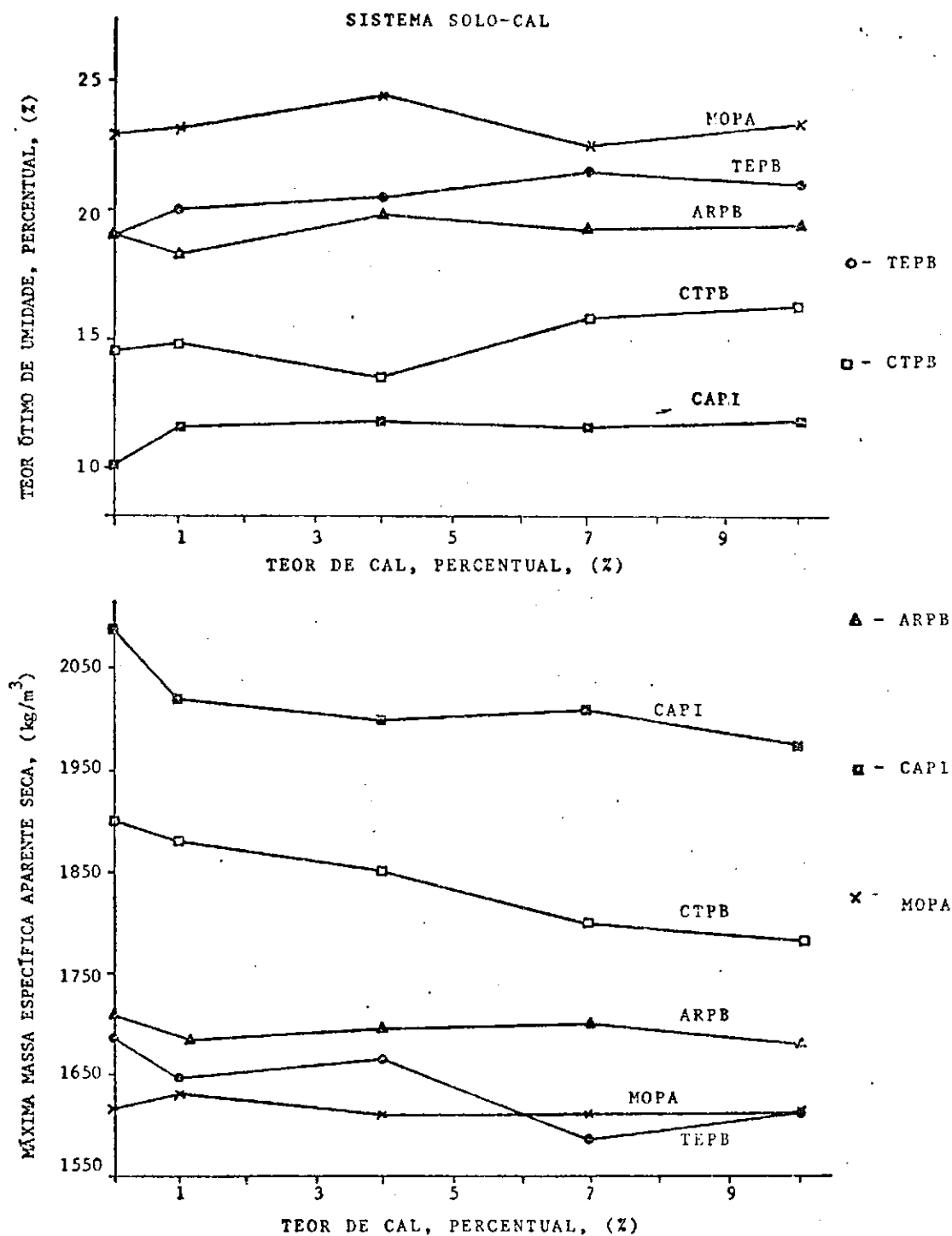


Figura 6.18.1-F - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor Ótimo de Umidade o Incremento de Cal

os exibem valores mais altos de massa específica aparente seca e em geral valores mais baixos de teor de umidades ótimas.

6.18.2 - Solo Tratado com NaOH

O resultado da máxima massa específica aparente seca e correspondente teor de umidade ótima, para os solos tratados com 0,3%; 0,5%; 1,2%; 2,4% e 3,0% de NaOH (em relação ao peso do solo seco), encontra-se na Tabela 6.19.2 e Figuras 6.18.2-A a 6.18.2-F.

Solo de TEPB - Na Figura 6.18.2-A observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.2. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 0,1% (de 1687 kg/m^3 para 1685 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 3,2% (de 19,0% para 19,6%) no teor de umidade ótima; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 1,6% (de 1687 kg/m^3 para 1660 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 11,6% (de 19,0% para 21,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 1,2% de NaOH não ocorreu variação na máxima massa específica aparente seca, ocorrendo uma variação no teor de umidade ótima de 2,6% (de 19,0% para 18,5%); para adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 0,4% (de 1687 kg/m^3 para 1680 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 5,2% (de 19,0% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 10,3% (de 1887 kg/m^3 para 1860 kg/m^3) e de 10,5% (19,0% para 21,0%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que excessão da adição de 3,0% de NaOH não ocorrem modificações na máxima massa específica aparente

SISTEMA SOLO-NaOH

	TEPB	CTPB	ARPB	CAPI	MOPA
0,0% NaOH					
γs	1687	1900	1710	2085	1617
hot	19,0	14,5	18,8	10,0	22,9
RCS	NRI	NRI	NRI	NRI	NRI
RCS (*)	(243)	(177)	(239)	(154)	(317)
0,3% NaOH					
γs	1685	1885	1815	2155	1700
hot	19,6	13,0	16,7	15,0	20,0
RCS	NRI	NRI	NRI	NRI	NRI
hntr	-	-	-	-	-
0,5% NaOH					
γs	1665	1985	1795	2110	1700
hot	21,2	22,8	15,7	9,2	20,0
RCS	158	NRI	NRI	NRI	93
hntr	20,7	-	-	-	19,1
1,2% NaOH					
γs	1687	1915	1760	2080	1690
hot	2,6	13,3	18,2	10,0	16,1
RCS	200	70	159	75	169
hntr	21,7	11,7	15,8	11,0	18,6
2,4% NaOH					
γs	1680	1875	1725	2045	1670
hot	20,0	14,7	20,0	10,8	20,2
RCS	213	160	267	278	187
hntr	20,3	14,6	18,0	10,0	17,8
3,0% NaOH					
γs	1660	1855	1755	2060	1660
hot	21,0	15,5	18,2	10,5	21,0
RCS	230	100	184	280	126
hntr	19,7	15,8	18,3	9,2	20,0

γs = máxima massa específica aparente seca, (kg/m³)

RCS = máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, (kPa)

hot = teor de umidade ótima, (%)

hntr = teor de umidade para máxima tensão de ruptura, (%)

NRI = não resistiu a imersão

(*) = sem imersão

Tabela 6.18.2 - Máxima Massa Específica Aparente Seca (kg/m³), Teor de Umidade ótima (%), Máxima Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada (kPa) e Respectivo Teor de Umidade de Moldagem (%).

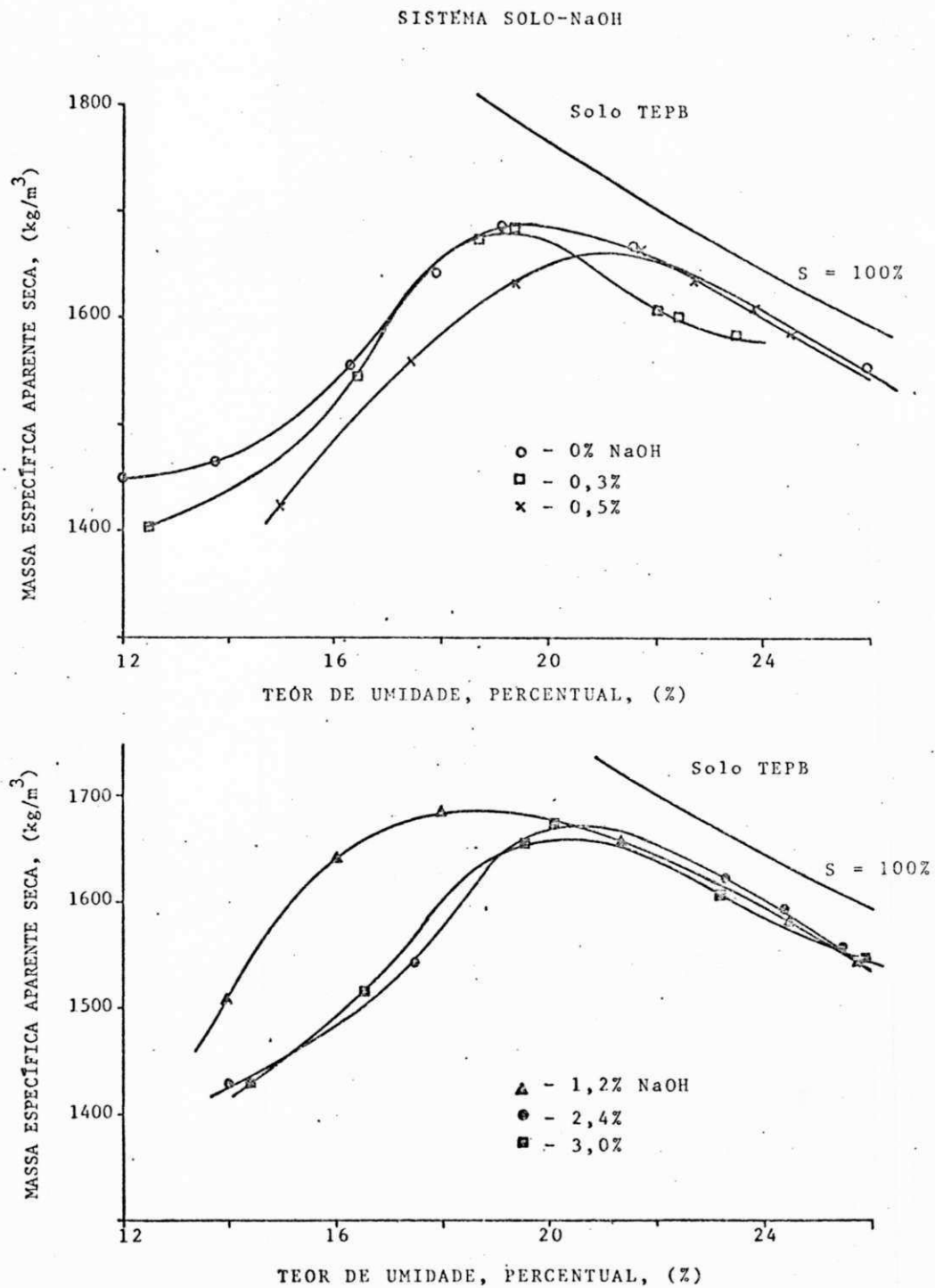


Figura 6.18.2-A - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

seca enquanto a adição de 0,5%, 2,4% e 3,0% elevou o teor de umidade ótima, comportamentos estes contrários aos modelos teóricos.

Soló de CTPB - Na Figura 6.18.2-B, observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.2. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3 % de NaOH ocorreu uma variação de 0,7% (de 1900 kg/m^3 para 1885 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 10,3% (de 14,5% para 13,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 4,5% (de 1900 kg/m^3 para 1985 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 22,8% (de 14,5% para 11,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 0,8% (de 1900 kg/m^3 para 1915 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 8,3% (14,5% para 13,3%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 1,3% (de 1900 kg/m^3 para 1875 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 1,3% (de 14,5% para 14,7%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 2,4% (de 1900 kg/m^3 para 1855 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 6,9% (de 14,5% para 15,5%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que não ocorreram modificações significativas na máxima massa específica aparente seca, enquanto o teor de umidade ótima foi modificado em várias intensidades este comportamento é mostrado em forma gráfica na Figura 6.18.2-F e pode ser assemelhado a uma curva de defloculação típica. Não obstante nem sempre os dados dêem suporte a este modelo.

Solo de ARPB - Na Figura 6.18.2-C, observa-se em forma gráfica o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.2. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 6,1% (de 1710 kg/m³ para 1815 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 11,2% (18,8% para 16,7%) no teor de umidade ótima; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 5,0% (de 1710 kg/m³ para 1795 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 6,4% (de 18,8% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 1,2% de NaOH, ocorreu uma variação de 2,9% (de 1710 kg/m³ para 1760 kg/m³) na máxima massa específica e de 3,2% (de 18,8% para 18,2%) no teor de umidade ótima; para adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 0,9% (de 1710 kg/m³ para 1725 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 6,4% (de 18,8% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 2,6% (de 1710 kg/m³ para 1755 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 3,2% (de 18,8% para 18,2%). Assim sendo pode-se inferir que somente a adição de 0,3% e 0,5% modificaram significativamente a máxima massa específica aparente seca enquanto para o teor de umidade ótima somente os teores de 0,3% e 0,5% modificaram significativamente este parâmetro. Este comportamento mostrado em forma gráfica na Figura 6.18.2-F tende a assimilar-se a: máxima massa específica aparente seca a uma curva simétrica a de uma curva de defloculação; o teor de umidade ótima a uma curva de defloculação. Não obstante nem sempre os dados dêem suporte a este modelo.

Solo de CAPI - Na Figura 6.18.2-D observa-se em forma gráfica o comportamento da massa específica aparente seca com o

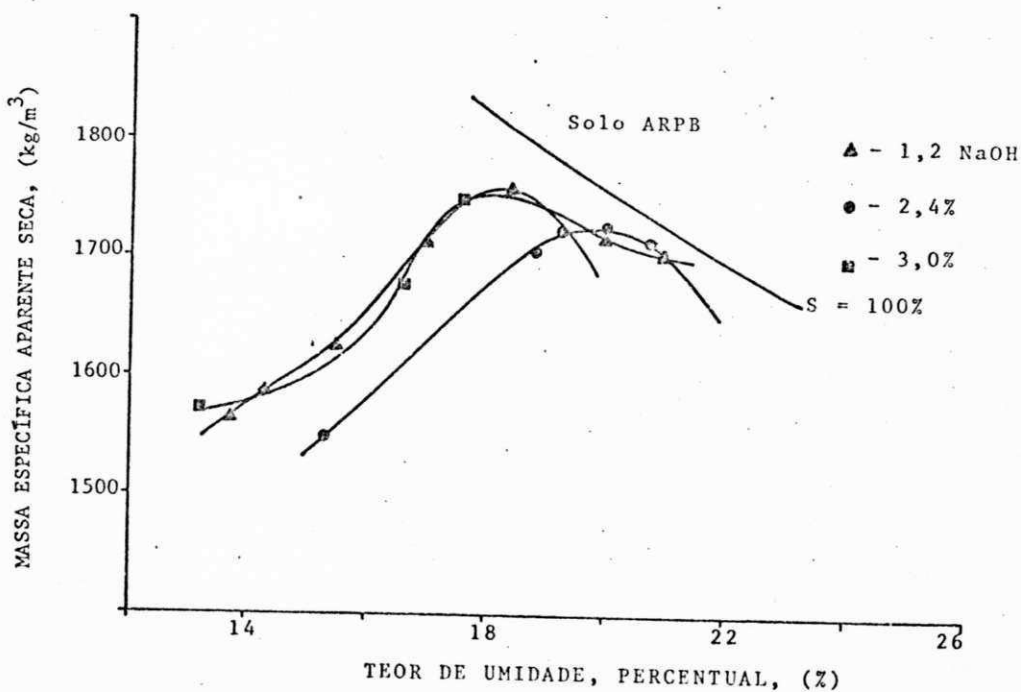
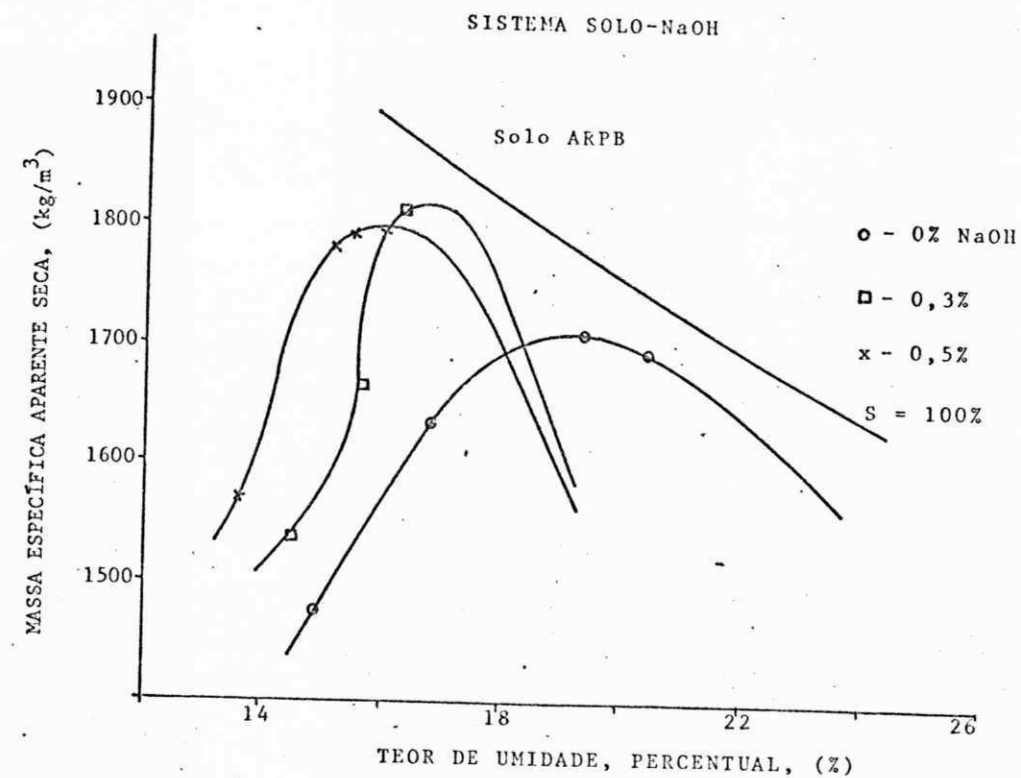


Figura 6.18.2-C - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.2. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 3,4% (de 2085 kg/m³ para 2155 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 15,0% (de 10,0% para 8,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 1,2% (de 2085 kg/m³ para kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 8,0% (de 10,0% para 9,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 0,2% (de 2085 kg/m³ para 2080 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca, não ocorrendo variação no teor de umidade ótima; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 1,9% (de 2085 kg/m³ para 2045 kg/m³) e de 8,0% (de 10,0% para 10,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaOH, ocorreu uma variação de 1,2% (de 2085 kg/m³ para 2060 kg/m³) e de 8,0% (de 10,0% para 10,8%). Assim sendo pode-se inferir que a máxima massa específica aparente seca não foi modificada significativamente com adição nenhum teor de NaOH, enquanto que o teor de umidade ótima foi modificado para a adição de 0,3%, 0,5%, 2,4% e 3,0% de NaOH. A Figura 6.18.2-F mostra em forma de gráfico o comportamento destes parâmetros com o incremento de NaOH e pode ser verificado que o do teor de umidade ótima assemelha-se ao de uma curva de defloculação típica, não obstante nem todos os dados dêem suporte a este modelo.

Solo de MOPA - Na Figura 6.18.2-E observa-se em forma gráfica o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.2. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaOH em rela

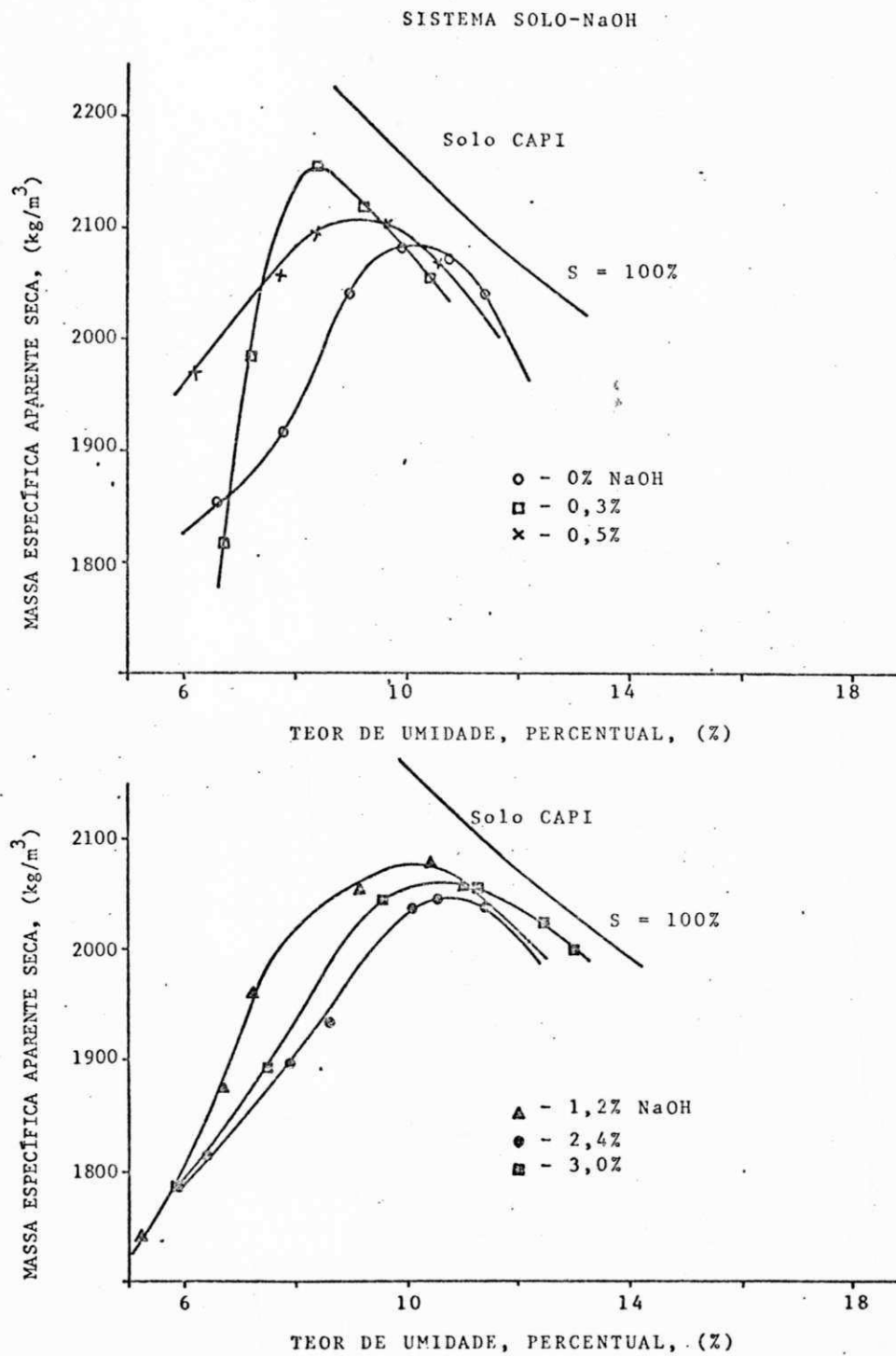


Figura 6.18.2-D - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

SISTEMA SOLO-NaOH

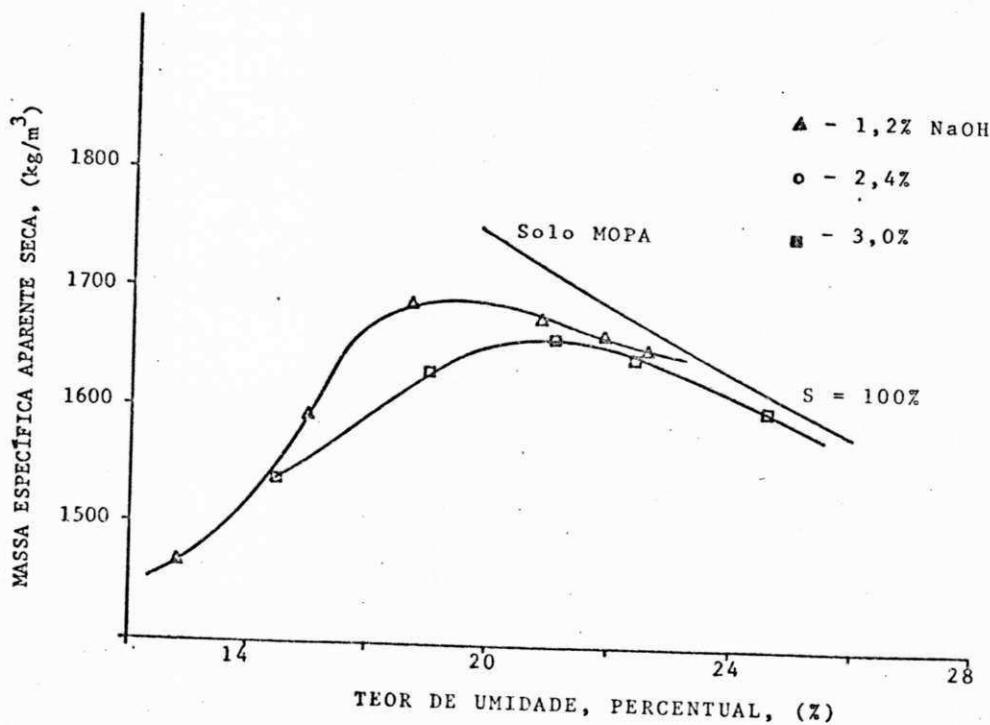
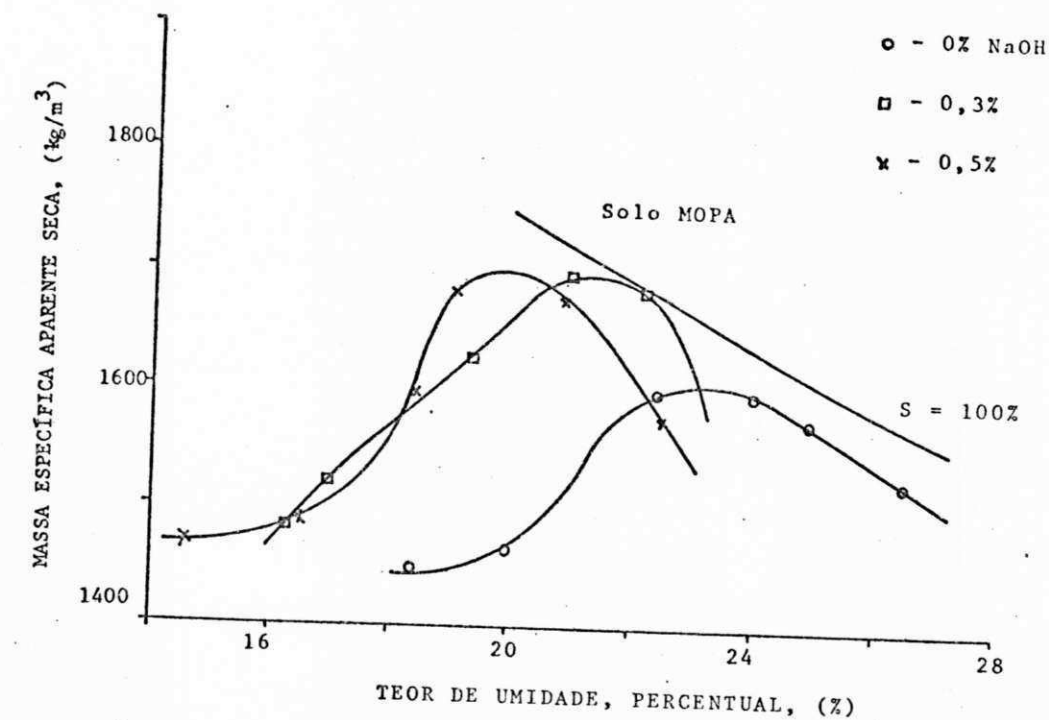


Figura 6.18.2-E - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

ção ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 0,3% de NaOH ocorreu uma variação de 5,1% (de 1617 kg/m³ para 1700 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 12,7% (de 22,9% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 0,5% de NaOH ocorreu uma variação de 5,1% (de 1617 kg/m³ para 1700 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 12,7% (de 22,9% para 20,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 1,2% de NaOH ocorreu uma variação de 4,5% (de 1617 kg/m³ para 1690 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 16,2% (de 22,9% para 19,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,4% de NaOH ocorreu uma variação de 3,3% (de 1617 kg/m³ para 1670 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 11,7% (de 22,9% para 20,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaOH ocorreu uma variação de 2,7% (de 1617 kg/m³ para 1660 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 8,3% (de 22,9% para 21,0%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que a adição de 0,3%, 0,5% e 1,2% de NaOH modificaram a máxima massa específica do solo natural, enquanto a adição de 0,3%, 0,5%, 1,2%, 2,4% e 3,0% modificaram o teor ótimo de umidade ótima em diferentes intensidades este comportamento é mostrado em forma gráfica na Figura 6.18.2-F e pode ser assemelhado a uma curva de defloculação típica.

Os valores situaram-se entre 1660 kg/m³ (para os solos de MOPA) a 2155 kg/m³ (para os solos de CAPI) e 8,5% (para os solos de CAPI) a 21,0% (para os solos de MOPA) respectivamente para a máxima massa específica aparente seca e teor ótimo de umidade. Para os solos estudados o comportamento foi bastante semelhante caracterizado por uma tendência a elevação inicial na máxima massa específica aparente seca, com os primeiros incrementos de aditivos, (0,3% e 0,5%), quando então inicia-se uma gradual redução. Já o comportamento da umidade ótima foi o oposto da massa específica aparente

seca com uma inicial tendência a redução e posterior ascensão. Nas Figuras 6.18.2-A a 6.18.2-F pode-se verificar este comportamento. O solo de TEPB não manteve o comportamento a cima descrito na mesma intensidade quanto os demais solos. O padrão para comparação foram os valores de massa específica aparente e umidade ótima do solo natural.

Como pode ser verificado na Tabela 6.18.2 a máxima massa específica aparente seca dos solos tratados com NaOH, apresentou inicial tendência a elevação se comparada a do solo natural, exibindo aumentos na seguinte proporção: para o solo de CTPB em 4,5%; para o solo ARPB em 6,1%; para o solo de CAPI em 3,4% e para o solo de MOPA em 5,1%. No solo de TEPB não ocorreu elevação destes parâmetros, bem como as elevações nos solos de CTPB e CAPI estão na faixa de repetibilidade do ensaio, conforme o anteriormente referido no item 5.8. Após esta elevação ocorreu uma redução na seguinte proporção em relação aos valores máximos de elevação: para o solo de TEPB em 1,6%; para o solo de CTPB em 6,5%; para o solo de ARPB em 5,0%; para o solo de CAPI em 5,1% e para o solo de MOPA em 2,4%. Nos solos de TEPB e MOPA não ocorreram praticamente redução pois os valores estão na faixa de repetibilidade do ensaio. A Figura 6.19.2-F mostra estes valores na forma de gráficos, podendo-se observar que as elevações na massa específica aparente seca ocorre em geral para pequenos incrementos, na ordem da capacidade de troca de cátions do respectivo solo. Comparando-se os teores nos quais ocorreram as principais modificações na massa específica aparente seca, com as Figuras 6.17.1-A a 6.17.1-E, verifica-se que estes são os mesmos onde ocorreram também as principais modificações nos limites de plasticidade dos solos tratados com NaOH. Inclusive o solo de TEPB que apresentou um comportamento contrário aos demais, o fez naquele teor de aditivo.

Dos resultados para o teor de umidade ótima mostradas na Tabela 6.18.2 para os solos tratados com NaOH, verifica-se que estes valores inicialmente reduzidos na seguinte

proporção: para o solo de TEPB em 2,6%; para o solo de TEPB em 2,6%; para o solo de CTPB em 22,8%; para o solo ARPB em 15,7%; para o solo CAPI em 15,0% e para o solo de MOPA em 16,1%. No solo TEPB a redução no teor de umidade ótima está na faixa de repetibilidade, tendo ocorrido ao contrário dos demais solos uma elevação de 11,5%. Após esta redução houve uma gradual elevação no teor de umidade ótima, em relação a máxima redução, na seguinte proporção: para o solo TEPB em 13,5%; para o solo CTPB em 38,4%; para o solo de ARPB em 25,0%; para o solo CAPI em 23,5% e para o solo de MOPA em 9,4%. A Figura 6.18.2-F mostra em forma gráfica a elevação do teor de umidade ótima com o incremento de NaOH, podendo-se observar que as máximas reduções ocorreram para pequenos teores de aditivo, da ordem de capacidade de troca de cá tions dos solos. Comparando-se os teores de NaOH nos quais se verificaram as principais modificações no teor de umidade ótima com as Figuras 6.18.1-A a 6.18.1-E, infere-se que es tes são os mesmos onde ocorreram também as máximas reduções nos limites de plasticidade dos solos tratados com NaOH. Po de-se também observar que o comportamento da evolução do te or de umidade ótima com o incremento de NaOH é semelhante ao de uma curva de defloculação típica, como também o da massa específica aparente seca que tende a ser simétrico ao de uma curva de defloculação.

O comportamento exibido pelos solos tratados com NaOH, não está ainda completamente determinado, no entanto por similitude com o mecanismo que ocorre com a defloculação de argilas cauliníticas é possível uma explicação fenomenoló gica para o comportamento do teor de umidade ótima e conse quentemente para a massa específica aparente seca. Conforme Souza Santos (1975), a mistura solo-água possui agregados ou aglomerados de partículas (stocks) de vários tipos, que dão origem a um sistema provavelmente flocculado, muito viscoso. Adicionando-se um agente defloculante como NaOH, por exem plo, há adsorção nas faces menores, estabelecendo se prova

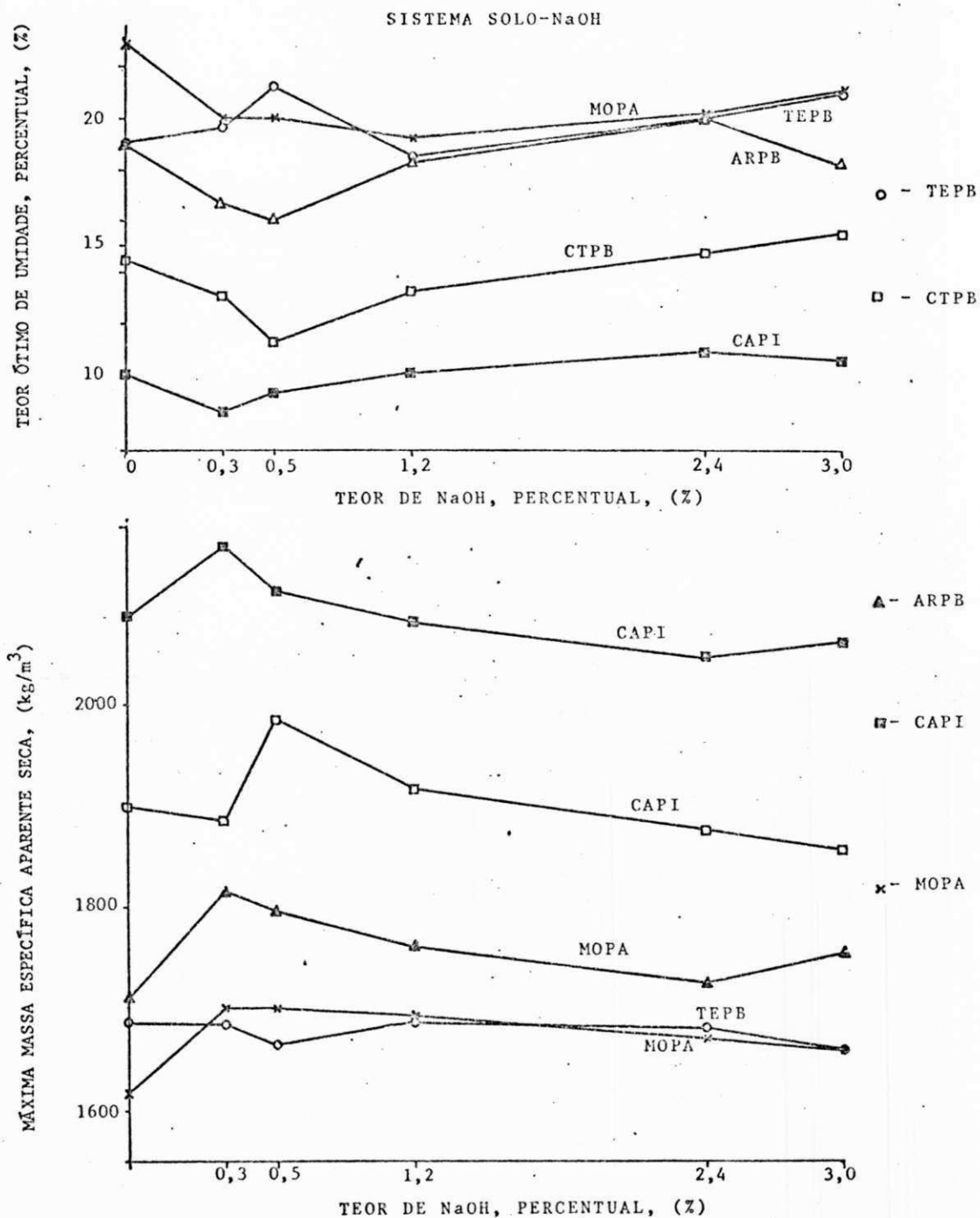


Figura 6.18.2-F - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor Ótimo de Umidade com o In-
 cremento de NaOH

velmente um potencial zeta acima do crítico, ocorrendo a destruição das interações face-lado e lado-lado, repulsão entre as partículas e possível destruição dos aglomerados parcial ou totalmente. Se a ação do defloculante for tão intensa que possa formar uma microestrutura típica de um sistema disperso defloculado atingir-se-ã valores mínimos (minimorum) de viscosidade e também de umidade ótima, por estar grande parte da água do sistema disponível para lubrificação em virtude da pequena orientação da água adsorvida, que é frouxa pela ação do cátion sódio. Neste ponto é possível também, uma maior densificação do sistema em decorrência de: sua menor viscosidade e atração entre partículas; maior movimento relativo entre partículas pela menor lubrificação; minimização ou ausência de aglomerados e flocos, pois o sistema está provavelmente defloculado e/ou disperso. Nos solos estudados este ponto foi provavelmente atingido para o aditivo NaOH com: 0,5% para o solo de TEPB (que não exibiu um comportamento rigorosamente de acordo com este modelo); 0,5% para o solo de CTPB; 0,3% para o solo de ARPB; 0,3 para o solo de CAPI e 0,3% para o solo de MOPA. Prosseguindo-se a inserção de mais eletrólitos no sistema, (através de incremento de aditivo) atinge-se provavelmente o potencial zeta crítico, ficando o sistema, novamente, instável, havendo provável aglomeração das partículas, (o sistema ainda é defloculado, porém vai sendo provavelmente reduzida a dispersão pela crescente agregação) com conseqüente aumento gradual da viscosidade e do teor de umidade ótima, como também redução da máxima massa específica aparente seca.

6.18.3 - Solo Tratado com NaCl

Os resultados da máxima massa específica aparente seca e correspondente teor de umidade ótima para os solos tratados com 1,2%; 2,0% e 3,0% de NaCl em relação ao peso do solo seco, encontram-se na Tabela 6.18.3 e Figuras 6.18.3-A

SISTEMA SOLO-NaCl

	TEPB	CTPB	ARPB	CAPI	MOPA
0,0% NaCl					
γs	1687	1900	1710	2085	1617
hot	19,0	14,5	18,8	10,0	22,9
RCS	NRI	NRI	NRI	NRI	NRI
RCS(*)	(243)	(177)	(239)	(154)	(317)
1,2% NaCl					
γs	1685	2005	2065	2095	1672
hot	19,0	12,4	11,5	10,5	21,8
RCS	NRI	28	NRI	NRI	NRI
hntr	-	16,1	-	-	-
2,0% NaCl					
γs	1680	1900	2030	2040	1658
hot	19,8	14,5	11,8	12,0	20,6
RCS	NRI	54	NRI	NRI	NRI
hntr	-	13,5	-	-	-
3,0% NaCl					
γs	1700	2000	2062	2109	1690
hot	20,2	13,7	11,0	10,5	20,8
RCS	NRI	62	NRI	NRI	NRI
hntr	-	11,2	-	-	-

- γs = máxima massa específica aparente seca, (kg/m³)
- RCS = máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, (kPa)
- hot = teor de umidade ótima, (%)
- hntr = teor de umidade para máxima tensão de ruptura, (%)
- NRI = não resistiu a imersão
- (*) = sem imersão

Tabela 6.18.3 - Máxima Massa Específica Aparente Seca (kg/m³), Teor Ótimo de Umidade (%), Máxima Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada (kPa) e Respectivo Teor de Umidade de Moldagem (%).

a 6.18.3-F.

Solo de TEPB - Na Figura 6.18.3-a, observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.3. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 0,1% (de 1687 kg/m³ para 1685 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 1,0% (de 19,0% para 19,2%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 0,1% (de 1687 kg/m³ para 1680 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 4,2% (de 19,0% para 19,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 5,1% (de 1687 kg/m³ para 1700 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 6,3% (de 19,0 para 20,2%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que somente a adição de 3,0% de NaCl modificou a máxima massa específica aparente seca e teor de umidade ótima que foram elevados.

Solo de CTPB - Na Figura 6.18.3-B observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.3. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 5,5% (de 1900 kg/m³ para 2005 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 14,5% (de 14,5% para 12,4%) no teor de umidade ótima; para a adição de 20% de NaCl não ocorreram variações na máxima massa específica aparente seca e no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 5,3% (de

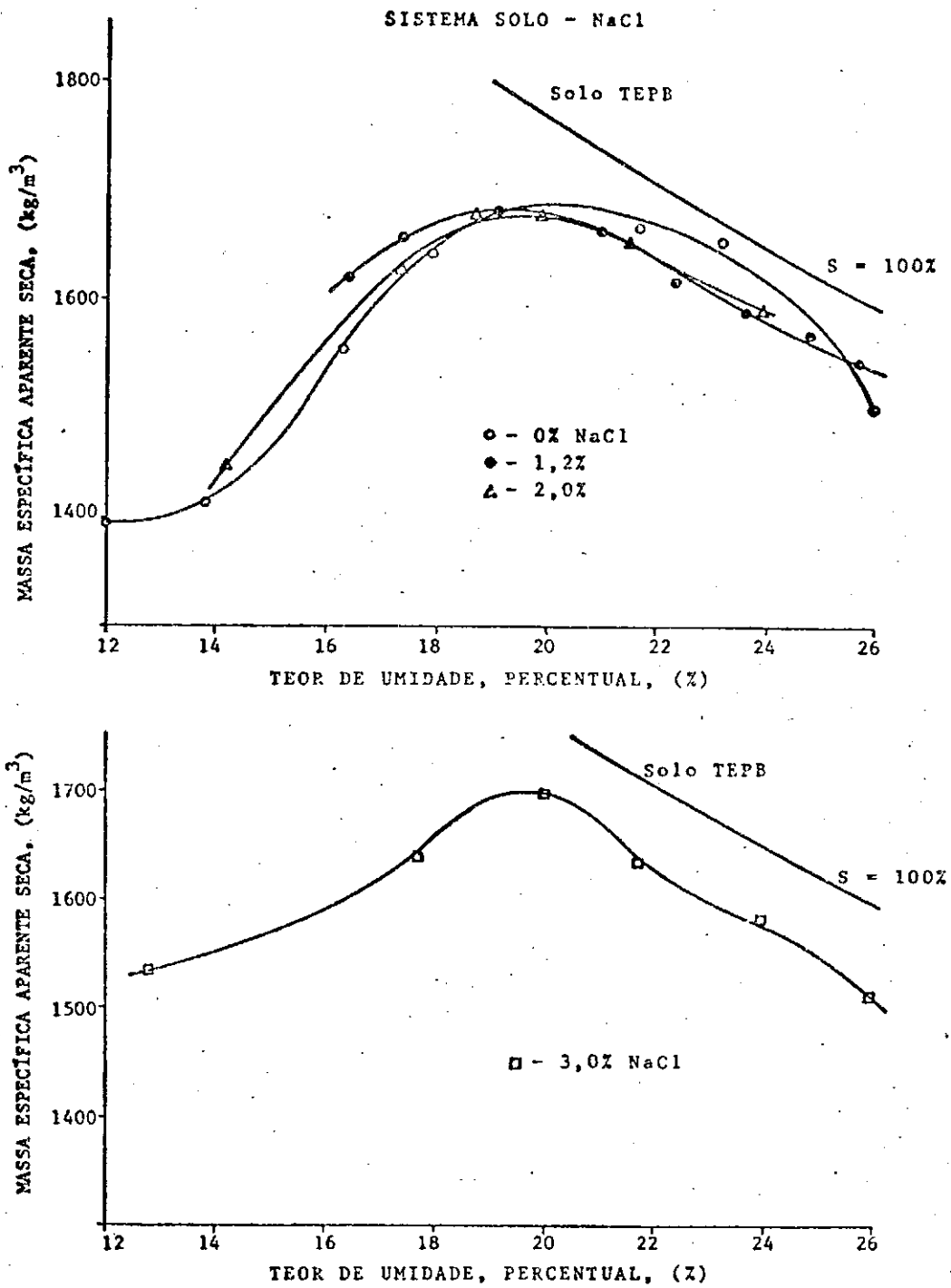


Figura 6.18.3-A - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

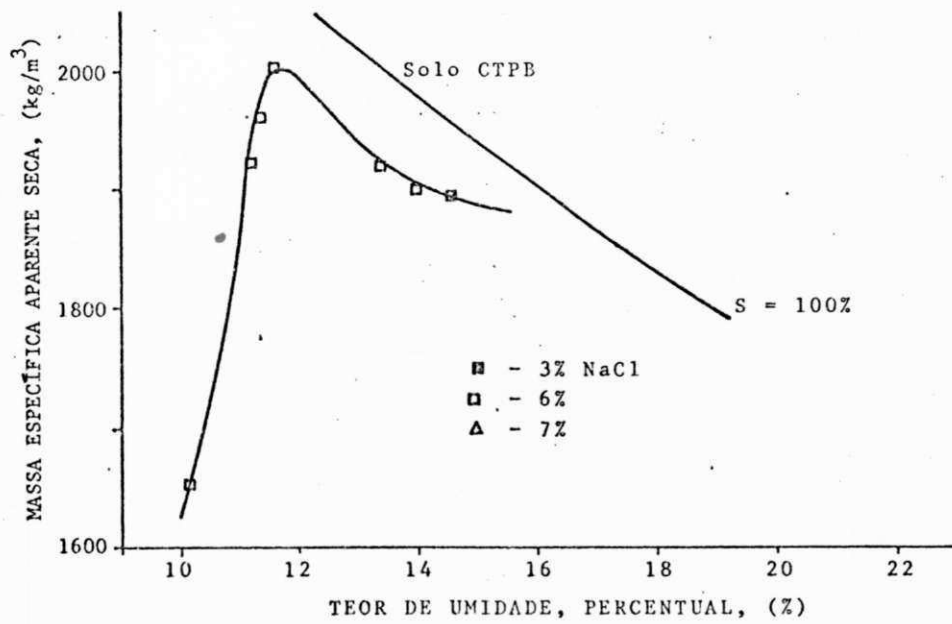
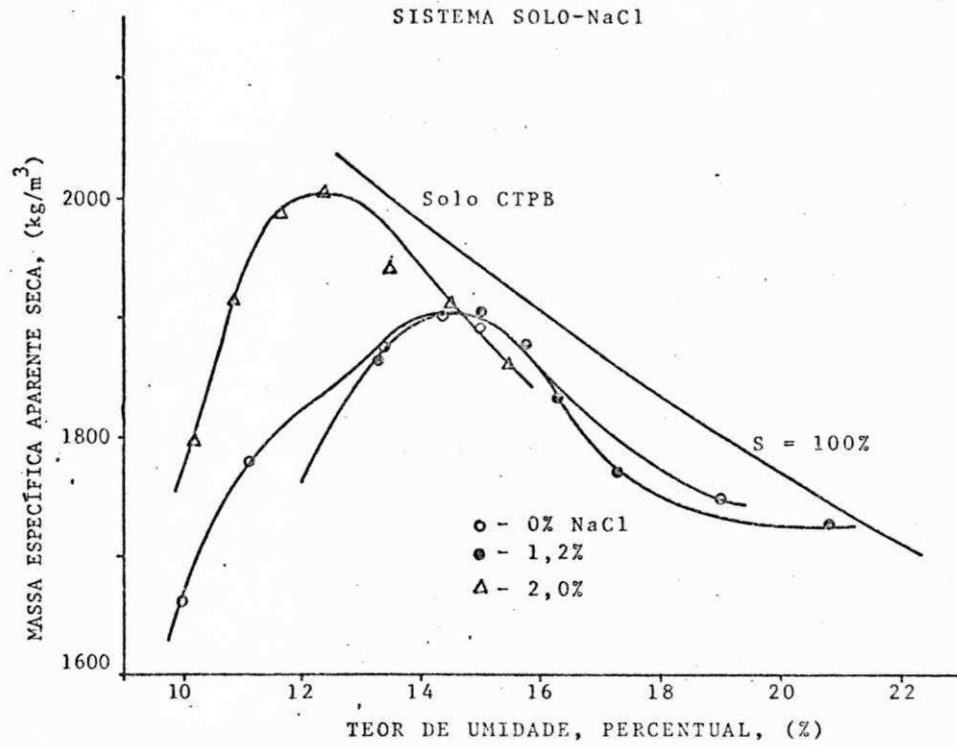


Figura 6.18.3-B - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

1900 kg/m³ para 2000 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 5,5% (de 14,5% para 13,7%). Assim sendo pode-se inferir que as adições de 1,2% e 3,0% modificaram a máxima massa específica aparente seca que foi elevada e o teor de umidade ótima que foi reduzida.

Solo de ARPB - Na Figura 6.18.3-C observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.3. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 20,8% (de 1710 kg/m³ para 2065 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 38,8% (de 18,8% para 11,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 18,7% (de 1710 kg/m³ para 2030 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 37,3% (de 18,8% para 11,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 20,5% (de 1710 kg/m³ para 2062 kg/m³) na máxima massa específica aparente seca e de 41,5% (de 18,8% para 11,0%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que todos os teores de NaCl adicionados modificaram a máxima massa específica aparente seca que foi elevada e o teor de umidade ótima que foi reduzida.

Solo de CAPI - Na Figura 6.18.3-D observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.3. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram as seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 3,1% (de 2085 kg/m³ pa

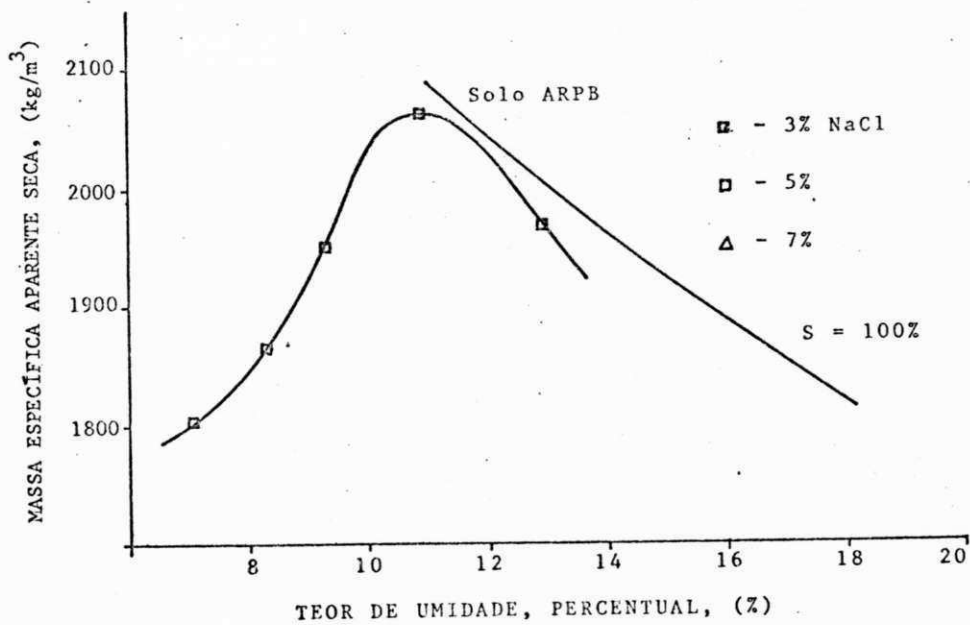
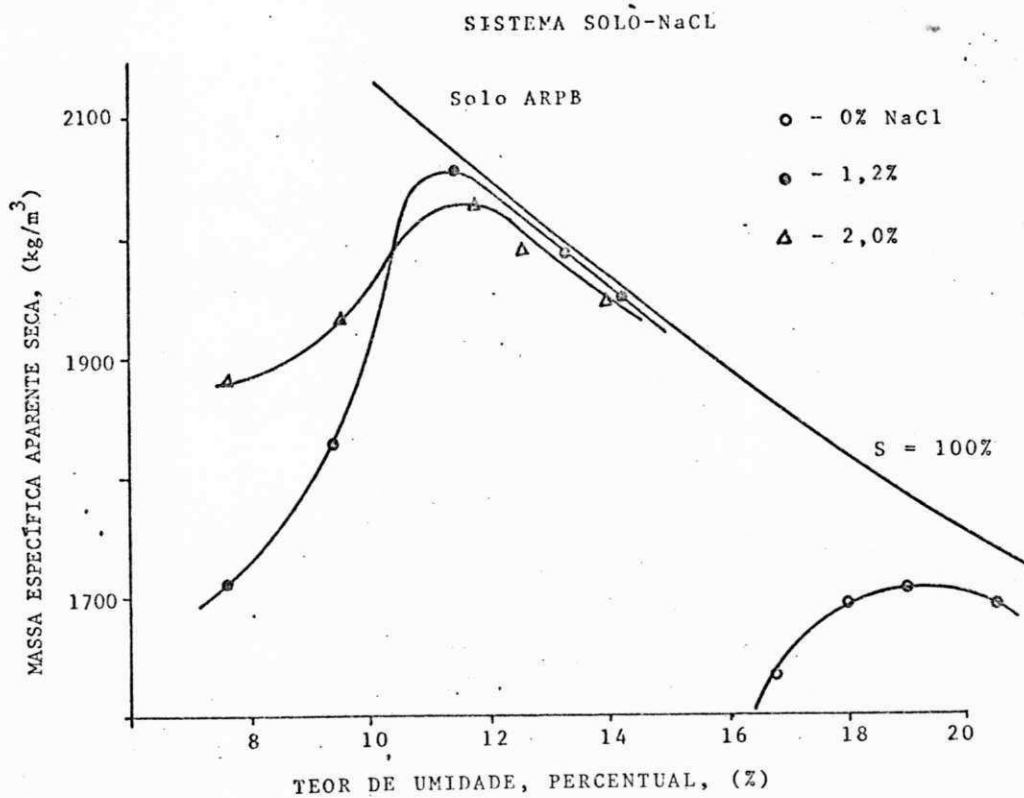


Figura 6.18.2-E - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

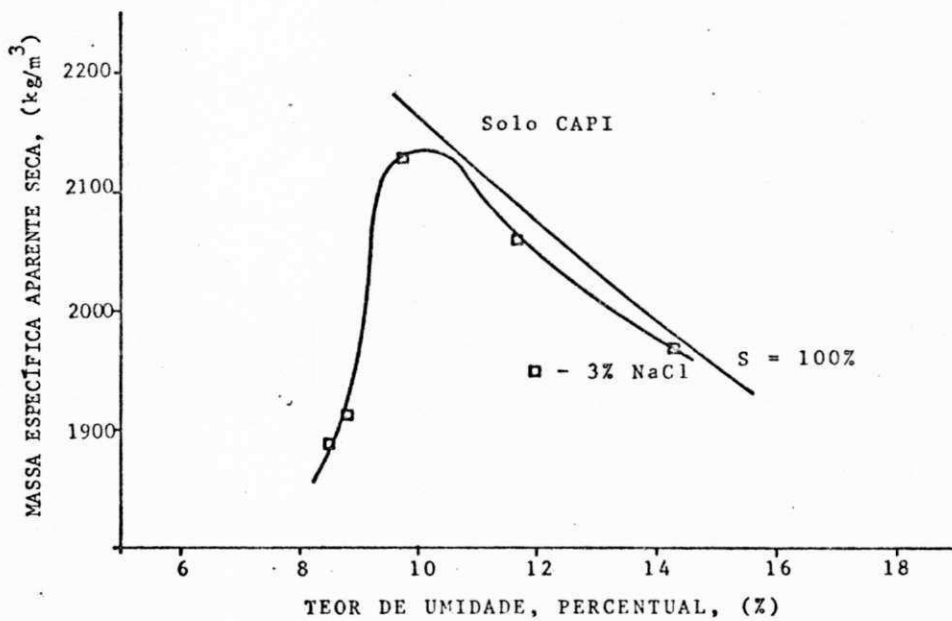
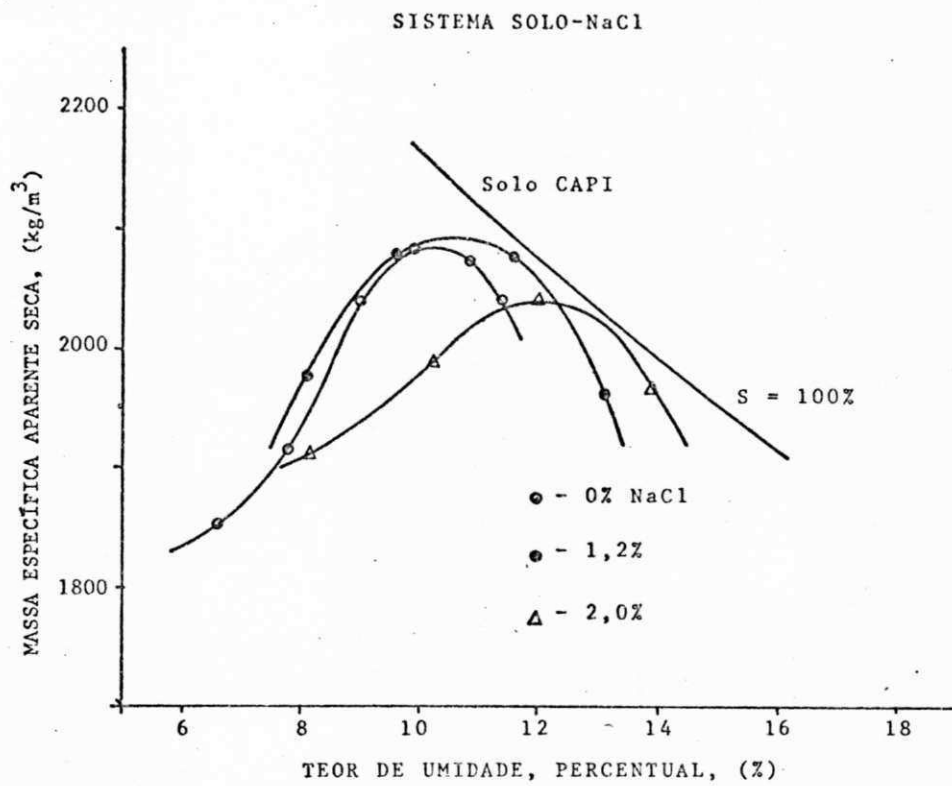


Figura 6.18.3-D - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

ra 2020 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 5,0% (de 10,0% para 10,5%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 2,2% (de 2085 kg/m^3 para 2040 kg/m^3), e de 20,0% (de 10,0% para 12,0%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 0,5% (de 2085 kg/m^3 para 2095 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 5,0% (de 10,0% para 10,5%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que não ocorreu nenhuma modificação na máxima massa específica aparente seca enquanto o teor de umidade ótima foi elevada (o que contraria os modelos teóricos).

Solo de MOPA - Na Figura 6.18.3-E observa-se em forma de gráfico o comportamento da massa específica aparente seca com o incremento do teor de umidade de moldagem. Os valores extremos para a máxima massa específica aparente seca e do respectivo teor de umidade ótima estão na Tabela 6.18.3. Como pode ser verificado as modificações do sistema solo-NaCl em relação ao solo natural foram os seguintes: para a adição de 1,2% de NaCl ocorreu uma variação de 3,4% (de 1617 kg/m^3 para 1672 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 4,8% (de 22,9% para 21,8%) no teor de umidade ótima; para a adição de 2,0% de NaCl ocorreu uma variação de 2,5% (de 1617 kg/m^3 para 1658 kg/m^3) na máxima massa específica aparente seca e de 10,0% (de 22,9% para 20,6%) no teor de umidade ótima; para a adição de 3,0% de NaCl ocorreu uma variação de 4,5% (de 1617 kg/m^3 para 1690 kg/m^3) e de 8,8% (de 22,9% para 20,8%) no teor de umidade ótima. Assim sendo pode-se inferir que não ocorreu nenhuma modificação na máxima massa específica aparente seca enquanto que o teor de umidade ótima foi reduzida.

Os valores situaram-se para as máximas massa específica aparente seca entre 1658 kg/m^3 (para o solo de MOPA)

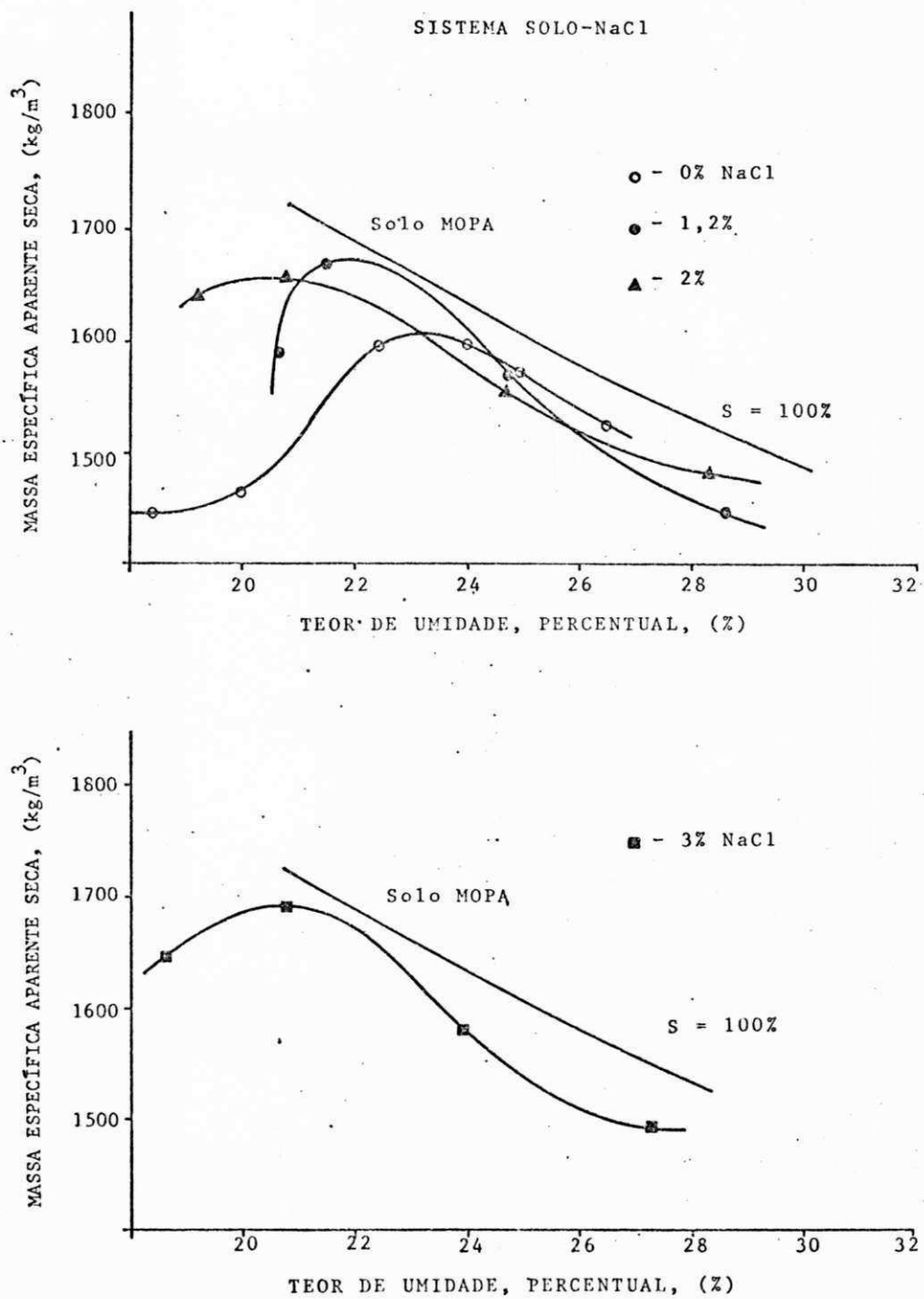


Figura 6.18.3-E - Massa Específica Aparente Seca Versus Teor de Umidade de Moldagem

e 2109 kg/m^3 (para o solo de CAPI), sendo que para o teor de umidade ótima a faixa foi de 10,5% (para o solo de CAPI) a 21,8% (para o solo de MOPA).

Como pode ser verificado na Tabela 6.18.3, a máxima massa específica aparente seca dos solos tratados com NaCl apresentou um comportamento que não pode ser generalizado evoluído com o incremento de aditivo de diferentes formas e em diferentes magnitudes. Observou-se uma forte tendência a elevação deste parâmetro com a adição de teores iniciais de NaCl em relação ao solo natural, na seguinte proporção: para o solo TEPB em 0,8%; para o solo CTPB em 5,5%; para o solo de ARPB em 20,7%; para o solo de CAPI em 0,5% e para o solo de MOPA em 4,5%. Nos solos de TEPB, CAPI e MOPA a elevação da massa específica aparente seca está na faixa de repetibilidade do ensaio, conforme descrito no capítulo 5, Métodos. Após esta elevação ocorreu uma tendência menos pronunciada de redução da massa específica em relação as máximas elevações na seguinte proporção: para o solo de TEPB em 1,2%; para o solo de CTPB em 5,2%; para o solo de ARPB em 1,7%; para o solo de CAPI em 3,3% e para o solo de MOPA em 1,9%. nos solos de TEPB, CAPI e MOPA as reduções também estão na faixa de repetibilidade do ensaio. A Figura 6.18.3-F mostra estes valores na forma de gráficos, podendo-se observar a evolução das máximas com o incremento de NaCl. Dos resultados do teor de umidade ótima mostrados na Tabela 6.18.3, para os solos tratados com NaCl, verificou-se que estes valores tenderam a reduzir-se na seguinte proporção: para o solo de CTPB em 14,5%; para o solo de ARPB em 39,5%; para o solo de MOPA em 10,0%. Os solos de TEPB e CAPI ao contrário dos demais tiveram seus valores de umidade ótima elevados. Alguns solos após esta redução apresentaram tendências para elevação deste parâmetro.

O comportamento exibido pelos solos tratados com NaCl, não está ainda completamente determinado, no entanto

as tendências evidenciadas na Figura 6.18.3-F, que mostra a evolução das máximas massa específica aparente seca e o teor de umidade ótima, conduzem a uma curva de defloculação, cujas modificações típicas não se desenvolveram provavelmente em decorrência da moderada eficiência defloculante e dispersante do aditivo.

Em resumo pode-se observar que:

- a. o cátion cálcio produziu nos solos um comportamento diverso do cátion sódio, quando adicionado na forma de hidróxido;
- b. a ação do cátion sódio quando adicionado como cloreto de sódio (NaCl) (sal neutro) é menor pronunciada do que quando na forma de hidróxido de sódio (NaOH) (base forte);
- c. uma análise comparativa após a adição de cal, NaOH e NaCl, mostra que inegavelmente as maiores variações ou modificações na massa específica aparente seca e teor de umidade ótima, foram devidas à adição do NaOH (base forte) seguida de cal (uma base menos forte) seguida do NaCl (um sal neutro);
- d. a massa específica aparente seca e teor de umidade ótima do sistema solo-cal tendem a ser respectivamente menor e maior que do solos natural;
- e. a massa específica aparente seca e teor de umidade ótima do sistema solo-NaOH tendem a ser respectivamente similar ao simétrico de uma curva de defloculação e a uma curva de defloculação;
- f. a massa específica aparente seca e teor de umidade ótima do sistema solo-NaCl tendem a ser respectivamente maior e menor que no solo natural, sendo este comportamento melhor evidenciado nos solos menos argilosos.

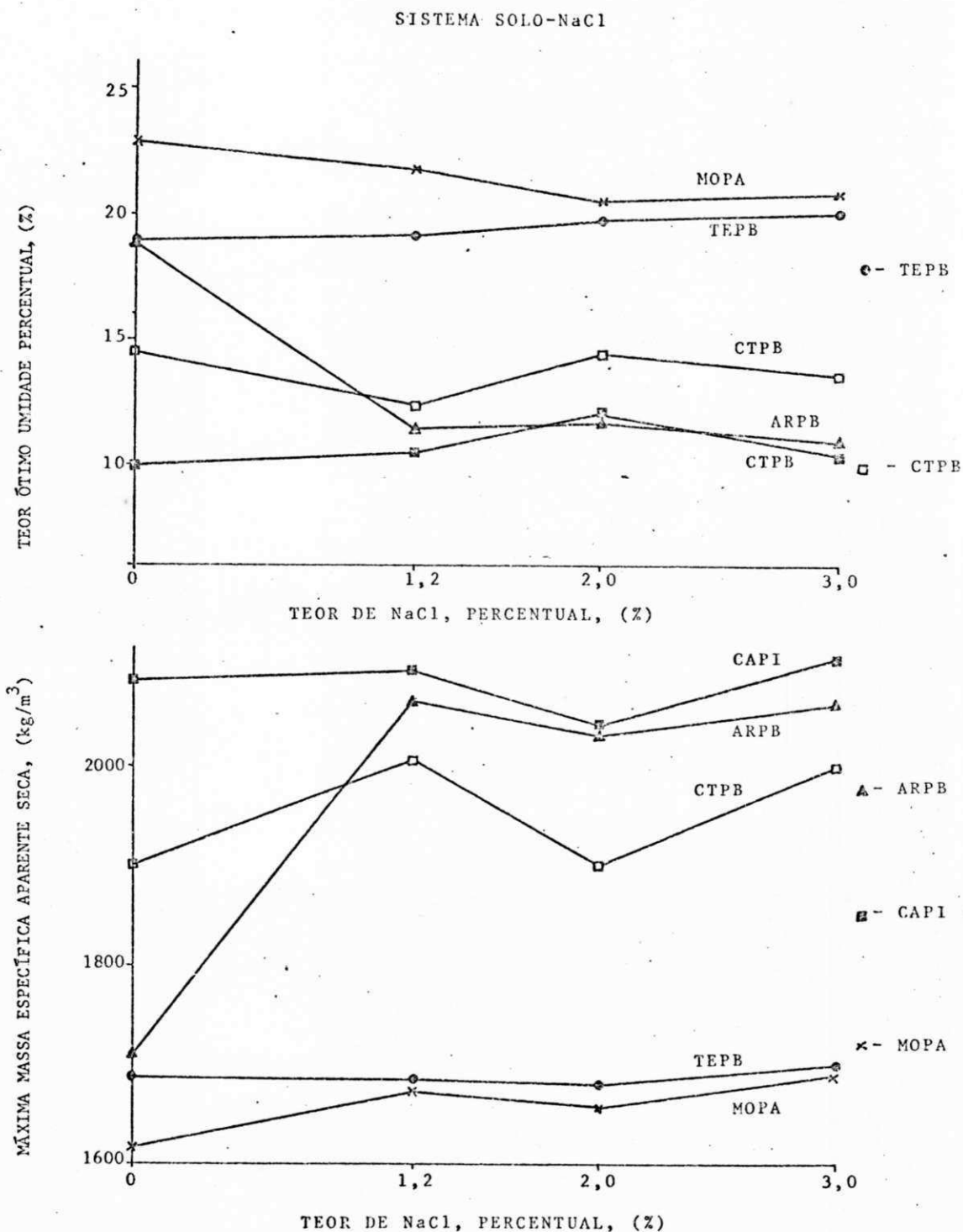


Figura 6.18.3-E - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor Ótimo de Umidade com Incremento de NaCl

6.19 - EFEITOS DOS ADITIVOS NA TENSÃO DE RUPTURA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA (RCS)

6.19.1 - Solo Natural e Tratado com Cal

Os corpos de prova do solo foram imersos em água (estacionária) por 24 horas, sem confinamento, assim sendo, pode-se avaliar a resistência ao amolecimento por efeito da água nesta mistura. Todos os corpos de prova constituídos somente por solo natural, moldados em cinco teores de umidade ao longo da curva de compactação, não resistiram a esta condição. Eles desagregaram completamente, não possibilitando pois, a consecução do ensaio de compressão não confinada. Dessa avaliação pode-se verificar como este material é susceptível a amolecimento e/ou desagregação por efeito da saturação em água.

Em decorrência de não ser possível avaliar a tensão de ruptura a compressão não confinada do solo natural pelo motivo anteriormente exposto, procedeu-se a moldagem de corpos de prova desse material com teor de umidade em torno da ótima, rompendo-se-os após 28 dias de cura úmida sem imersão. Estes comportamentos da tensão de ruptura à compressão não confinada, notado como RCS(*), estão apresentados e discutidas no Apêndice I.

A adição de cal aos solos, modificou de diferentes formas e em diferentes intensidades a tensão de ruptura (RCS) e outras características. A primeira (modificação) se fez notar pela não desagregação durante a imersão a partir de determinada percentagem de cal (em relação ao peso do solo seco). Sendo os solos de CTPB e CAPI os únicos a responderem favoravelmente à imersão com 1% de cal, quando todos os demais necessitaram (pelo que se pode avaliar) de pelo menos 4% de cal.

Os resultados da tensão de ruptura (RCS) para os

solos tratados com cal encontram-se na Tabela 6.18.1 e Figuras 6.19.1-A a 6.19.1-E. Estes valores foram determinados a cinco teores de umidade ao longo da curva de compactação da mistura solo-cal. Na Tabela 6.19.1 encontram-se os valores da máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, (RCS) para os respectivos teores de cal (em relação ao peso do solo seco) e correspondente teor de umidade de moldagem por compactação do corpo de prova. A evolução da máxima tensão de ruptura (RCS) em função do teor de cal está apresentada na Figura 6.19.1-F, os valores foram obtidos das curvas tensão de ruptura em função do teor de umidade de moldagem (Figuras 6.19.1-A a 6.19.1-E).

SOLOS	RCS (*) kPa	RCS (1) kPa	TEOR DE CAL PARA RCS (1) (%)	RCS (1) - RCS (*)	INCRE- MENTO (%)	RCS (2) kPa	(%)
TEPB	243	590	10	347	143	655	10
CTPB	177	278	7	101	57	278	7
ARPB	239	256	4	17	7	256	4
CAPI	154	125	4	-	-	188	10
MOPA	317	425	10	108	34	450	10

RCS (*) - tensão de ruptura à compressão não confinada para o solo natural moldado na umidade ótima e rompido sem imersão, (kPa). (Veja Apêndice 1)

RCS (1) - tensão de ruptura (RCS), para o sistema solo-cal moldado na umidade ótima do solo natural rompido após 27 dias de cura e 1 dia de imersão

RCS (2) - máxima tensão de ruptura (RCS) do sistema solo-cal moldado a qualquer teor de umidade e rompido após 27 dias de cura e 1 dia de imersão.

Tabela - 6.19 - Valores para Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada, (RCS) Solo Natural e Tratado com Cal.

As Figuras 6.19.1-A a 6.19.1-E mostram o comportamento da tensão de ruptura (RCS) de cada um dos solos estudados em função do teor de umidade de moldagem para as diversas porcentagens de cal adicionadas, desde quando a energia de compactação foi constante para todas as situações. Cada Figura mostra também, o comportamento da máxima massa específica aparente seca e respectivo teor de umidade ótima para cada teor de cal adicionada.

Solo de TEPB - Na Figura 6.19.1-A observa-se que a adição de 1% de cal foi insuficiente para promover a resistência ao amolecimento deste solo pelo efeito da água, durante a imersão. Todos os corpos de prova moldados com este teor de cal desagregaram completamente durante a imersão. A adição de 7% de cal promoveu um aumento de 64%, isto é, de 350 kPa para 375 kPa na tensão de ruptura (RCS) em relação à adição de 4% de cal; a adição de 10% de cal promoveu um aumento de 87% em relação a adição de 4% de cal, isto é, de 350 kPa para 655 kPa. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 4% para 7% de cal, isto é, 75% mais de cal elevou a tensão de ruptura (RCS) em 64%, enquanto um incremento de 250% de cal (4% para 10%) elevou a tensão de ruptura em 87% que representa somente 23% a mais. Assim sendo, para um consumo muito maior de aditivo a elevação na tensão de ruptura (RCS) não é incrementada proporcionalmente. Observa-se também, na Figura 6.20.1-A que a máxima tensão de ruptura (RCS), para a adição de 7% e 10% de cal, ocorreu a teores de umidade superiores ao ótimo. Para a adição de 4% de cal ocorreu o contrário.

Solo de CTPB - Na Figura 6.19.1-B, observou-se que a adição de 1% de cal, conferiu a este solo resistência ao amolecimento, pelo efeito da água, caracterizada pela não desagregação dos corpos de prova durante a imersão. A adição de 4%; 7% e 10% de cal promoveram elevações na tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 47% (de 94 kPa para 139 kPa); 193% (de 94 kPa para 275 kPa) e 71% (de 94 kPa para 255 kPa)

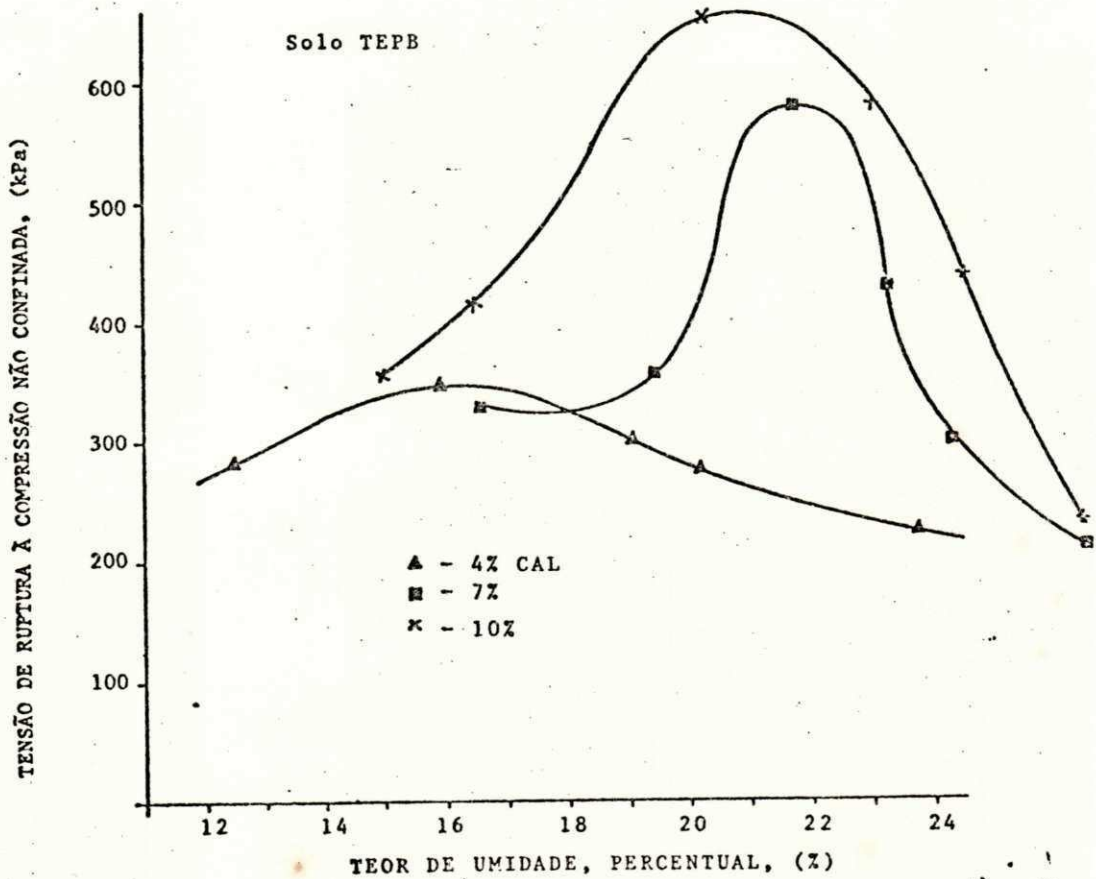
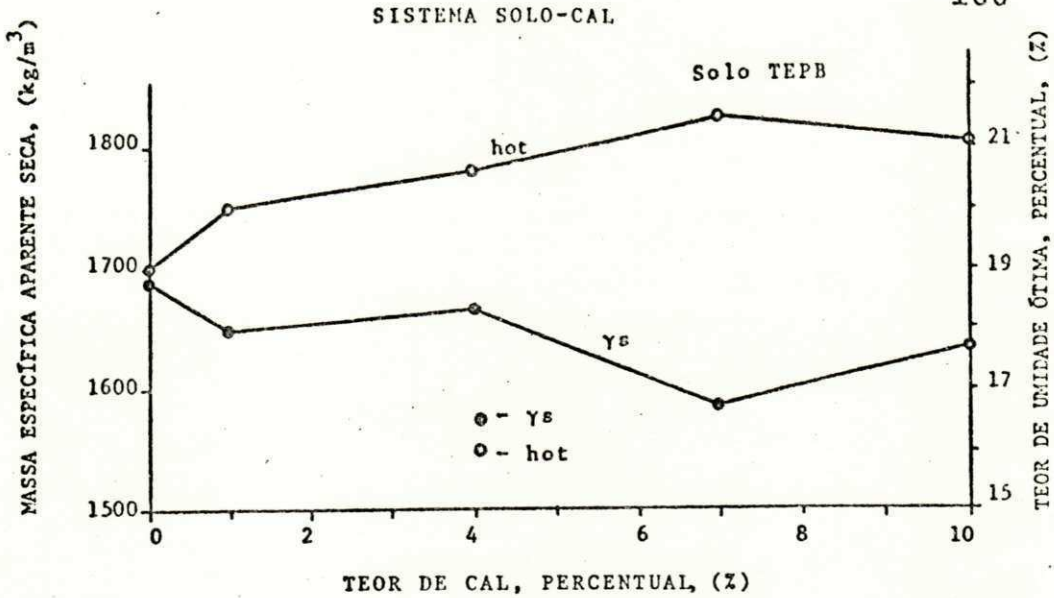


Figura 6.19.1-A

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de Cal.

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

SISTEMA SOLO-CAL

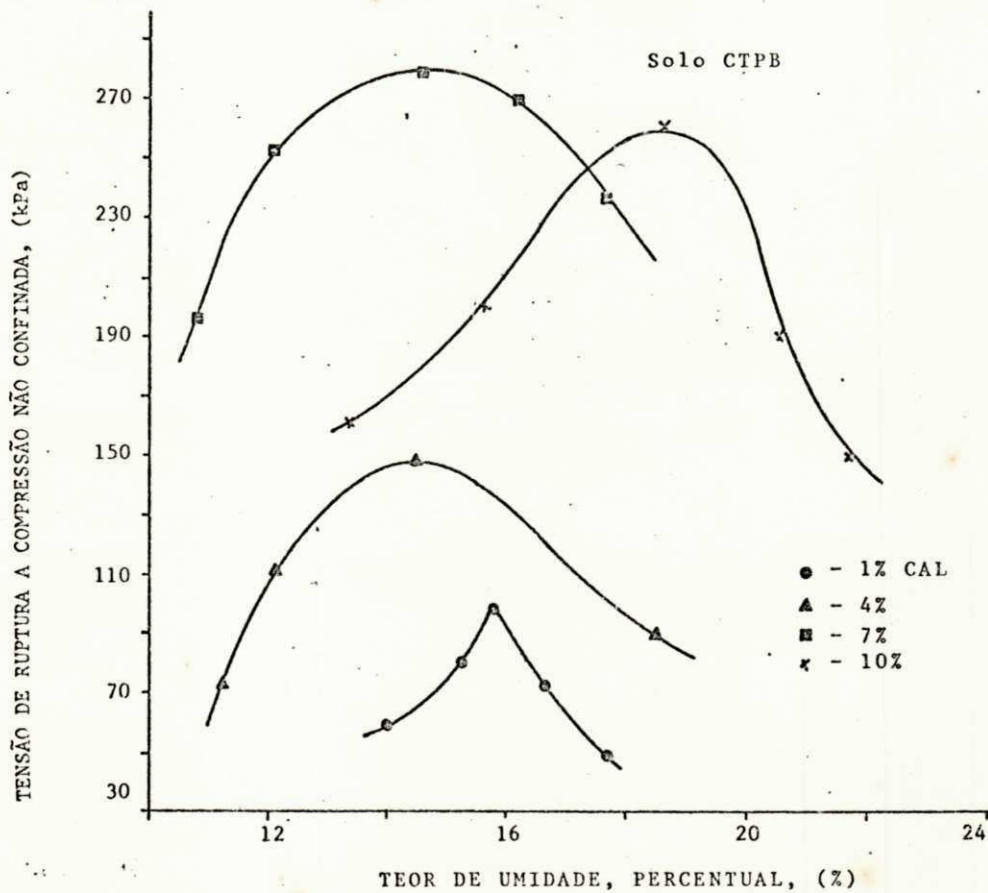
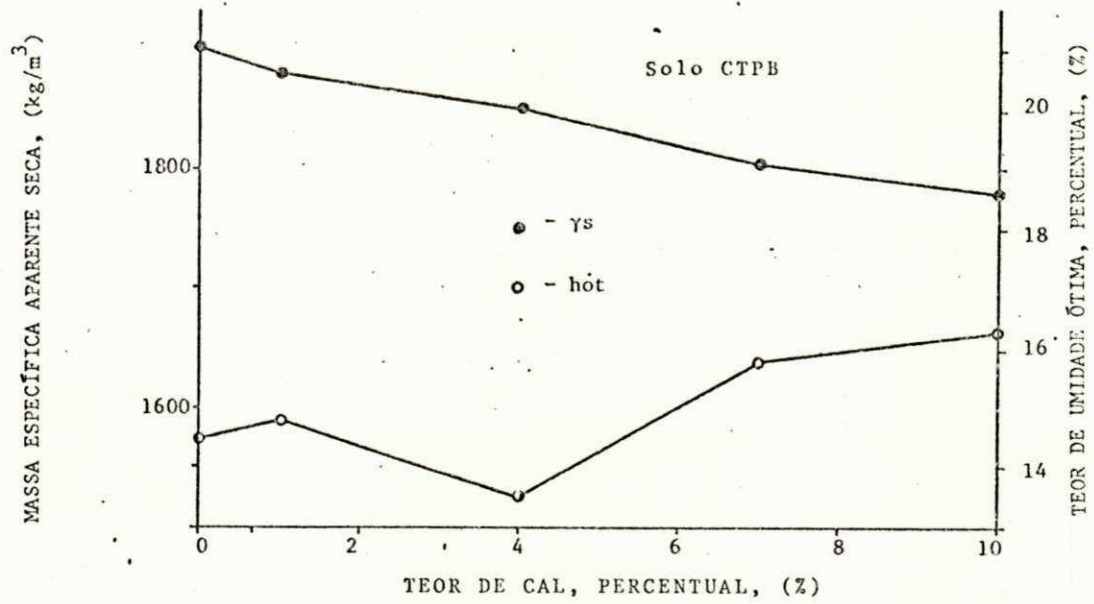


Figura 6.19.1-B

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de Cal

Inferior - Tensão de Ruptura a Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

em relação à adição de 1% de cal. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 700% de cal, (de 1% para 7%) promoveu uma elevação na tensão de ruptura de 193%, enquanto um incremento de 1000% elevou a tensão de ruptura em 71%, portanto 122% a menos. Assim sendo, para um menor consumo de aditivo foi obtida uma maior elevação na tensão de ruptura (RCS). Observa-se também, na Figura 6.19.1-B, que a máxima tensão de ruptura (RCS) para a adição de 1%; 4% e 10%, ocorreu a teores de umidade superiores ao teor de umidade ótima. Para a adição de 7% de cal ocorreu o contrário.

Solo de ARPB - Na Figura 6.19.1-C, observa-se que a adição de 1% de cal foi insuficiente para promover a resistência ao amolecimento deste solo pelo efeito da água durante a imersão. Todos os corpos de prova moldados com este teor de cal desagregaram durante a imersão. A adição de 7% e 10% de cal reduziram a tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 7% (de 256 kPa para 239 kPa) e 8% (de 256 kPa para 236 kPa) em relação a adição de 4% de cal. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 75% (de 4% para 7%) a 250% (de 4% para 10%) de cal reduziu a tensão de ruptura. Observa-se também, na Figura 6.19.1-C que a máxima tensão de ruptura (RCS) para a adição de 4%, 7% e 10% ocorreu a teores de umidade inferiores ao teor de umidade ótima.

Solo de CAPI - Na Figura 6.19.1-D, observa-se que a adição de 1% de cal conferiu a este solo resistência ao amolecimento pelo efeito da água, caracterizada pela não desagregação dos corpos de prova durante a imersão. A adição de 4%; 7% e 10% de cal promoveram elevações na tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 97% (de 75 kPa para 148 kPa) 133% (de 75 kPa para 175 kPa) e 147% (de 75 kPa para 195 kPa), em relação a adição de 1% de cal. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 700% de cal, de 1% para 7%, promoveu uma elevação na tensão de ruptura (RCS) em 133%, enquan

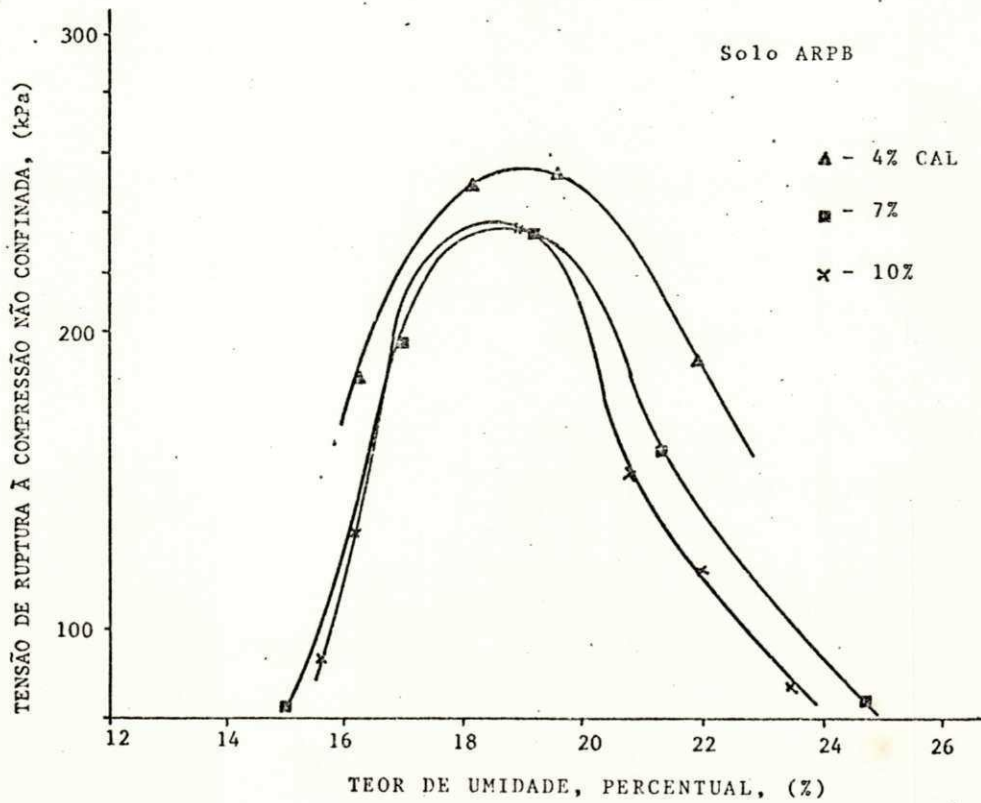
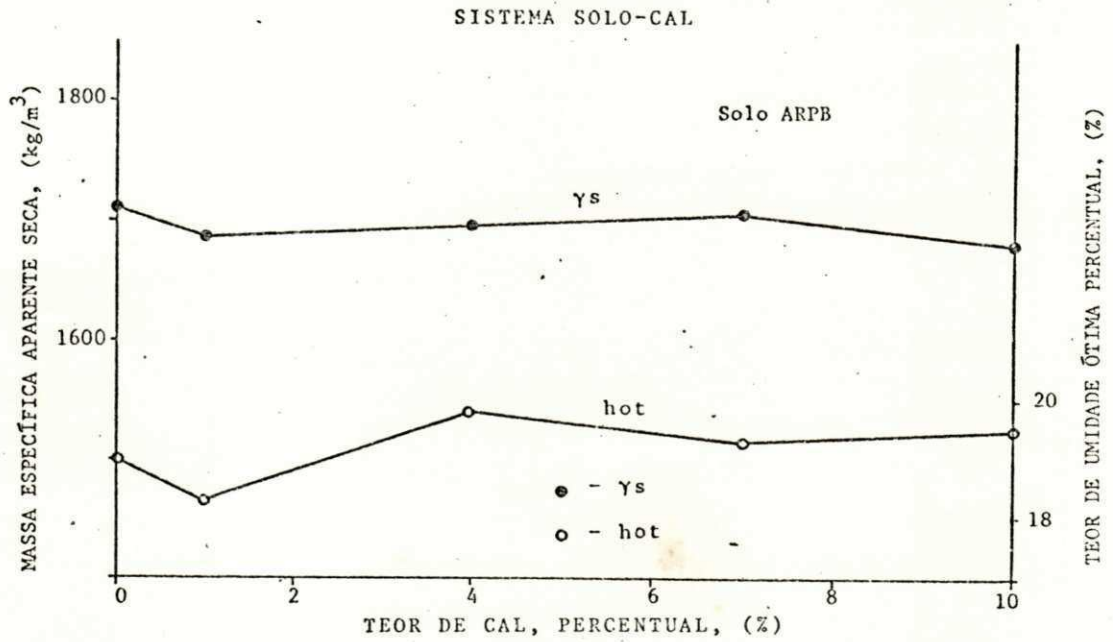


Figura 6.19.1-C

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seça e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de Cal

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

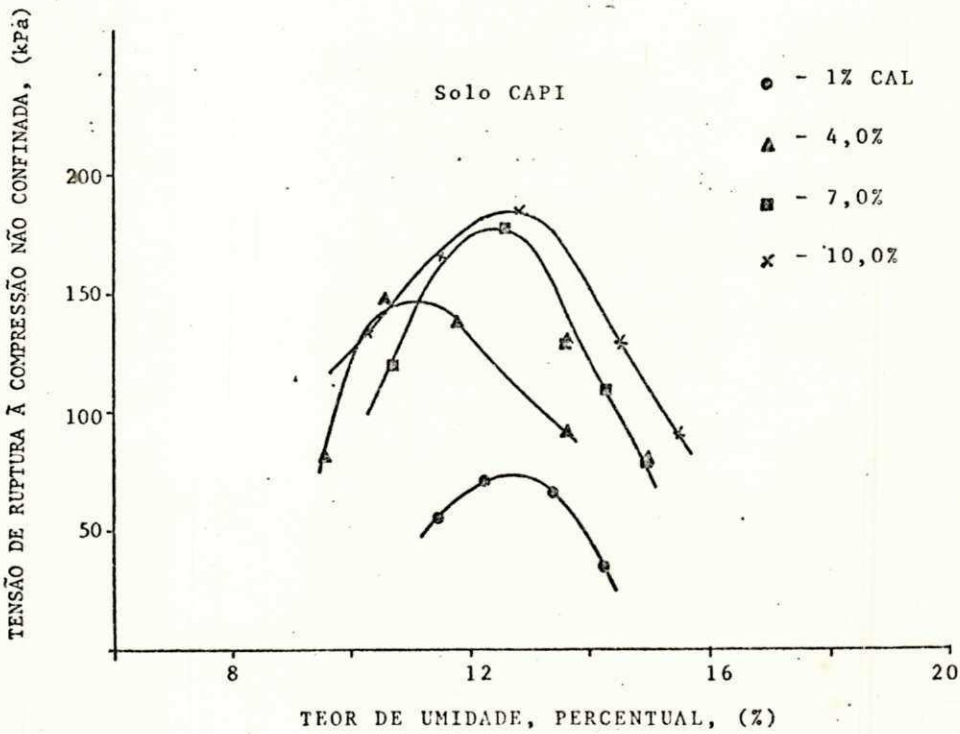
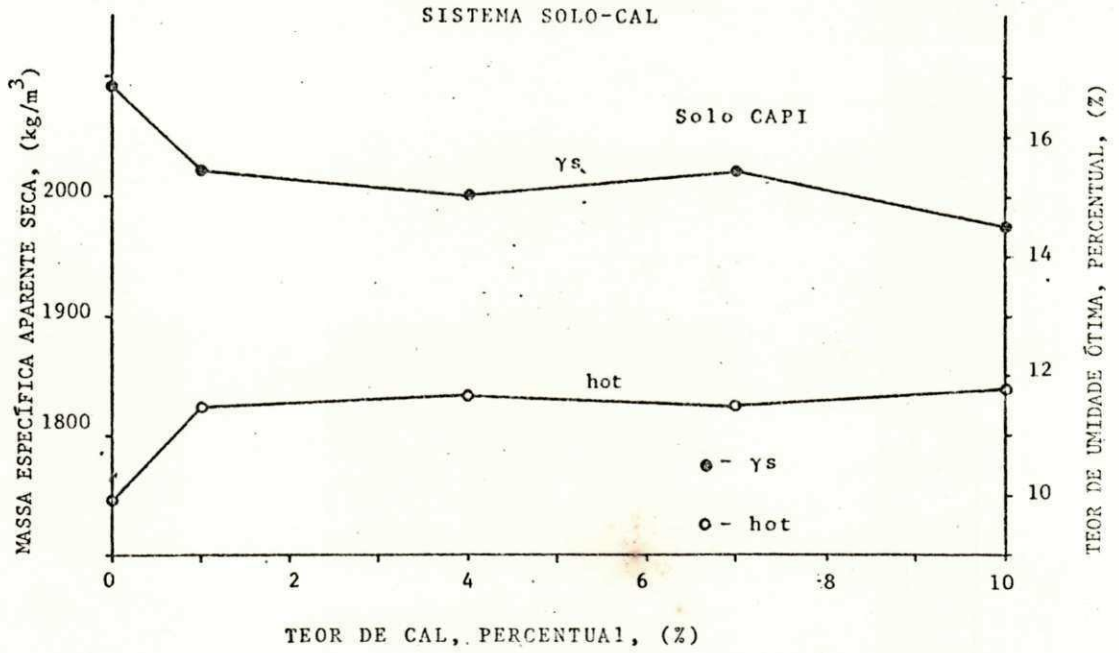


Figura 6.19.1-D

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de Cal

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão Não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

to um incremento de 1000% elevou a tensão de ruptura (RCS) em 147% que representa apenas 11% a mais. Observa-se também na Figura 6.19.1-D que a máxima tensão de ruptura (RCS) para a adição de 1%, 7% e 10% de cal, ocorreu a teores de umidade superiores ao teor de umidade ótima. Para adição de 7% de cal ocorreu o contrário.

Solo de MOPA - Na Figura 6.19.1-E, observa-se que a adição de 1% de cal foi insuficiente para promover a resistência ao amolecimento deste solo, pelo efeito da água durante a imersão. Todos os corpos de prova moldados com este teor de cal desagregaram durante a imersão. A adição de 7% e 10% de cal, promoveram elevações na tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 3% (de 370 kPa para 380 kPa) e 22% (de 370 kPa para 450 kPa) em relação a adição de 4% de cal. Observa-se também na Figura 6.19.1-E, que a máxima tensão de ruptura (RCS) para a adição de 7% e 10% de cal, ocorreu a teores de umidade superiores ao teor de umidade ótima. Para adição de 4% ocorreu o contrário.

Os resultados apresentados na Tabela 6.18.1 e 6.19, mostram a tensão de ruptura (RCS1) para os solos tratados com várias porcentagens de cal. Os corpos de prova foram moldados no teor de umidade ótima do solo natural e rompidos após 27 dias de cura úmida e 1 dia de imersão. A faixa de valores para máxima tensão de ruptura (RCS1) está compreendida entre 590 kPa (para o solo de TEPB com 10% de cal) e 125 kPa (para o solo de CAPI com 4% de cal). Sendo a média da tensão de ruptura (RCS1) para esta condição de moldagem e rompimento igual a 355 kPa.

A máxima tensão de ruptura (RCS), para o sistema solo-cal, independentemente da umidade de moldagem, está compreendida entre 188 kPa (para o solo de CAPI com 10% de cal) e 655 kPa (para o solo de TEPB com 10% de cal). O valor médio é igual a 422 kPa, portanto 87% superior à do solo na-

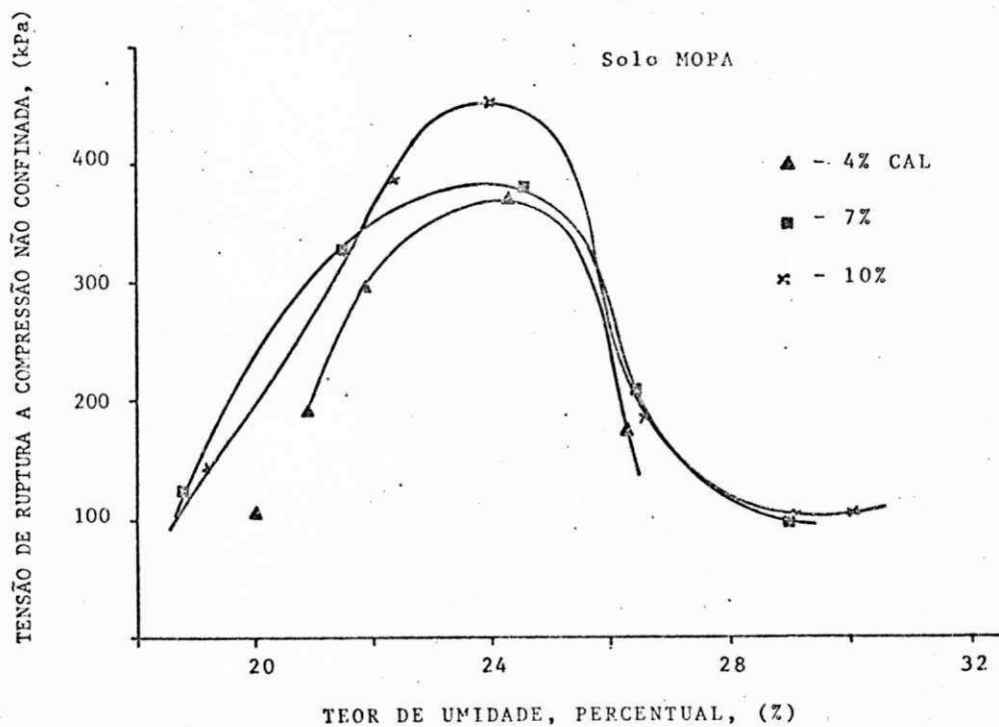
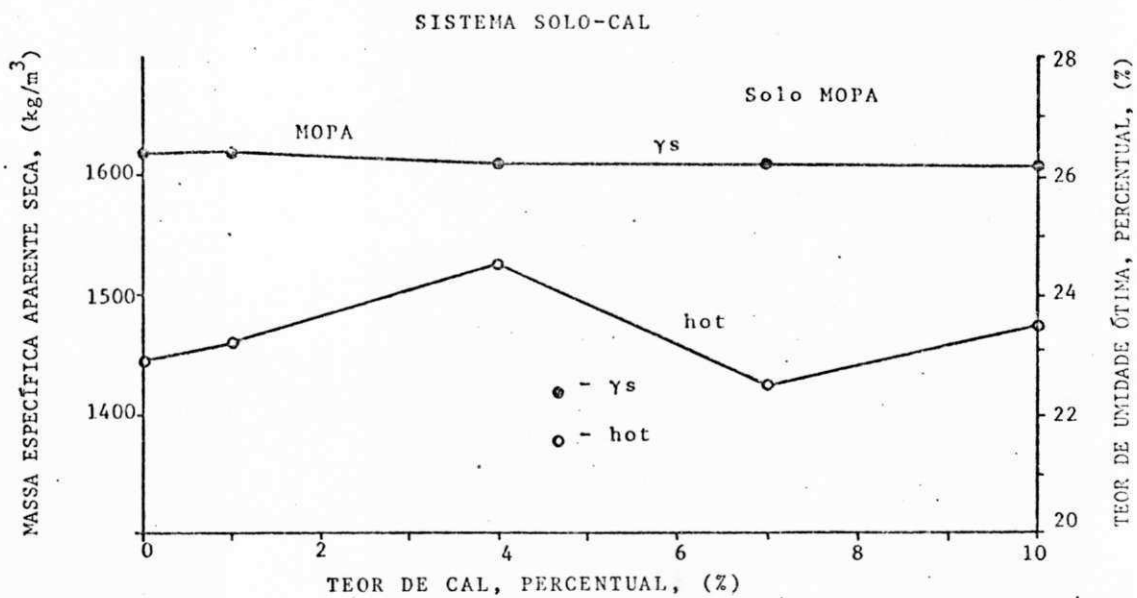


Figura 6.19.1-E

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de Cal

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

tural. A Figura 6.19.1-F mostra a evolução da máxima tensão de ruptura (RCS) com o incremento de cal. Como pode ser verificado, os solos de CTPB, ARPB e CAPI com o incremento de 7% de cal, exibiram uma tensão de ruptura (RCS) máxima, tendendo a decrescer com os novos incrementos de cal entretanto, os solos de TEPB e MOPA mesmo com até 10% de cal não visualizou-se um máximo. Não se prosseguiu o incremento além dos 10%, pois a adição de mais 7% de cal é comprovadamente, em geral, anti-econômica, torna-se na maioria das vezes mais interessante substituir-se a cal por um outro aditivo que se adegue melhor.

O mecanismo pelo qual a adição de cal ao solo eleva a tensão de ruptura (RCS) é admitido pela maioria dos pesquisadores, TRR (1976), como decorrente da formação de agentes cimentícios, através da reação do cálcio (Ca^{2+}), dissociado da cal com a sílica ou alumina presente no solo (solubilizada e/ou amorfa). Nos solos onde a fonte de sílica e alumina é o argilo-mineral caulinita, como provavelmente os lateríticos, a reação solo-cal ataca a caulinita solubilizando a sílica e a alumina que ficam então disponíveis para reagirem com os íons cálcio (Ca^{2+}). Tal solubilização por princípios básicos, está fortemente ligada também à entropia do sistema, que por sua vez, está associada com o grau de cristalinidade. Assim sendo caulinitas menos cristalizadas serão mais solúveis e propiciarão maiores teores de sílica e alumina para formação de agentes cimentícios (reação pozolânica) se comparadas a outras caulinitas melhor cristalizadas.

Existem evidências da influência da quantidade de caulinita, presente na fração menor que $2\mu\text{m}$ (argila) na reatividade da cal adicionada ao solo, conforme experimentos de Queiroz de Carvalho (1979); no entanto, por não ser ainda possível mensurar a totalidade da sílica e alumina solubilizada da caulinita, bem como qual a quantidade destas necessárias para promover a reação pozolânica entre o solo e a cal, torna-se difícil uma conclusão à respeito da influência do teor de sílica e alumina disponível para a reação pozolânica

SISTEMA SOLO-CAL

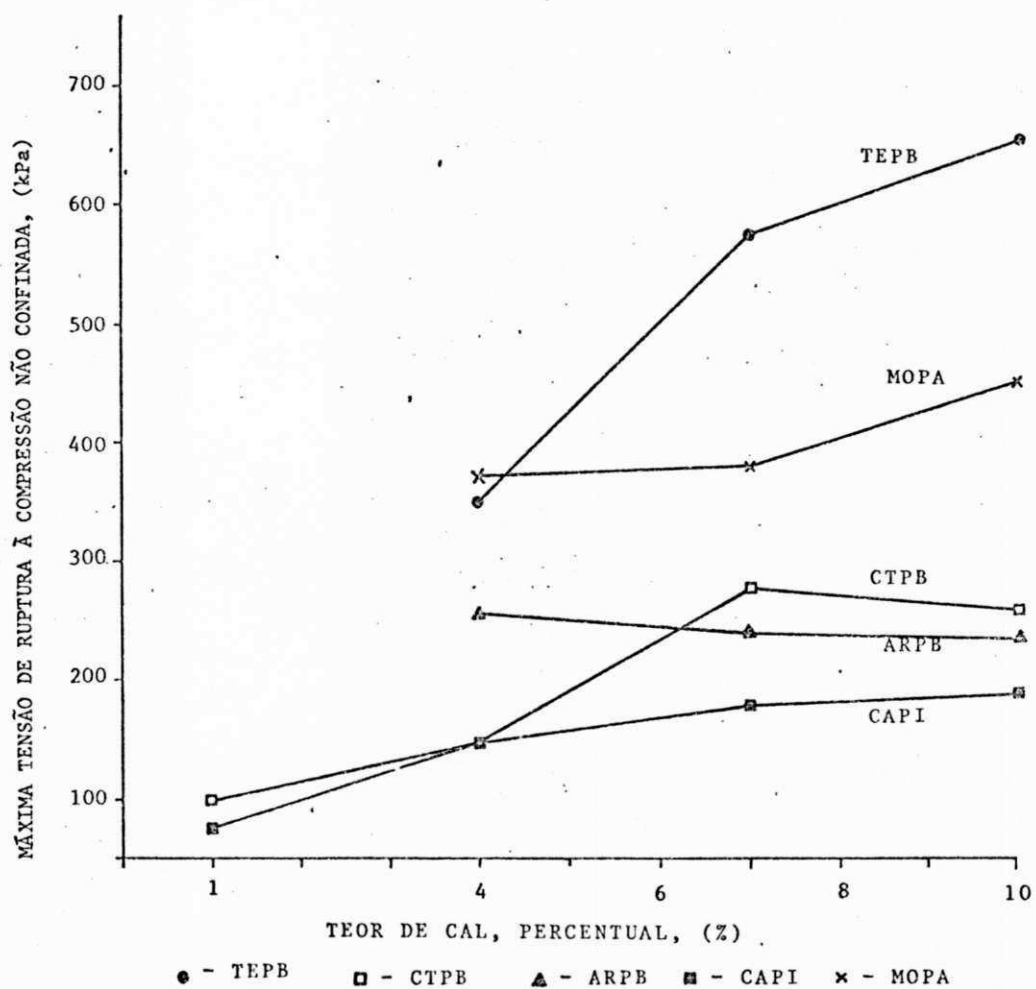


Figura 6.19.1-F - Evolução da Máxima Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada com o Incremento de Aditivo

sômente a partir da presença e grau de cristalinidade da caulinita, que não é provavelmente a única fonte de suprimento de sílica e alumina para a formação de agentes cimentícios.

Como pode ser visto não se conseguiu nesta análise de resultados, nenhuma justificativa fenomenológica baseada em propriedades caracterizantes que pudesse justificar de uma maneira simplista o comportamento desses solos. Tal fato se deve a complexibilidade dos fenômenos aqui envolvidos, onde o desenvolvimento de uma propriedade é influenciada por grande número de outras, muitas das quais não se tem adequado conhecimento. Estando-se consciente de que as meras descrições sejam altamente indesejáveis (acredita-se que pelo prosseguimento destes trabalhos e consequente acúmulo de dados seja possível obter justificativas para os comportamentos aqui encontrados), é que no capítulo 7, (se bem que, de uma maneira bastante limitada por serem reduzidos os solos estudados), procurar-se-á alguma evidência que forneça respaldo para o comportamento exibido pelos solos.

6.19.2 - Solo Tratado com NaOH e com NaCl

A adição de NaOH aos solos, modificou de diferentes formas e em diferentes intensidades a tensão de ruptura (RCS). A primeira modificação se fez notar pela não desagregação durante a imersão a partir de determinada porcentagem de NaOH. Sendo os solos de TEPB e MOPA os únicos a terem sua resistência ao amolecimento pelo efeito da água durante a imersão, incrementada com apenas 0,5% de NaOH. Esta resistência foi evidenciada pela não desagregação dos corpos de prova durante a imersão. A adição de 0,3% de NaOH foi insuficiente para promover esta característica em todos os solos ao passo que 1,2% de NaOH foi suficiente para conferi-la aos demais solos, CTPB, ARPB e CAPI.

Os resultados da tensão de ruptura (RCS) para os solos após tratados com NaOH, encontram-se na Tabela 6.18.2

e Figuras 6.19.2-A a 6.19.2-E. Estes resultados foram determinados com cinco teores de umidade ao longo da curva de compactação da mistura solo-NaOH. A evolução dos valores máximos da tensão de ruptura (RCS) colocados em forma gráfica na Figura 6.19.2-F, foi obtida das curvas tensão de ruptura (RCS) função do teor de umidade de moldagem (Figuras 6.19.2-A a 6.19.2-E). As Figuras 6.19.2-A a 6.19.2-E mostram o comportamento da tensão de ruptura (RCS) à compressão não confinada em função do teor de umidade de moldagem e teor de NaOH, bem como a evolução da máxima massa específica aparente seca e teor de umidade ótima com o incremento deste aditivo.

As razões para a não resistência ao amolecimento, pelo efeito da água, durante a imersão, quando da adição de 0,3% de NaOH em nenhum dos solos não estão ainda completamente esclarecidas, contudo acredita-se que provavelmente a quantidade de aditivo e as condições de cura não foram propícias para que ocorresse uma reação entre o solo e NaOH que pudesse ser detectada nesta avaliação. A adição de 0,5% de NaOH, como anteriormente referido, promoveu o aumento da resistência ao amolecimento pelo efeito da água nos solos de TEPB e MOPA, é provável que tenha sido em decorrência das características intrínsecas destes solos.

Solo de TEPB - Na Figura 6.19.2-A observa-se que a adição de 0,3% de NaOH foi insuficiente para promover a resistência ao amolecimento pelo efeito da água, durante a imersão, todos os corpos de prova moldados com este teor de aditivo de saíram completamente durante a imersão. A adição de 0,5% de NaOH implementou neste solo esta característica. A adição de 1,2%; 2,4% e 3,0% de NaOH promoveu elevações na tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 27% (de 157,5 kPa para 200 kPa); 35% (de 157,5 kPa para 213 kPa) e 46% (de 157,5 kPa para 230 kPa) em relação a adição de 0,5% de NaOH. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 0,5% para 1,2% de NaOH, isto é, 140% mais de NaOH, implementou a

SISTEMA SOLO-NaOH

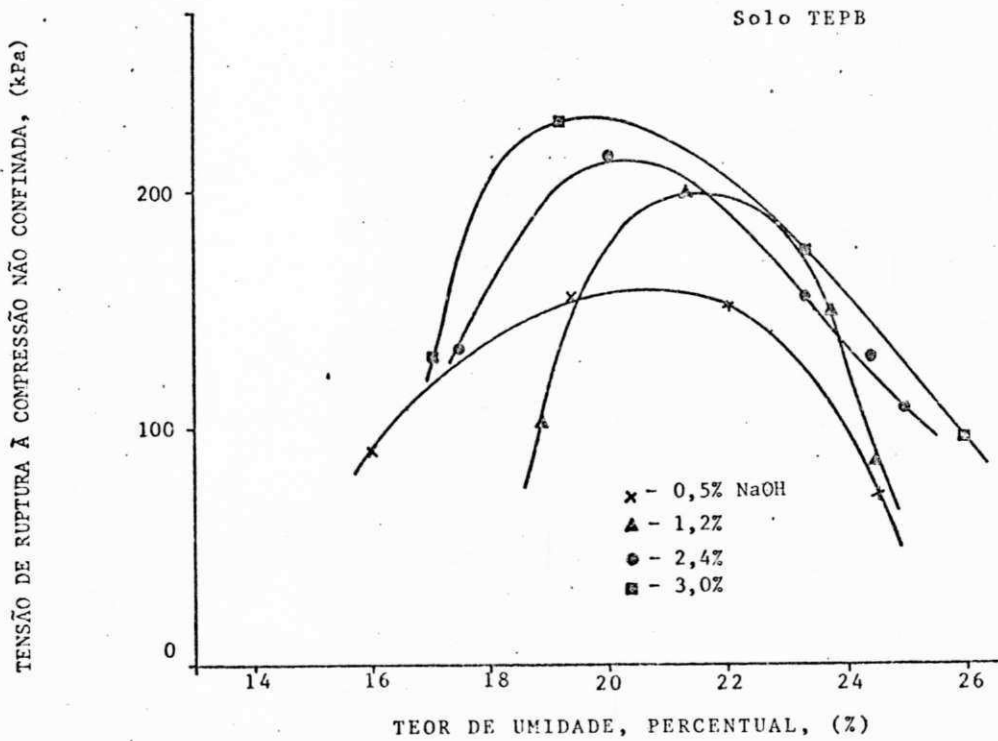
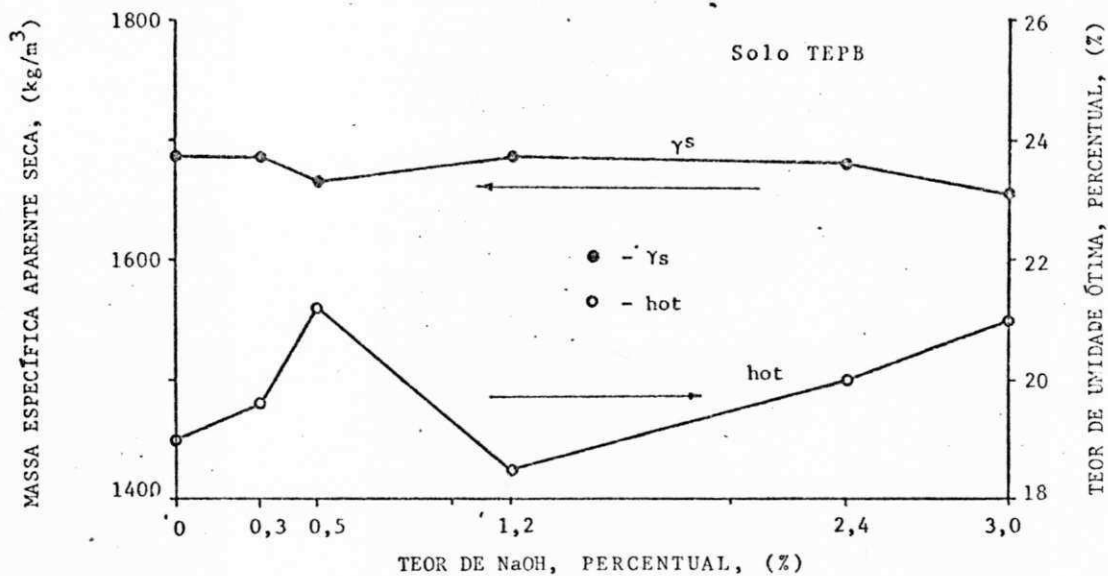


Figura 6.19.2-A

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaOH

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

tensão de ruptura em 35% enquanto um incremento de 280% e 400% de NaOH, elevou a tensão de ruptura (RCS) em 35% e 46% isto é, praticamente duplicando-se o consumo de aditivo aumentou-se a tensão de ruptura (RCS) em 30% apenas. Observa-se também na Figura 6.19.2-A que o teor de umidade de moldagem na ruptura é em geral menor do que o teor de umidade ótima.

Solo de CTPB - Na Figura 6.19.2-B, observa-se que a adição de 0,3% e 0,5% de NaOH foram insuficiente para aumentarem a resistência ao amolecimento deste solo pelo efeito da água, durante a imersão, tendo os corpos de prova moldados com estes teores de NaOH, desagregado completamente durante a imersão. Com a adição de 1,2% de NaOH esta característica foi implementada. A adição de 2,4% e 3,0% de NaOH elevaram a tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 128% (de 70 kPa para 160 kPa) e 42% (de 70 kPa para 100 kPa) em relação a adição de 1,2% de NaOH. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 100% de aditivo (1,2% para 2,4%) proporcionou uma elevação na tensão de ruptura (RCS) de 128% enquanto um incremento de 150% (1,2% para 3,0%) de NaOH elevou este parâmetro em somente 42%, portanto 86% a menos. Observa-se também na Figura 6.19.2-B que o teor de umidade de moldagem na ruptura é em geral menor do que o teor de umidade ótima.

Solo de ARPB - Na Figura 6.19.2-C observa-se que a adição de 0,3% e 0,5% de NaOH foram insuficientes para aumentarem a resistência ao amolecimento deste solo pelo efeito da água durante a imersão, tendo os corpos de prova moldados com estes teores de NaOH desagregado completamente durante a imersão. Com a adição de 1,2% de NaOH esta característica foi implementada. A adição de 2,4% e 3,0% de NaOH elevaram a tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 68% (de 159 kPa para 267 kPa) e 16% (de 159 kPa para 184 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 100% de aditivo (1,2%

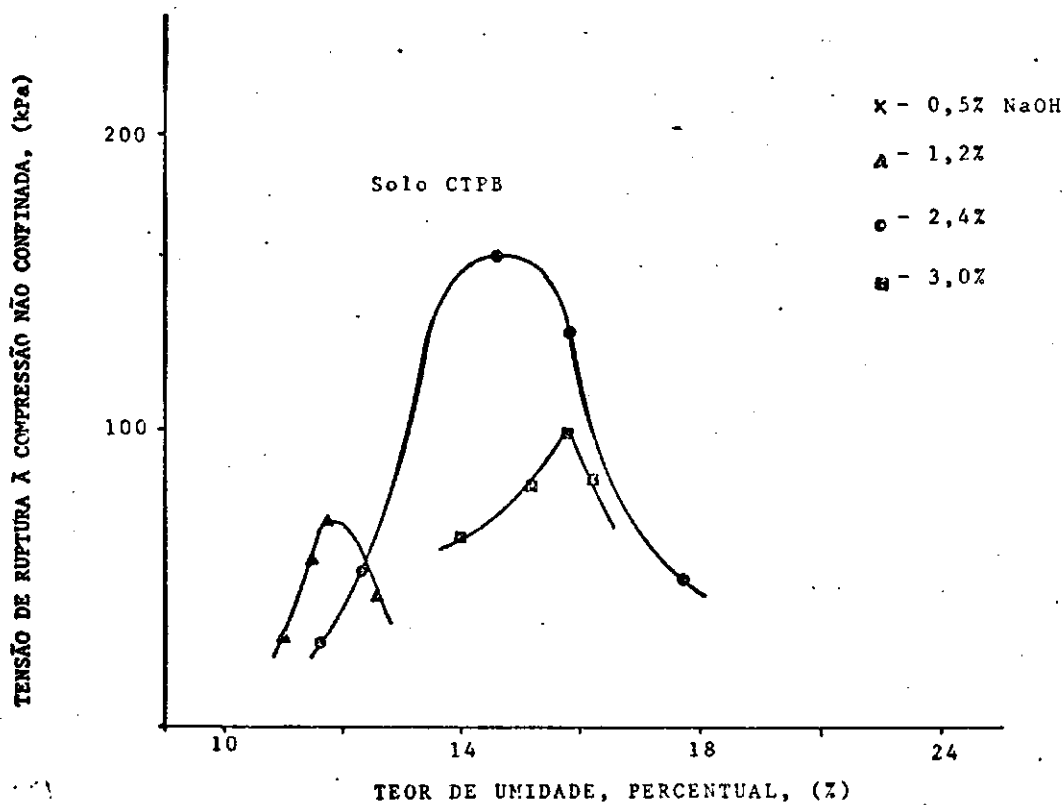
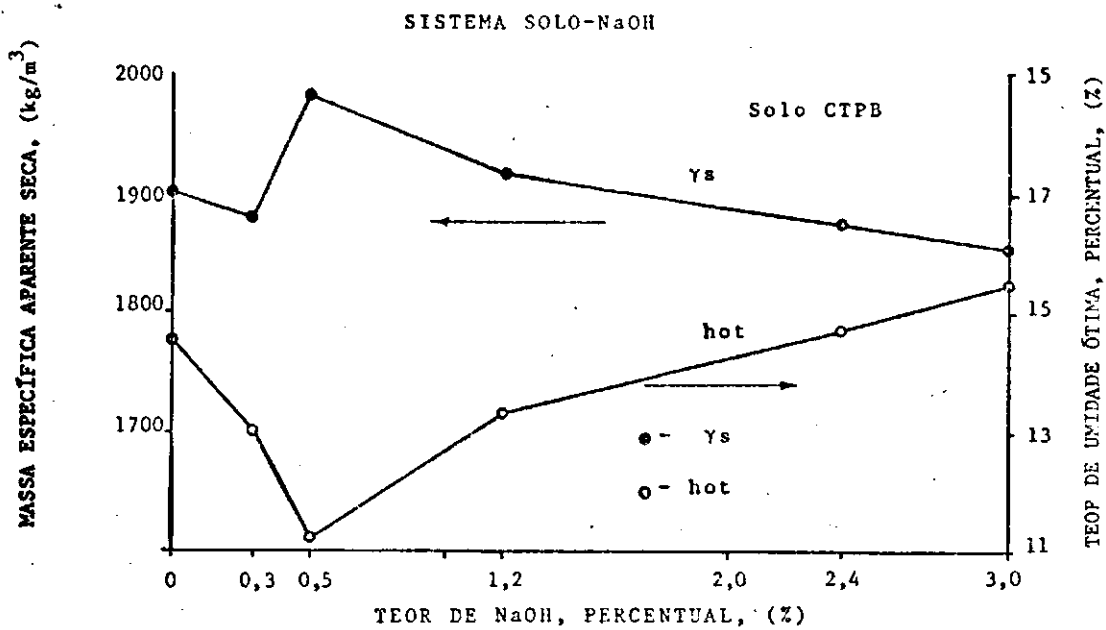


Figura 6.19.2-B

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaOH

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

SISTEMA SOLO-NaOH

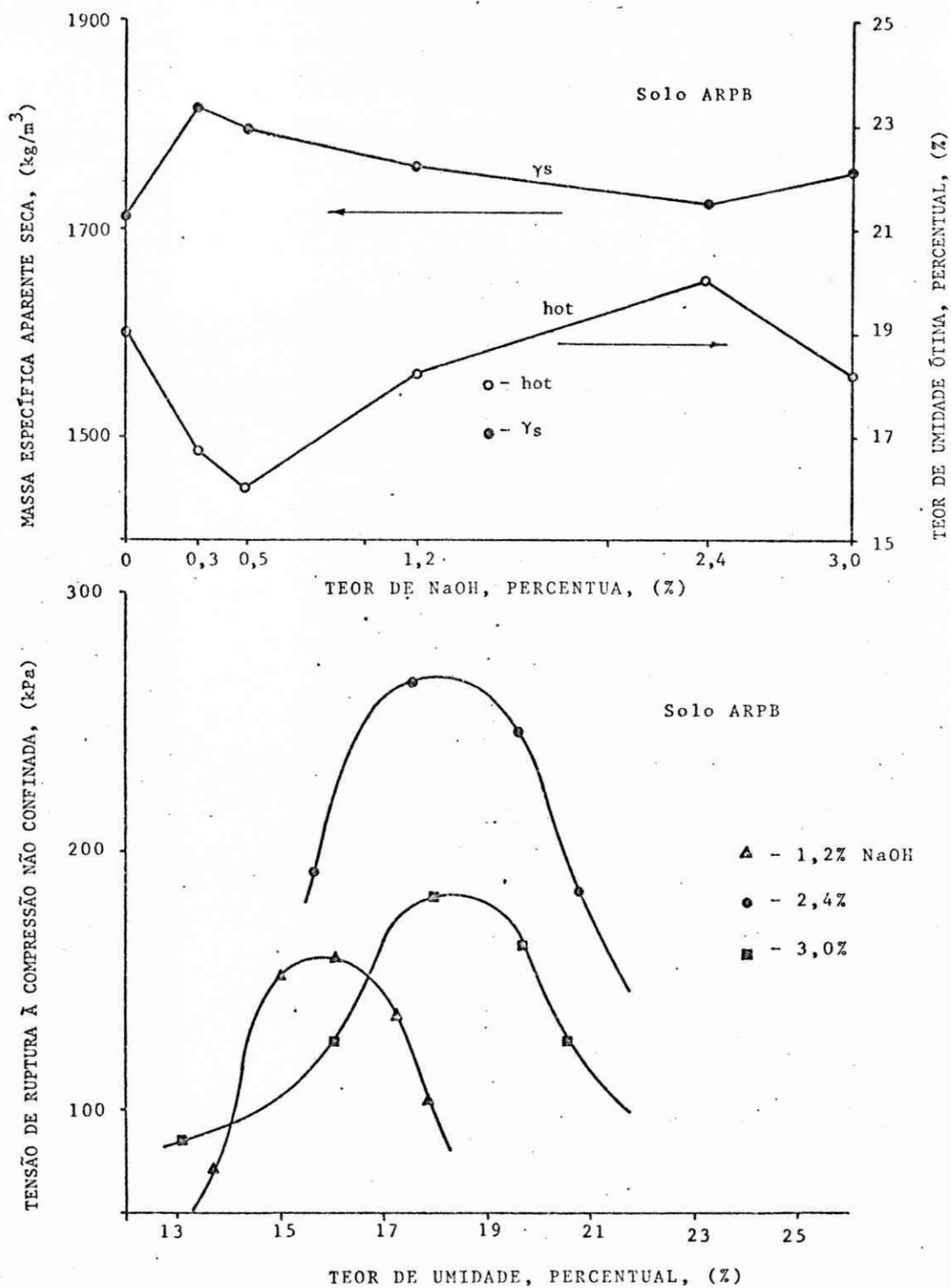


Figura 6.19.2-C.

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaOH

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

para 2,4%) proporcionou uma elevação na tensão de ruptura (RCS) de 68% enquanto um incremento de 150% (de 1,2% para 3,0%) de NaOH elevou este parâmetro em somente 16%, isto é, um aumento de 100% no consumo de aditivo, elevou a tensão de ruptura (RCS) em 68%, ao passo que um aumento de 150% de aditivo resultou em 52% menos na tensão de ruptura máxima obtida. Observa-se também na Figura 6.19.2-C, que o teor de umidade de moldagem na ruptura é em geral menor que o teor de umidade ótima.

Solo de CAPI - Na Figura 6.19.2-D observa-se que a adição de 0,3% e 0,5% de NaOH foram insuficientes para aumentarem a resistência ao amolecimento deste solo pelo efeito da água durante a imersão. Todos os corpos de prova moldados com estes teores de NaOH desagregaram completamente durante a imersão. No entanto, com a adição de 1,2% de NaOH esta característica foi implementada. A adição de 2,4% e 3,0% de NaOH elevaram a tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 270% (de 75 kPa para 278 kPa) e 273% (de 75 kPa para 280 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 100% de aditivo (1,2% para 2,4%) proporcionou uma elevação na tensão de ruptura (RCS) de 270% enquanto um incremento de 150% (1,2% para 3,0%) de NaOH elevou este parâmetro em 273%, isto é, não ocorreu modificação na tensão de ruptura (RCS) a partir da adição de 2,4% de NaOH. Observa-se também na Figura 6.19.2-D que o teor de umidade de moldagem na ruptura é em geral menor que o teor de umidade ótima.

Solo de MOPA - Na Figura 6.20.2-E observa-se que a adição de 0,3% de NaOH foi insuficiente para promover a resistência ao amolecimento pelo efeito da água durante a imersão. Todos os corpos de prova, moldados com este teor de aditivo desagregaram completamente durante a imersão. A adição de 0,5% de NaOH implementou neste solo esta característica. A adição de 1,2%; 2,4% e 3,0% de NaOH promoveram elevações na tensão de

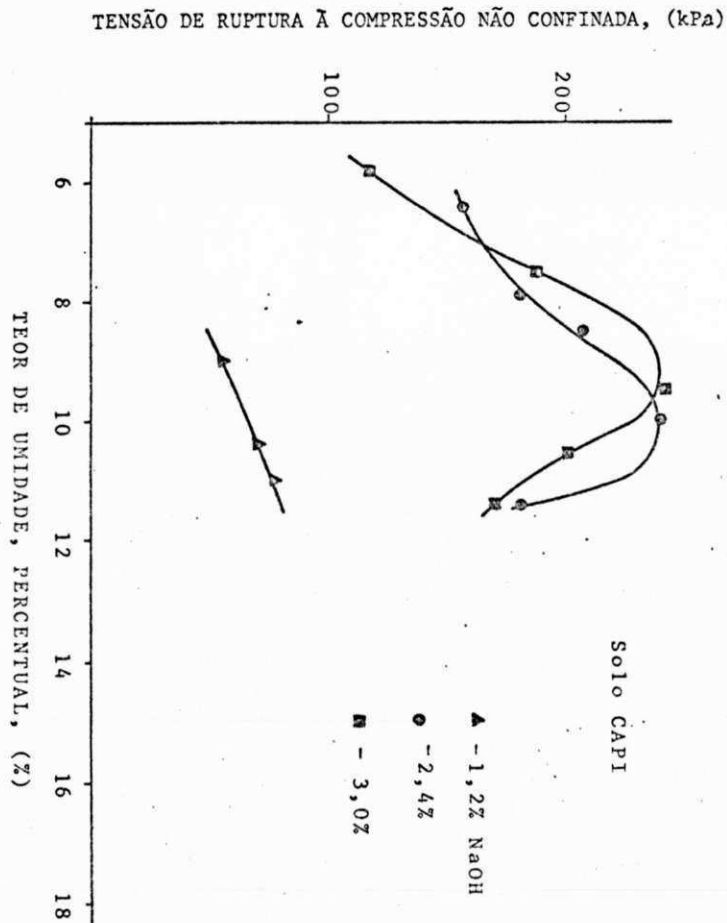
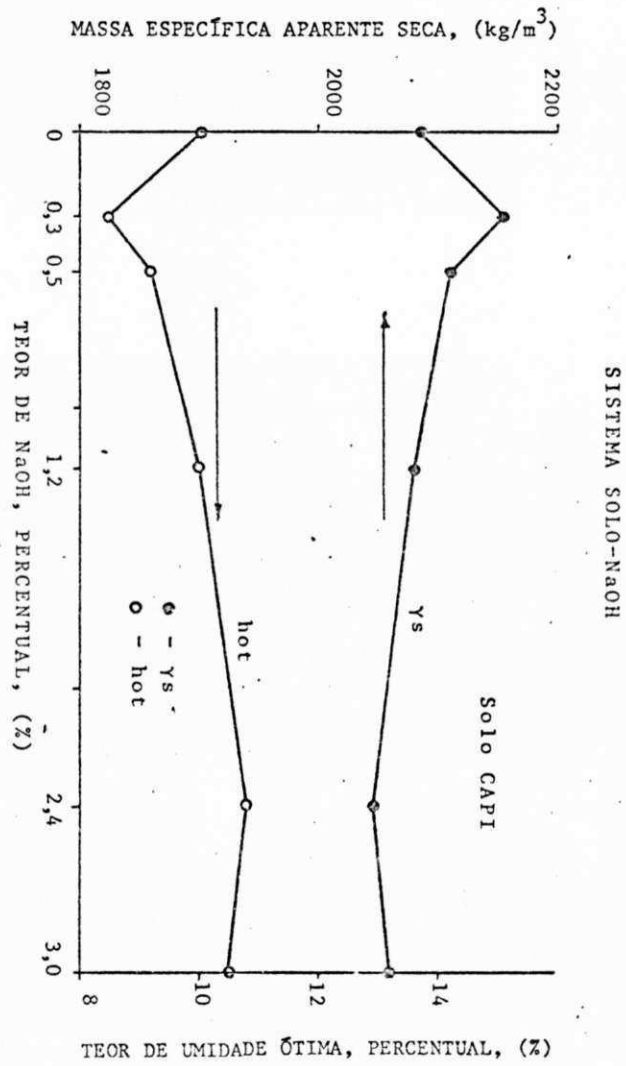


Figura 6.19.2-D

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaOH

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

SISTEMA SOLO-NaOH

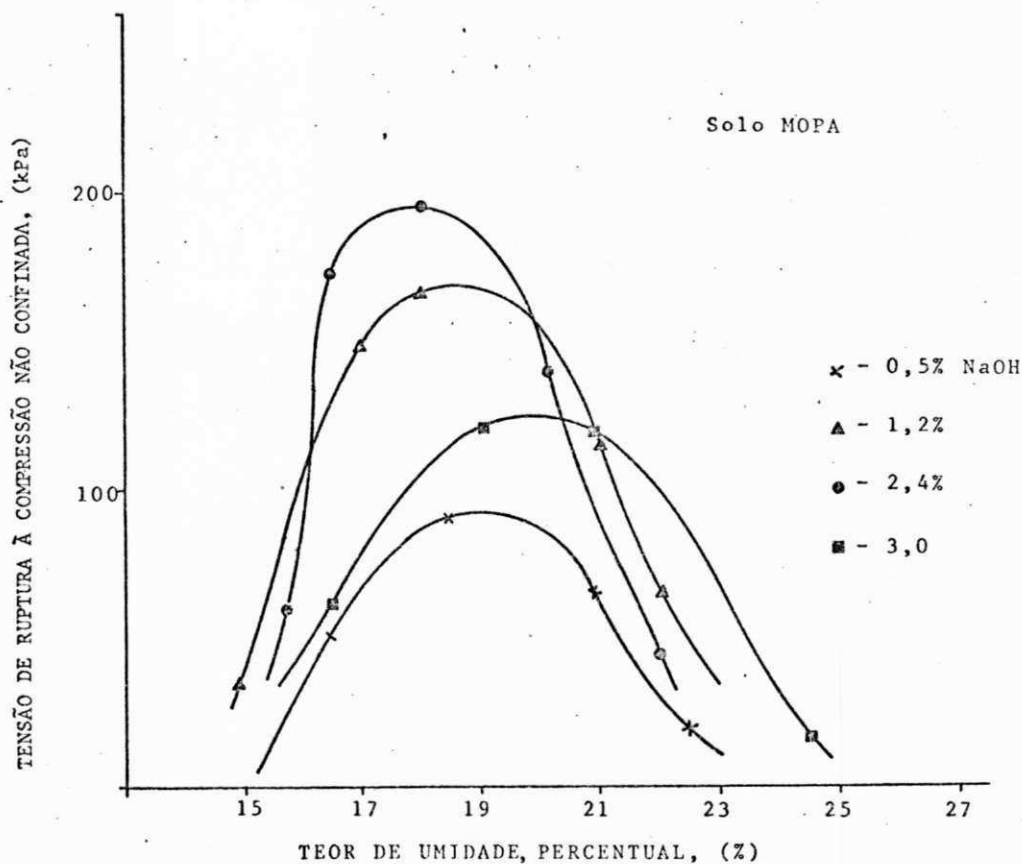
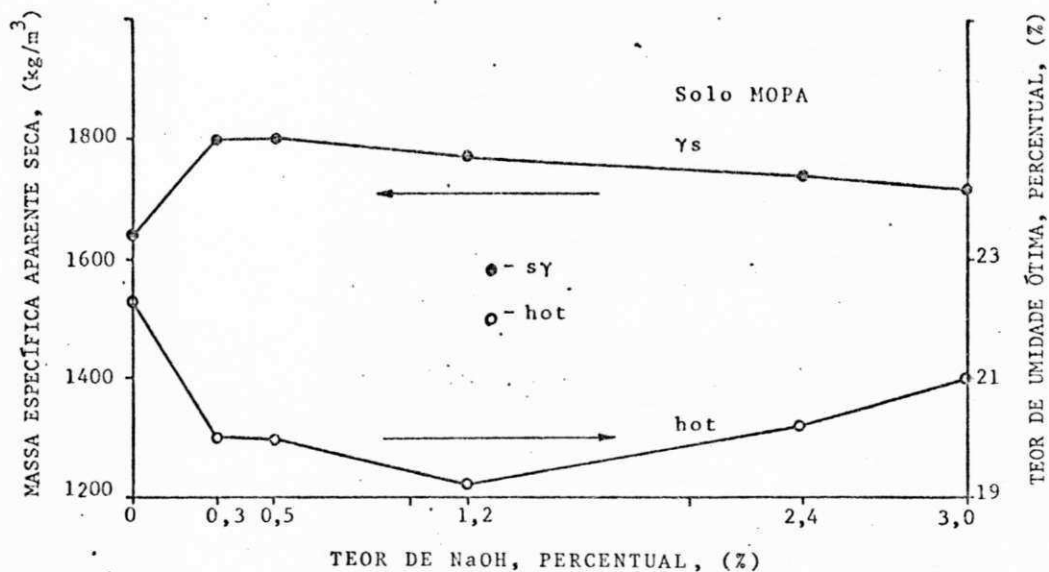


Figura 6.19.2-E

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaOH

Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

ruptura (RCS) respectivamente de: 82% (de 93 kPa para 169 kPa); 101% (de 93 kPa para 187 kPa) e 35% (de 93 kPa para 126 kPa) em relação a adição de 0,5% de NaOH. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 140% (0,5% para 2,4%) proporcionou uma elevação na tensão de ruptura (RCS) de respectivamente 82% e 101%, enquanto um incremento de 500% (0,5% para 3,0%) elevou este parâmetro em somente 35%, isto é, ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura (RCS) com o incremento de NaOH com o máximo em 2,4% a partir daí a elevação foi menos intensa. Observa-se também na Figura 6.19.2-E; que o teor de umidade de moldagem na ruptura é em geral menor que o teor de umidade ótima.

O solo natural não apresentou resistência ao amolecimento pelo efeito da água durante a imersão, por 24 horas, como referido no item 6.19.1 sendo caracterizada a deficiência nesta propriedade pela completa desagregação durante a imersão. No Capítulo I foi assumido o conceito de estabilização de solos citado por Guida (1971), o qual significa atingir uma ou mais propriedades de forma a torná-lo utilizável para fins de engenharia. Assim sendo, a adição de NaOH alterou esta propriedade implementando-a, sendo necessário maior ou menor quantidade de aditivo em função das características intrínsecas de cada solo. Observou-se que para os solos mais plásticos como TEPB e MOPA foi suficiente 0,5% de NaOH (em relação ao peso de solo seco), estes solos são do tipo RH, alta reatividade, conforme a classificação proposta por Queiroz de Carvalho (1979)^(*), por outro lado os solos menos plásticos como CTPB, ARPB e CAPI foi necessária a adição de 1,2% de NaOH para promover o incremento desta propriedade, estes solos podem ser classificados pelo sistema

(*) Este sistema de classificação foi proposto para o solo-cal, tendo se adequado também para o solo-NaOH.

anteriormente citado respectivamente como: RM; RM e RL, onde RM significa média reatividade e RL baixa reatividade.

Verifica-se na Tabela 6.18.2 e Figura 6.19.2-F que o incremento de NaOH, promoveu a elevação da tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) em diferentes níveis e que esta variou em função das características intrínsecas de cada solo. Assim sendo, observou-se como anteriormente descrito, elevações neste parâmetro de: no solo de TEPB até 46%; no de CTPB de até 128%, no solo de ARPB de até 68%, no solo de CAPI de até 273% e no solo de MOPA de até 101% em relação a maior tensão de ruptura (RCS) para adições iniciais de NaOH, isto é, 0,5% de NaOH para os solos de TEPB e MOPA; 1,2% de NaOH para os solos de CTPB, ARPB e CAPI. Os solos de CTPB, ARPB e MOPA apresentaram um ponto de máxima tensão de ruptura (RCS) que ocorreu com a adição de 2,4% de NaOH, cujos valores são respectivamente: 160 kPa; 267 kPa e 187 kPa; a partir deste máximo a tensão de ruptura decresceu. Os solos de TEPB e CAPI não apresentaram um ponto de máxima tensão de ruptura (RCS), contudo por questões técnicas^(*) e econômicas não se prosseguiu na adição de teores maiores que 3,0%, os valores máximos obtidos foram respectivamente 230 kPa e 187 kPa. O comportamento da tensão de ruptura (RCS) com o incremento de NaOH, mostrado na Figura 6.19.2-F induz a existência de um teor máximo (provavelmente ótimo) de aditivo. É patente o crescimento não linear da tensão de ruptura (RCS) com o incremento de NaOH. Este comportamento ocorre também na estabilização com cal, conforme citação de Queiroz de Carvalho (1979) e com cimento conforme citação de Sherwood (1969) que atribuiu estas modificações na velocidade de ele

(*) Realizou-se um estudo prévio onde ficou patenteado o rompimento por expansão de corpos de prova com mais de 3,0% de NaOH se imersos sem terem sido curados pelo menos por 20 dias.

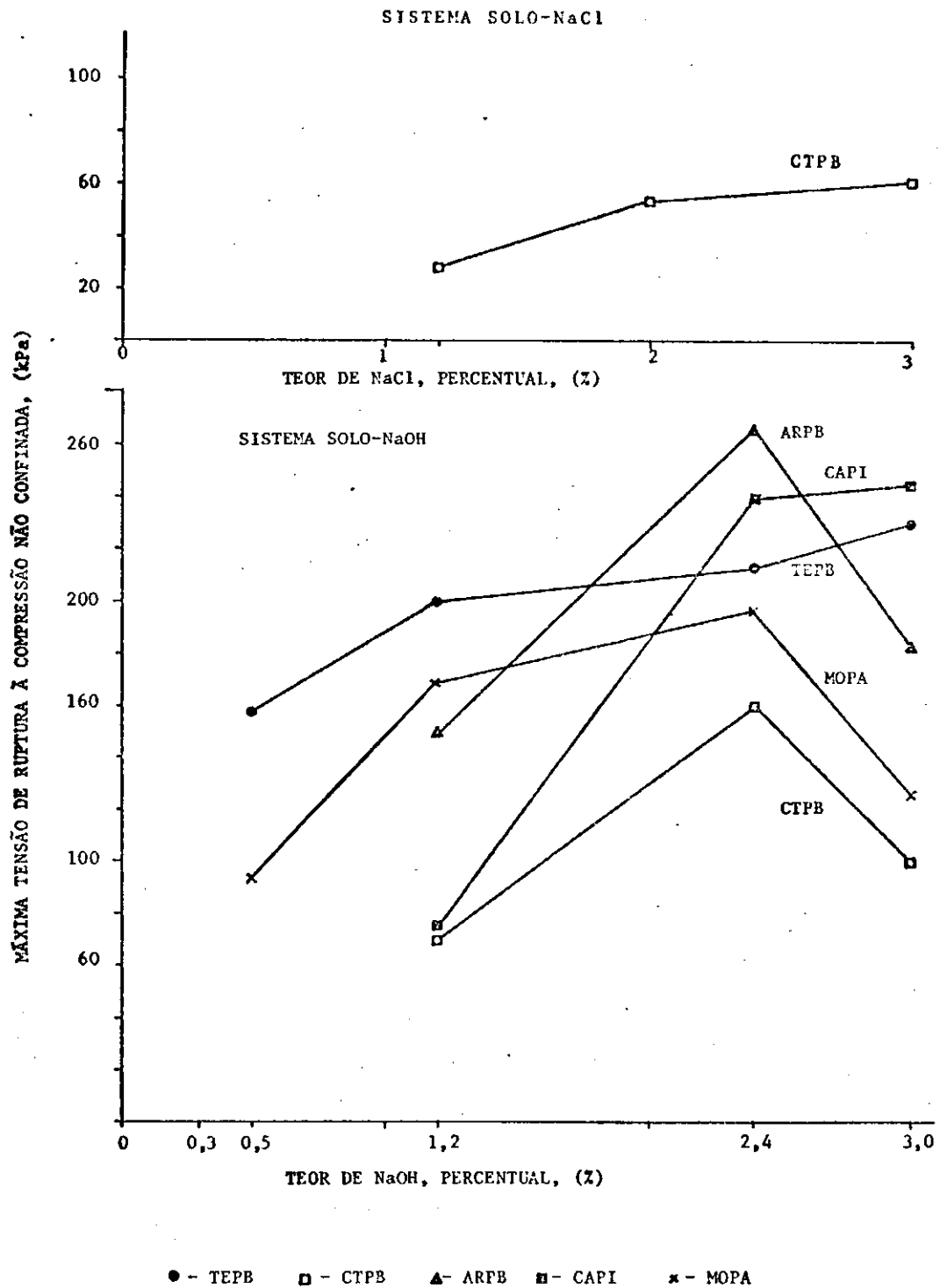


Figura 6.19.2-F - Evolução da Máxima Tensão de Ruptura a Compressão não Confinada com o Incremento de Aditivos

vação e/ou redução da tensão de ruptura (RCS) do solo-cimento, como decorrente da presença de óxidos de ferro e alumínio livres. Assim sendo, pode-se inferir que a adição de NaOH, aos solos estudados, alterou esta propriedade, implementando-a até um teor particular.

O melhoramento das características dos solos estudados em relação a resistência ao amolecimento pelos efeitos da água, durante a imersão, bem como modificações/implemento da tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) é provável que seja em decorrência das modificações físicas e/ou químicas e/ou físico-químicas e/ou química de superfície com, a conseqüente formação de compostos cimentícios. O mecanismo de reação não está ainda completamente determinado, no entanto de acordo com o modelo proposto por Chadda e Uppal (1971), como referido na revisão bibliográfica tem-se: em decorrência de ser a alumina bastante solúvel em solução de NaOH e sendo os solos lateríticos ricos em alumina, esta pode ser, em condições propícias transformada em hidróxido de alumínio. A reação química inicia-se com a reação do NaOH com a alumina, formando-se aluminato de sódio em primeira instância, como o aluminato de sódio é instável vai sendo transformado em hidróxido de alumínio e água. Se a sílica estiver disponível poderá reagir com o NaOH e formar agentes cimentícios adicionais. O hidróxido de alumínio que é gelatinoso e tem efeito cimentante pode, posteriormente, em condições adequadas ir sendo convertido em alumina tri-hidratada que contribuirá numa adicional elevação na tensão de ruptura (RCS) da massa de laterita. É provável que este mecanismo tenha sido o responsável pelas alterações na resistência ao amolecimento pelos efeitos da água e implementação na tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) dos solos lateríticos estudados.

6.19.3 - Solo Tratado com NaCl + Traços de NaOH

A adição de NaCl aos solos, modificou de diferentes formas e em diferentes intensidades a tensão de ruptura (RCS) e outras características. A primeira modificação se fez notar pela não desagregação, durante a imersão, sendo que somente o solo CTPB foi o único a resistir a imersão após tratado com NaCl. A segunda modificação ocorreu na tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) que foi incrementada.

Os resultados da tensão de ruptura (RCS) para os solos após tratamento com NaCl, encontram-se na Figura 6.19.3-A. Estes resultados foram determinados para cinco teores de umidade ao longo da curva de compactação da mistura solo-NaCl. Na Tabela 6.18.3 encontram-se os valores das máximas tensões de ruptura à compressão não confinada (RCS) para os respectivos teores de NaCl e o correspondente teor de umidade de moldagem (ao longo da curva de compactação).

A Figura 6.19.3-A mostra o comportamento da tensão de ruptura (RCS) em função do teor de umidade de moldagem para as diversas porcentagens de NaCl adicionadas, pois tendo sido utilizada a mesma energia de compactação, o teor de umidade de moldagens influencia diretamente a tensão de ruptura. Esta Figura (6.19.3-A) mostra também o comportamento da máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade ótima para cada teor de NaCl adicionado. A evolução da máxima tensão de ruptura (RCS) em função do teor de NaCl está mostrada na Figura 6.19.2-F, os valores foram obtidos das curvas tensão de ruptura (RCS) em função do teor de umidade de moldagem.

Solos de TEPB, ARPB, CAPI e MOPA a adição de 1,2%; 2,0% e 3,0% de NaCl se mostrou ineficiente em promover a implementação da resistência ao amolecimento destes solos, pelo efeito da água durante a imersão. Esta ineficiência foi caracterizada pela desagregação dos corpos de prova da mis

tura solo-NaCl durante a imersão em virtude do sistema solo-NaCl (no caso destes solos) não resistirem imersão por 24h. Por este motivo não foi possível mensurar a tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) destes solos quando tratados com NaCl.

Solo de CTPB - Na Figura 6.19.3-A observa-se que a adição de 1,2% de NaCl, conferiu a este solo resistência ao amolecimento, pelo efeito da água, caracterizada pela não desagregação dos corpos de prova durante a imersão. A adição de 2,0% e 3,0% de NaCl promoveram elevações na tensão de ruptura (RCS) respectivamente de: 92% (de 28 kPa para 54 kPa) e 121% (de 28 kPa para 62 kPa) em relação a adição de 1,2% de NaCl. Podendo-se inferir deste aspecto que o incremento de 67% (de 1,2% para 2,0%) de NaCl, promoveu uma elevação na tensão de ruptura (RCS) de 92%, enquanto um incremento de 150% de aditivo promoveu uma elevação de 121% neste parâmetro, isto é, um incremento no consumo de aditivo de 120%, contribuiu com um incremento na tensão de ruptura (RCS) de somente 30%. Observa-se também na Figura 6.19.3-A e Tabela 6.19.3 que a máxima tensão de ruptura (RCS), para a adição de 2,4% e 3,0% de NaCl ocorreu a teores de umidade de moldagem em geral inferiores ao teor de umidade ótima do respectivo sistema.

O comportamento exibido por este solo no concerne principalmente à tensão de ruptura (RCS) é bastante coerente com estudos realizados em regiões de clima temperado e/ou frio, relatados por: McLeland (1964); Ogawa et alii (1963); Souborn e Vader (1956); Zolkov (1962) e Thornburn e Mura (1963) cujo efeito da adição de NaCl a solos pode implementar a tensão de ruptura (RCS) não obstante sua principal finalidade, naquelas regiões seja para: densificação da mistura; redução do pó e redução de "frost heave" entre outros. O mecanismo pelo qual o NaCl confere o incremento da tensão de ruptura não está completamente determinado, no entanto,

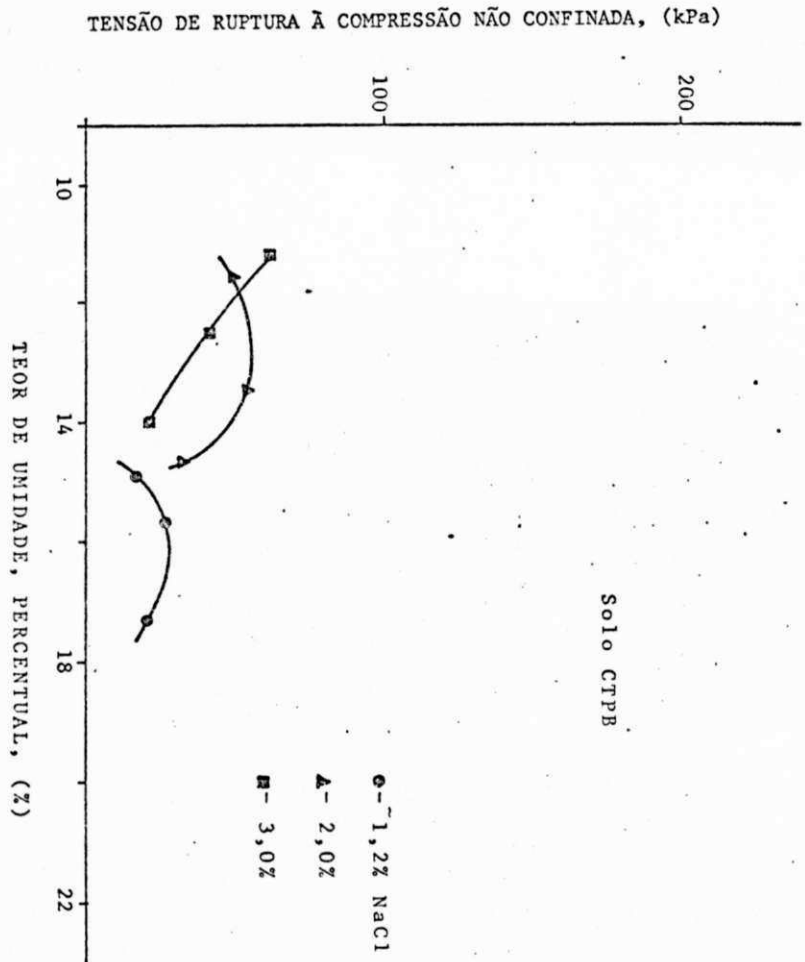
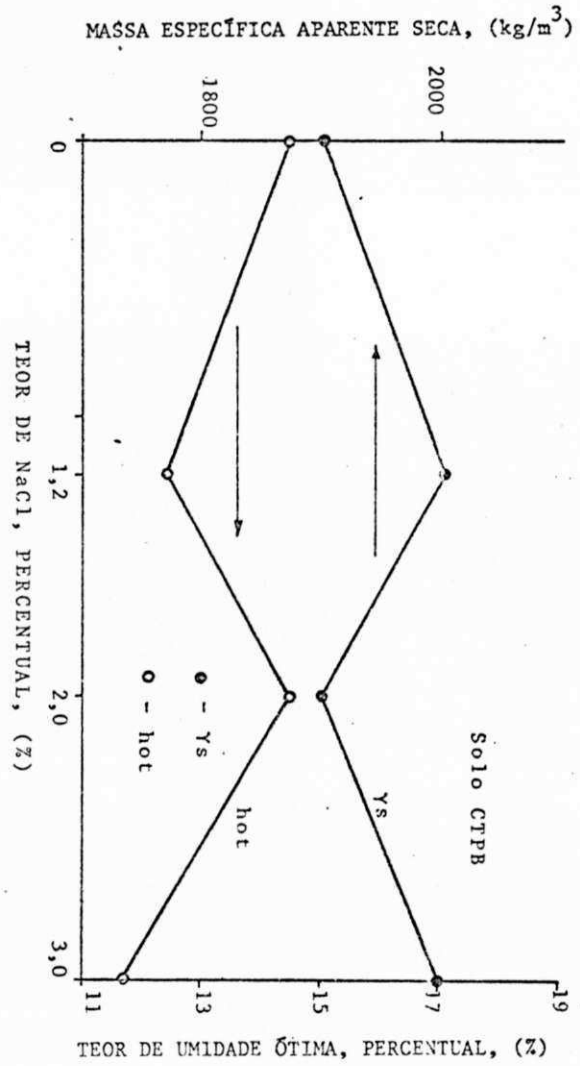


Figura 6.19.3-A

Superior - Evolução da Massa Específica Aparente Seca e Teor de Umidade Ótima com o Incremento de NaCl
 Inferior - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada Versus Teor de Umidade de Moldagem

diversos pesquisadores estão de acordo de que as condições de estudo no laboratório não reconstituem às de campo principalmente no concernente a: temperatura e cura; ciclo de secagem moldagem (variação de umidade); combinação destes dois fatores; variações sazonais; pressão provocada pela ação do tráfego entre outros. Não obstante o NaCl venha sendo usado com sucesso por muitos anos naquelas regiões como aditivo para camadas de pavimentos, a previsão do comportamento das misturas solo-NaCl no campo é difícil e as vezes contraditório com os resultados de laboratório conforme citação de Thornburn e Mura (1968), Wood (1968) e Mainfort (1968), entre outros.

Wood (1968), objetivando explicar as causas que influenciaram o sucesso de estabilizações de estradas em várias partes dos Estados Unidos, retirou amostras de trechos dessas estradas, cujos materiais eram escória de alto forno juntamente com aglomerados de galena e calcáreo, verificou que ocorreu o implemento da massa específica aparente deste material com NaCl em relação ao material não tratado. Observou também; que todo sal original (colocado como agregado gráudo) estava dissimulado que havia fissuras possivelmente indicando áreas cimentadas; que ocorreu redução nos bordos das partículas de calcáreo indicando que este material foi atacado e reagiu com a mistura verificando-se a presença de ligações entre o calcáreo e sílica, bem como ataque aos bordos das partículas de argila.

Gow, Davidson e Sheeler (1961) mencionaram um possível meio de cimentação de uma mistura (em virtude da solubilidade) de calcáreo e dolomita em soluções de cloretos, resultando na precipitação de carbonatos cimentícios. Este tipo de cimentação foi também, segundo McLeland (1964), responsável pelos altos valores de resistência à compressão de misturas de cascalhos de calcário com NaCl. Sem um total conhecimento do mecanismo de cimentação e em que condições (do solo) ela ocorreu. O efeito do NaCl como estabilizante (in

crementados da resistência (RCS)) é difícil de predizer.

Tomando-se por base esta linha de raciocínio, onde o calcáreo pode reagir com o NaCl e formar carbonatos cimentantes, bem como a identificação mineralógica por raios-X do solo de CTPB onde foi identificada a presença de calcário. Pode-se então inferir deste aspecto que a resistência ao amolecimento pelo efeito da água durante a imersão, bem como a implementação da tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) do solo de CTPB após tratado com NaCl estão em acordância com os resultados obtidos por outros pesquisadores, como anteriormente referido. Sendo a reação entre o NaCl e o calcáreo o provável responsável por este comportamento neste solo.

6.19.4 - Solo Tratado com Cal + Traços de NaOH

A adição de cal + traços de NaOH aos solos, modificou de diferentes formas e em diferentes intensidades a tensão de ruptura (RCS) e outras características. A primeira modificação se fez notar pela não desagregação durante a imersão. Neste caso esta característica foi conferida pela cal, adicionada em teores iguais ou maiores que 4% e como visto no item 6.19.1 este teor de cal foi suficiente para implementar resistência ao amolecimento pelo efeito da água durante a imersão. Os teores do cal foram escolhidos em função de: limite econômico em torno dos 7%, solo de TEPB; tendência a um ponto de máximo, solos de CTPB e ARPB e pequena diferença na implementação da tensão de ruptura para a adição de 4% e 7% de cal sendo selecionado o mais econômico, solos de CAPI e MOPA. Estas tendências podem ser verificadas na Figura 6.19.1-F.

Os resultados da tensão de ruptura (RCS) para os solos tratado com cal + traços de NaOH encontram-se na Tabela 6.19.4, estes valores obtidos de corpos de prova moldados na umidade ótima do respectivo teor de cal (com uma tolerância

SISTEMA CAL + TRAÇOS DE NaOH

	TEPB	CTPB	ARPB	CAPI	MOPA
γs	1687	1900	1710	2085	1617
hot	19,0	14,5	18,8	10,0	22,9
% DE CAL	7	7	4	4	4
γs	1585	1805	1605	2000	1610
hot	21,0	15,8	20,0	11,7	24,5
RCS (28 dias)	575	278	256	148	370
% DE NaOH	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
γs	1685	1885	1815	2155	1700
hot	19,6	13,0	16,7	8,5	20,0
RCS (28 dias)	NRI	NRI	NRI	NRI	NRI
% DE NaOH	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
γs	1687	1915	1760	2080	1620
hot	18,5	13,3	18,2	10,0	19,2
RCS (28 dias)	200	70	159	75	169
% DE CAL	7	7	4	4	4
+	+	+	+	+	+
% DE NaOH	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
γs	1697	1733	1607	2032	1587
hot	20,1	15,5	17,2	11,4	24,0
RCS: (7 dias)	601	362	309	384	227
(28 dias)	1237	375	429	443	484
(90 dias)	1668	493	493	496	723
% DE CAL	7	7	4	4	4
+	+	+	+	+	+
% DE NaOH	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
γs	1687	1850	1646	2042	1632
hot	18,5	15,9	18,4	11,2	22,7
RCS: (7 dias)	1109	138	183	222	338
(28 dias)	1315	202	361	325	549
(90 dias)	1729	281	481	435	688

γs = massa específica aparente seca, (kg/m³)

hot = teor de umidade ótima, (%)

RCS = tensão de ruptura à compressão não confinada, (kPa)

(X dias) = tempo de cura

Tabela 6.19.4 - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada (kPa) Massa Específica Aparente Seca (kg/m³) e Teor de Umidade de Moldagem (%).

para mais ou para menos de 10%) apresenta-se também os valores das respectivas massas específicas aparentes seca para o sistema solo-cal, solo-NaOH e correspondentes umidades ótimas. Como pode ser verificado a adição de NaOH caracterizou-se pela elevação da tensão de ruptura (RCS) do sistema cal + traços de NaOH em relação ao sistema solo-cal e solo-NaOH.

Solo de TEPB - Este solo foi tratado com 7% de cal e 0,3% e 1,2% de NaOH, sendo os corpos de prova moldados na umidade ótima do solo-cal e por conseguinte exibiu para o sistema solo-cal + traços de NaOH, massa específica aparente seca de 1697 kg/m^3 para 0,3% de NaOH e 1687 kg/m^3 para 1,2% de NaOH. Estes valores estão na faixa da massa específica do sistema solo-cal e do sistema solo-NaOH. (com uma tolerância de 10% para mais ou para menos). A adição de 7% de cal e 0,3% de NaOH a este solo, tendeu a implementar após 7 dias de cura a tensão de ruptura (RCS) em 4,5% (de 575 kPa para 601 kPa) em relação ao solo-cal. Em relação ao solo-NaOH este valor passou de 0 kPa (não resistência a imersão) para 601 kPa. Para 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal, ocorreu uma implementação de 93% (de 575 kPa para 1109 kPa) em relação ao solo-cal e em 455% (de 200 kPa para 1109 kPa) em relação ao solo-NaOH (1,2% de aditivo), para os sistemas solo-cal e solo-NaOH curados a 28 dias. Podendo-se inferir deste aspecto que a adição de traços de NaOH acelerou a cura do solo-cal. Após 28 dias de cura a adição de 0,3%, 1,2% de NaOH implementou a tensão de ruptura (RCS): em relação ao solo-cal (7%) em 115% (de 575 kPa para 1237 kPa); em relação ao solo-NaOH (0,3%) de 0 kPa (a não resistência a imersão) para 1237 kPa; em relação ao solo-NaOH (1,2%) em 558% (de 200 kPa para 1315 kPa). Após 90 dias de cura houve como esperado uma implementação da tensão de ruptura (RCS) em relação à exibida pelo sistema solo-cal + traços de NaOH aos 28 dias de cura ocorrendo elevação com a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH de respectivamente 35% (de 1237kPa para 1668kPa) e 32% (de 1315 kPa para 1729 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que rea

ções a longo tempo (90 dias) com formação de agentes cimentantes ocorreram não obstante a presença do catalizador (NaOH).

Soló de CTPB - Este solo foi tratado com 7% de cal mais 0,3% e 1,2% de NaOH, sendo os corpos de prova moldados na umidade ótima do solo-cal (7%), exibindo o sistema solo-cal + traços de NaOH valores de massa específica aparente seca para a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH de respectivamente 1733 kg/m^3 e 1850 kg/m^3 . Estes valores estão na faixa dos resultados obtidos para o sistema solo-cal e solo-NaOH com uma tolerância de 10% para mais ou para menos daqueles valores. A adição de 7% de cal mais 0,3% de NaOH implementou, após 7 dias de cura, a tensão de ruptura (RCS) em 30% (de 278 kPa para 262 kPa) em relação ao solo-cal (7%) e de 0 kPa (a não resistência a imersão) para 362 kPa em relação ao solo-NaOH (0,3%). Para 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal ocorreu uma redução em relação ao solo-cal (7%) de 48% (de 270 kPa para 138 kPa) e uma elevação de 97% (de 70 kPa para 138 kPa) em relação ao solo-NaOH (1,2%). Ressalta-se que o solo-cal e solo-NaOH foram curados a 28 dias. Podendo-se inferir deste aspecto que 0,3% de NaOH acelerou o tempo de cura do solo-cal que exibiu implementação na tensão de ruptura (RCS) após 7 dias de cura comparados aos aditivos e NaOH. Após 28 dias de cura a adição de 7% de cal 0,3% de NaOH implementou a tensão de ruptura (RCS): em relação ao solo-cal (7%) em 35% (de 278 kPa para 375 kPa); em relação ao solo-NaOH (0,3%) de 0 kPa (não resistência a imersão) para 375 kPa. Para 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal ocorreu uma redução na tensão de ruptura (RCS) em relação ao solo-cal (7%) de 27% (de 278 kPa para 202 kPa) e uma implementação de 189% (de 70 kPa para 202 kPa) em relação ao solo-NaOH. Podendo-se inferir deste aspecto que a adição de 0,3% de NaOH acelerou a reação do solo-cal enquanto a adição de 1,2% de NaOH retardou esta reação. Após 90 dias de cura houve como esperado uma implementação da ten

são de ruptura (RCS) em relação à exibida pelo sistema solo-cal + traços de NaOH aos 28 dias de cura ocorrendo elevação com adição de 0,3% e 1,2% de NaOH de respectivamente 31% (de 375 kPa para 493 kPa) e 39% (de 202 kPa para 281 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que reações a longo tempo (90 dias) com formação de agentes cimentantes ocorram não obstante a presença do catalizador (NaOH).

Solo de ARPB - Este solo foi tratado com 4% de cal mais 0,3% e 1,2% de NaOH, sendo os corpos de prova moldados na umidade ótima do solo-cal (4%), exibindo o sistema cal + traços de NaOH, valores de massa específica aparente seca para a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH de respectivamente 1607 kg/m^3 e 1646 kg/m^3 . Estes valores estão na faixa dos resultados obtidos para os sistemas solo-cal e solo-NaOH com um afastamento de 1,2% para mais ou para menos daqueles valores. A adição de 4% de cal mais 0,3% de NaOH implementou após 7 dias de cura a tensão de ruptura (RCS) em 21% (de 256 kPa para 309 kPa) em relação ao solo-cal (7%) e de 0 kPa (a não resistência a imersão) para 309 kPa em relação ao solo-NaOH (0,3%). Para 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal, ocorreu uma redução em relação ao solo-cal (4%) de 29% (de 256 kPa para 183 kPa) e implementação de 15% (de 159 kPa para 183 kPa). Ressalta-se que o solo-cal e solo-NaOH foram curados por 28 dias. Podendo-se inferir deste aspecto que a adição de 0,3% de NaOH acelerou o tempo de cura do solo-cal, que exibiu implementação na tensão de ruptura (RCS) após 7 dias de cura comparados aos solo-cal e solo-NaOH isoladamente e curados por 28 dias, o que não ocorreu com a adição de 1,2% de NaOH. Após 28 dias de cura a adição de 7% de cal mais 0,3% de NaOH implementou a tensão de ruptura (RCS) em relação ao solo-cal (7%) em 68% (de 256 kPa para 429 kPa); em relação ao solo-NaOH (0,3%) de 0 kPa (a não resistência à imersão) para 429 kPa. Para a adição de 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal, ocorreu uma implementação em relação ao solo-cal (4%) de 41% (de 256 kPa para

361 kPa); em relação ao solo-NaOH de 127% (159 kPa para 361 kPa). Ressalta-se que todos os sistemas foram curados durante 28 dias, podendo-se inferir deste aspecto que a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH aceleram o tempo de cura do solo-cal sendo que 0,3% foi mais eficaz que 1,2% de NaOH. Após 90 dias de cura houve como esperado uma implementação da tensão de ruptura (RCS) em relação a exibida pelo sistema solo-cal + traços de NaOH aos 28 dias de cura, ocorrendo com a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH elevação neste parâmetro de respectivamente 15% (de 429 kPa para 493 kPa) e 33% (de 361 kPa para 481 kPa): Podendo-se inferir deste aspecto que as reações ao longo do tempo (90 dias) com formação de agentes cimentantes ocorrem não obstante a presença do catalizador (NaOH).

Solo de CAPI - Este solo foi tratado com 4% de cal mais 0,3% e 1,2% de NaOH, sendo os corpos de prova moldados na umidade ótima do solo-cal (4%), exibindo o sistema solo-cal + traços de NaOH, valores de massa específica aparente seca para a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH respectivamente de 2032 kg/m³ e 2042 kg/m². Estes valores estão na faixa dos resultados obtidos para os sistemas solo-cal e solo-NaOH com um afastamento de 10% para mais ou para menos daqueles valores. A adição de 4% de cal mais 0,3% de NaOH após 7 dias de cura, implementou a tensão de ruptura (RCS) em 159% (de 148 kPa para 384 kPa) em relação ao solo-cal (4%) e de 0 kPa (a não resistência à imersão) para 384 kPa em relação ao solo-NaOH (0,3%). Para a adição de 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal, ocorreu também um incremento na tensão de ruptura (RCS) de 0% (de 148 kPa para 222 kPa) em relação ao solo cal (4%) e de 50% (de 75kPa para 222 kPa) em relação ao solo NaOH (1,2%), ressaltando-se que o solo-cal e solo-NaOH foram curados por 28 dias. Pode-se inferir deste aspecto, que a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH acelerou o tempo de cura do solo-cal que exibiu implementação na tensão de ruptura (RCS) após 7 dias de cura, comparado aos solo-cal e solo-NaOH, isoladamente e curados por

28 dias. Após 28 dias de cura a adição de 4% de cal mais 0,3% de NaOH implementou a tensão de ruptura (RCS) em relação ao solo-cal (4%) em 199% (de kPa para 443 kPa) e em relação ao solo-NaOH (0,3%) de 0 kPa (a não resistência à imersão) para 443 kPa. Para a adição de 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal ocorreu uma implementação em relação ao solo-cal (4%) de 120% (de 148 kPa para 325 kPa) e em relação ao solo-NaOH (1,2%) de 333% (de 75 kPa para 325 kPa). Ressalta-se que todos os sistemas foram curados por 28 dias, podendo-se inferir deste aspecto, que a adição de 0,2% e 1,2% de NaOH aceleraram o tempo de cura do solo-cal (4%) sendo que 0,3% de NaOH foi mais eficaz que 1,2%. Após 90 dias de cura houve como esperado uma implementação na tensão de ruptura (RCS) em relação a exibida pelo sistema solo-cal + traços de NaOH aos 28 dias de cura, ocorrendo, com a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH, elevação neste parâmetro de respectivamente 12% (de 443 kPa para 496 kPa) e 34% (de 325 kPa para 435 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que reações a longo tempo (90 dias) com formação de agentes cimentantes ocorreram não obstante a presença do catalizador (NaOH).

Solo de MOPA - Este solo foi tratado com 4% de cal mais 0,3% e 1,2% de NaOH, sendo os corpos de prova moldados na umidade ótima do solo-cal (4%), exibindo o sistema solo-cal + traços de NaOH, valores de massa específica aparente seca para a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH respectivamente de 1587 kg/m^3 e 1632 kg/m^3 . Estes valores estão na faixa dos valores obtidos para os sistemas solo-cal e solo-NaOH (com uma tolerância de 10% para mais ou para menos daqueles valores). A adição de 4% de cal mais 0,3% de NaOH, após 7 dias de cura reduziu a tensão de ruptura (RCS) em 39% (de 370 kPa para 227 kPa) em relação ao solo-cal (4%), implementando de 0 kPa (a não resistência à imersão) para 227 kPa. Para a adição de 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal, ocorreu também uma redução na tensão de ruptura (RCS) de 9% (de 370 kPa para

338 kPa) em relação ao solo-cal (4%) e implementação de 100% (de 169 kPa para 338 kPa) em relação ao solo-NaOH (1,2%). Ressalta-se que o solo-cal e solo-NaOH foram curados por 28 dias enquanto o solo-cal + traços de NaOH foi curado por 7 dias, podendo-se inferir deste aspecto que a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH foi insuficiente para promover a aceleração do tempo de cura em proporção que acelerasse em 7 dias de cura, a tensão de ruptura (RCS) do solo cal + traços de NaOH de forma que esta se igualasse ou suplantasse a tensão de ruptura (RCS) do solo-cal curado por 28 dias. Após 28 dias de cura a adição de 4% de cal mais 0,3% de NaOH implementou a tensão de ruptura (RCS) em relação ao solo-cal (4%) em 31% (de 370 kPa para 484 kPa) e em relação ao solo-NaOH de 0 kPa (a não resistência à imersão) para 484 kPa. Para a adição de 1,2% de NaOH e mesmo teor de cal ocorreu uma implementação de 48% (de 370 kPa para 549 kPa) e em relação ao solo-cal (4%) e em relação ao solo-NaOH (1,2%) de 69% (de 169 kPa para 549 kPa). Ressalta-se que todos os sistemas foram curados por 28 dias, podendo-se inferir deste aspecto, que a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH aceleraram o tempo de cura do solo-cal (4%) sendo que 1,2% de NaOH foi mais eficaz que 0,3%, no entanto o consumo de NaOH aumentou em 400% (0,3% para 1,2%), enquanto a implementação da tensão de ruptura (RCS) foi de somente 55% (de 31% para 48%). Após 90 dias de cura houve como esperado uma implementação na tensão de ruptura (RCS) em relação a exibida pelo sistema solo-cal+traços de NaOH aos 28 dias de cura, ocorrendo a adição de 0,3% e 1,2% de NaOH elevação neste parâmetro de respectivamente 49% (de 484 kPa para 723 kPa) e 25% (de 549 kPa para 688 kPa). Podendo-se inferir deste aspecto que as reações a longo tempo (90 dias) com formação de agentes cimentantes ocorreram não obstante a presença do catalizador (NaOH).

A comparação da tensão de ruptura (RCS) do sistema solo-cal + traços de NaOH com o respectivo solo-cal, para os iniciais 7 dias de cura, não tem uma conotação quantita

tiva, porém, qualitativa, na medida que se com apenas 7 dias de tempo de cura foi possível obter-se valores de tensão de ruptura (RCS) do solo cal + traços de NaOH maiores ou iguais ao do solo-cal curado por 28 dias fica patenteada a ação catalizadora do traço de NaOH. Quando porém estes valores são inferiores ao do solo-cal, possibilita uma avaliação qualitativa de que a quantidade de aditivo foi insuficiente ou excessiva, ou não é possível acelerar tanto, o tempo de cura para aquele solo com teores de aditivos utilizados.

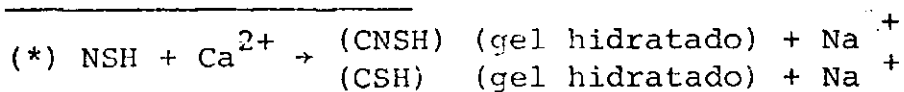
A tensão de ruptura (RCS) para o sistema solo-NaOH, com 0,3% deste aditivo foi assumida igual a 0 kPa em decorrência de não ter sido possível executar o ensaio de compressão não confinada, pois os corpos de prova moldados com este teor de aditivo, exibiram resistência ao amolecimento ao efeito da água, desagregando completamente durante a imersão, como anteriormente referido.

O comportamento dos solos tratados com cal mais NaOH, após 28 dias de cura caracterizou-se pela elevação da tensão de ruptura (RCS) sempre para adição de 0,3% e 1,2% de NaOH, excetuando-se o solo de CTPB para 1,2% de NaOH que reduziu este parâmetro. Observou-se também que a adição de 0,3% de NaOH confere ao sistema maior implementação na tensão de ruptura (RCS) do que 1,2% de NaOH.

O mecanismo pelo qual o sódio acelera o tempo de cura do solo-cal não está completamente determinado, no entanto explicações são disponíveis principalmente as apresentadas por Moh (1962) e Ladd (1960). A adição de NaOH pode aumentar a reação do solo-cal por produzir grande quantidade de sílica, solubilizá-la através da reação: $(2 \text{ NaOH} + \text{ SiO}_2 = \text{ NSH (solúvel)} + \text{ H}_2\text{O})$ que é decorrente da elevação do pH que acelera o ataque à sílica e alumina do solo com a formação de silicato e/ou aluminato de sódio solúveis que ficam livres e difundem-se nos poros. A elevação do pH facilita também a dissociação da cal $(\text{ Ca(OH)}_2 + \text{ Ca}^{2+} + 2(\text{ OH}^-))$. A eventual neutralização do álcali (NaOH) livre, pela reação com o solo re

duz o pH, que permite aos íons cálcio dissociado da cal reagirem com o silicato e/ou aluminato de sódio uniformemente distribuídos nos poros, formando silicato de cálcio hidratado (NSH) (*) e/ou aluminato de cálcio hidratado (AH). Dessa forma o NaOH aumentou o grau de participação do solo na formação do material cimentício, como também aumentou o volume e melhorou a distribuição de material cimentício formado em redor das partículas do solo. O desenvolvimento de resistência (elevação da tensão de ruptura (RCS)) é decorrente desta maior quantidade de produtos cimentantes que: agregam o solo e aumentam tamanho aparente das partículas e este efeito aumenta o ângulo de atrito interno; formam uma matriz com o solo que endurecendo aumenta a tensão de ruptura (RCS) pois esta matriz aumenta a coesão do solo.

Os dados apresentados estão em acordância com o modelo teórico apresentado, assim é que a adição de 0,3% de NaOH elevou a tensão de ruptura (RCS) da seguinte forma em relação ao solo-cal para 28 dias de cura: solo de TEPB de 575 kPa para 1237 kPa; solo de CTPB de 278 kPa para 375 kPa; solo de ARPB de 256 kPa para 429 kPa; solo de CAPI de 148 kPa para 443 kPa e solo de MOPA de 370 kPa para 484 kPa. Verifica-se que ocorreu uma melhor formação de material cimentício. Quanto a adição de 1,2% de NaOH o comportamento da tensão de ruptura (RCS) do sistema solo-cal, em relação ao solo-cal + traços de NaOH para 28 dias de cura foi o seguinte: solo de TEPB de 575 kPa para 1315 kPa; solo de CTPB de 278 kPa para 202 kPa; solo de ARPB de 256 kPa para 361 kPa; solo de CAPI de 148 kPa para 325 kPa e solo de MOPA de 370 kPa para 549 kPa. Verifica-se que a elevação da quantidade de NaOH em alguns casos dificultou a redução do pH do sistema



após solubilizar a sílica e alumina, pela não neutralização dos álcalis livres agora em maior quantidade, reduzindo a formação de material cimentante CSH e CAH. (C = CaO; S = SiO₂; Al₂O₃; N = Na₂O). Observa-se também que o incremento da tensão de ruptura (RCS) quando da adição de 0,3% de NaOH foi superior ao incremento quando da adição de 1,2% de NaOH, provavelmente em função deste mesmo efeito, isto é a não adequação do pH do sistema para a formação de maior quantidade de material cimentante. Uma outra importante reação que pode ocorrer no sistema é a reação da cal com os amorfos que possuem uma pequena mais importante quantidade de sílica e alumina, que são altamente reativas, conforme relato de Moh (1962), sobre a superfície das partículas. As partículas finas do solo, geralmente possuem grande proporção de amorfos de sílica e alumina que em presença de álcalis fortes causam um eficaz efeito de tampão nas reações.

Em resumo pode-se observar que:

- a. a tensão de ruptura a compressão não confinada (RCS) do sistema solo-cal foi superior a do solo natural (que foi mensurada em condições menos severa (ver Apêndice I);
- b. o sistema solo-cal apresentou incrementos na tensão de ruptura à compressão não confinada mais elevados (que os dos sistemas solo-NaOH e solo-NaCl);
- c. o sistema solo-cal + traços de NaOH apresentou valores de tensão de ruptura à compressão não confinada mais elevados que os do sistemas solo cal, solo-NaOH e solo-NaCl;
- d. a adição de traços de NaOH ao sistema solo-cal acelerou o tempo de cura deste sistema;

- e. a adição de caie NaOH, em diferentes proporções aos solos, implementou de diferentes formas a resistência a imersão destes ;
- d. a adição de NaCl, em diferentes proporções, em geral foi ineficiente em implementar a resistência a imersão, (excetuando o solo CTPB, os corpos de prova dos demais solos tratados com NaCl de sagregaram-se completamente durante a imersão por 24 horas).

CAPÍTULO VII

INTERAÇÃO ESTATÍSTICA

7.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são analisadas as interações existentes entre os diversos parâmetros determinados no decorrer deste trabalho, que influenciam o comportamento dos solos vermelhos tropicais estudados em relação às propriedades caracterizantes, bem como propriedades de engenharia.

7.2 - CONCEITOS

A análise por correlação linear pesquisa a existência de uma relação linear entre duas variáveis. Nesta pesquisa como é usual em estatística utilizou-se o método dos mínimos quadrados, método de Pearson para ajustagem da reta. Juntamente com o coeficiente de correlação (R), são apresentados o nível de significância (S) e o grau de liberdade (GL). O número do grau de liberdade é igual ao número de variáveis (X ou Y) menos o número da relação independente entre elas, no caso específico de regressão linear, o grau de liberdade é igual ao número de pontos menos 2. O nível de significância é o número que representa o nível em que a relação entre duas variáveis é significativa. Em geral é aceitável, pelos métodos estatísticos, considerar os resultados de uma correlação significativa se calculado com uma probabilidade menor que 5% e altamente significativa se a probabilidade calculada é menor que 1%. Neste estudo em virtude do pequeno número de casos estudados (5 solos, somente), limitar-se-á a análise das correlações lineares com significância (S) menor que 1% (probabilidade de dispersão na variação do coeficiente de

correlação (R)), utilizando-se o teste bilateral ou bicaudal.

Estas correlações obtidas foram analisadas procurando-se eliminar as correlações resultantes de outras interdependências, de tal maneira a se obter interrelações que possam dar uma noção do comportamento de certas propriedades a partir da determinação parcial de alguns parâmetros preferencialmente os de mais simples mensuração em laboratório.

Os resultados das regressões lineares simples em termos do coeficiente de correlação simples (R), nível de significância (S) e grau de liberdade (GL) são mostrados nas Tabelas 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4. As propriedades dos solos nestas Tabelas são identificadas pelos códigos enumerados a seguir:

- | | |
|---------------------------|---|
| γ_s natural | - massa específica aparente seca do solo natural (kg/m^3). |
| γ_s cal (RCS máx) | - massa específica aparente seca do solo tratado com cal (kg/m^3), onde ocorreu a máxima tensão de ruptura à compressão não confinada. |
| γ_s NaOH (RCS máx) | - massa específica aparente seca do solo tratado com NaOH (kg/m^3), onde ocorreu a máxima tensão de ruptura à compressão não confinada. |
| γ_s cal + NaOH | - massa específica aparente seca do solo tratado com cal + traços de NaOH, (kg/m^3). |
| hot natural | - teor de umidade ótima do solo natural (%). |
| hot cal | - teor de umidade ótima do solo tratado com cal (%). |

hntr	- teor de umidade de moldagem do solo mais aditivo, onde ocorreu a máxima tensão de ruptura a compressão não confinada, (%).
hot NaOH	- teor de umidade ótima do solo tratado com NaOH, (%).
RCS máx	- máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, (kPa).
LL	- limite de liquidez, (%).
LP	- limite de plasticidade, (%).
IP	- índice de plasticidade, (%).
LC	- limite de contração, (%).
CTC ₁₀	- capacidade de troca de cátions determinada a um pH = 10, (meq/100 g).
AE ₂₀₀	- área específica da fração que passa na peneira ABNT No 200 (0,074 mm), m ² /g.
AET ₂₀₀	- índice arbitrário igual ao produto da área específica pela fração do solo menor que 0,074 mm.
% de Argila	- fração do solo menor que 2 μmm, (%).
Ia Skemp	- índice de atividade de Skempton.
Ca + Mg trocáveis	- cálcio mais magnésio trocáveis (meq/100 g).
Al amorfa	- alumina amorfa, (%).
Fe argila	- teor de ferro na fração argila, (%).
pH _{2,0}	- potencial hidrogeniônico da fração menor que 2,0 mm.
pH _{0,42}	- potencial hidrogeniônico da fração menor que 0,42 mm.
Si/Al	- relação sílica/alumina.

7.3 - ANÁLISE ATRAVÉS DE CORRELAÇÃO E REGRESSÃO LINEAR SIMPLS

Como pode ser observado nas Tabelas 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4, as correlações encontradas não forneceram subsídios para que se pudesse explicar certos comportamentos encontrados nos sistemas solo-cal, solo-NaOH, solo-NaCl e solo-cal + traços de NaOH.

O sistema solo natural apresentou várias interrelações que deixam de ser discutidas por não ser objetivo principal do presente estudo.

O sistema solo-cal apresentou interrelações esperadas como:

$$\text{hot natural} = 0,93 \text{ hot cal} + 2,52 \quad (7.1.1)$$

$$\text{hot natural} = 0,90 \text{ hntr} + 2,91 \quad (7.1.2)$$

$$\text{hot cal} = 0,95 \text{ hntr} + 0,92 \quad (7.1.3)$$

$$\gamma_s \text{ nat} = 0,80 \gamma_s \text{ cal (RCS máx)} + 304,80 \quad (7.1.4)$$

que permitem inferir (dentro das limitações de validade das equações) o comportamento dos teores de umidade e massa específica do solo-cal a partir de parâmetros do solo natural;

$$\text{hntr} = 1,23 \text{ IP} - 10,94 \quad (7.1.5)$$

que permite inferir (dentro das limitações de validade das equações) como o teor de umidade de moldagem para a máxima tensão de ruptura à compressão não confinada do solo-cal pode ser influenciada pelo índice de plasticidade do solo natural;

$$\gamma_s \text{ cal} = 0,02(\text{Ca} + \text{Mg trocáveis}) - 22,81 \quad (7.1.6)$$

que permite inferir (dentro das limitações de validade da equação) que os cátions cálcio e magnésio trocáveis podem in

fluenciar na massa específica aparente seca do solo-cal no teor onde ocorreu a máxima tensão de ruptura (RCS);

$$RCS \text{ máx} = 1,44(AET \ 200) - 43,95 \quad (7.1.7)$$

esta equação não obstante apresente um nível de significância menor que o considerado nas demais equações isto é maior que 1%, porém acredita-se que seja uma relação interessante para futuros estudos com uma maior população, onde então poderá ser confirmada esta tendência a influenciar na tensão de ruptura (RCS).

O sistema solo-NaOH apresentou interrelações tais como:

$$\gamma_s \text{ natural} = 0,88 \gamma_s \text{ NaOH} + 216,09 \quad (7.2.1)$$

que permite inferir (dentro das limitações de validade das equações) o comportamento da massa específica aparente seca do solo-NaOH a partir de parâmetros do solo natural;

$$\text{hot NaOH} = -0,6(\text{Ca} + \text{Mg trocáveis}) + 15,87 \quad (7.2.2)$$

$$\gamma_s \text{ NaOH} = 0,01(\text{Ca} + \text{Mg trocáveis}) - 20,81 \quad (7.2.3)$$

que permite inferir (dentro das limitações de validade da equação), que os cátions cálcio e magnésio trocáveis podem influenciar de diferentes formas no teor de umidade ótima e massa específica aparente seca do solo-NaOH, onde ocorreu a máxima tensão de ruptura a compressão não confinada.

O sistema Solo-NaCl não apresentou interrelações significantes ao nível de 1% de probabilidade de dispersão.

O sistema solo-cal + traços de NaOH apresentou correlações tais como:

$$RCS \text{ máx} (0,3\% \text{ de NaOH}) = 0,05I_a \text{ Skemp} - 19,23 \quad (7.3.1)$$

$$\text{RCS máx (0,3\% de NaOH)} = 0,02 \text{ AE } 200 + 6,43 \text{ (7.3.2)}$$

que permite inferir (dentro das limitações de validade das equações) que o índice de atividade de Skempton e a área específica da fração menor que 0,074 mm provavelmente influenciam na tensão de ruptura a compressão não confinada do solo-cal + traços de NaOH.

SISTEMA SOLO-CAL

$$Y = a X + b$$

Y	X	a	b	R	S	GL
7.1.1 hot natural	hot cal (RCS máx)	0,93	2,52	0,9942	0,001	3
7.1.2 hot natural	hntr	0,90	2,91	0,9948	0,001	3
7.1.3 hot cal	hntr	0,95	0,92	0,9791	0,004	3
7.1.4 γ s natural	γ s cal (RCS máx)	0,80	304,80	0,9850	0,002	3
7.1.5 hntr	IP	1,23	-10,94	0,9787	0,004	3
7.1.6 γ s cal	Ca + Mg trocáveis	0,02	-22,81	0,9733	0,005	3
7.1.7 RCS máx	AET 200	1,44	-43,95	0,9492	0,014	3

Tabela 7.1 - Regressões Lineares Simples Significativas ($S < 1\%$)
Sistema Solo-Cal.

SISTEMA SOLO-NaOH

$$Y = a X + b$$

Y	X	a	b	R	S	GL
7.2.1 γ_s natural	γ_s NaOH(RCS máx)	0,88	216,09	0,9875	0,002	3
7.2.2 hot NaOH	Ca + Mg trocáveis	-0,60	15,87	-0,9795	0,004	3
7.2.3 γ_s NaOH	Ca + Mg trocáveis	0,01	-20,81	0,9627	0,009	3

Tabela 7.2 - Regressões Lineares Simples Significativas ($S < 1\%$)
Sistema Solo-NaOH

SISTEMA SOLO-CAL + TRAÇO DE NaOH

$$Y = a X + b$$

Y	X	a	b	R	S	GL
7.3.1 RCS 0,3 NaOH m̄x	Ia Skemp	0,05	-19,23	0,9940	0,001	3
7.3.2 RCS 0,3 NaOH m̄x	AE 200	0,02	6,43	0,9640	0,007	3

Tabela 7.3 - Regressões Lineares Simples Significativas ($S < 1\%$)
Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

SISTEMA SOLO-NATURAL

$$Y = a X + b$$

Y	X	a	b	R	S	GL
7.4.1 pH 0,42	% argila	5,76	-19,85	0,9981	0,001	3
7.4.2 Ia Skemp	Si/Al	0,01	2,14	0,9982	0,001	3
7.4.3 pH 0,42	CTC 10	4,14	-11,11	0,9938	0,001	3
7.4.4 CTC 10	% argila	1,34	-4,21	0,9936	0,001	3
7.4.5 Ia Will	LL	147,96	1,15	0,9911	0,001	3
7.4.6 LP	pH 0,42	-0,41	6,81	0,9808	0,003	3
7.4.7 LP	pH2,0	0,02	4,25	0,9808	0,003	3
7.4.8 pH 0,42	CTC 10	4,14	-11,11	0,9767	0,004	3
7.4.9 Fe argila	% argila	3,50	-34,38	0,9702	0,006	3
7.4.10 p 0,42	Fe argila	0,46	11,31	0,9591	0,001	3
7.4.11 Ia Skemp	AE 200	0,38	14,01	0,9475	0,014	3
7.4.12 CTC 20	Fe argila	0,36	9,04	0,9385	0,018	3
7.4.13 Fe argila	Si/Al	0,15	0,26	0,9359	0,019	3

Tabela 7.4 - Regressões Lineares Simples Significativas ($S \leq 1\%$)
Sistema Solo-Natural

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Foi estudada a influência da adição de diferentes percentuais de cal, de hidróxido de sódio (NaOH) e de cloreto de sódio (NaCl) em propriedades selecionadas de 5 solos vermelhos tropicais (solos lateríticos) do Norte e Nordeste do Brasil, podendo-se concluir.

8.1 - SOLO DE TEPB

8.1.1 - Este solo no estado natural apresentou as seguintes características:

A.E = 33,6 m²/g; CTC = 13,8 meq/100 g; pH = 4,9; $\sigma = 1,68 \times 10^{-1}$ μ S; sílica amorfa = 9,6%; alumina amorfa = 3,2%; ferro amorfo = 4,2%; sílica/alumina = 2,62; sílica/sexquióxidos = 1,86; matéria orgânica = 0,88%; $\gamma_g = 2,72 \times 10^3$ kg/m³; composição granulométrica, 13,8% de pedregulho; 60,2% de areia; 10,0% de silte e 16,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que 2 μ m argilo mineral caulinita; LL = 39,6%; LP = 24,6%; IP = 15,0%; LC = 11,5%; $\gamma_s = 1687$ kg/m³; hot = 19,0%; abrasão "Los Angeles" = ND; classificação HRB-A-2-6, SUCS (extendida) - SC/CI (Ver Apêndice III);

8.1.2 - Sistema Solo-Cal

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de cal. O limite de liquidez foi reduzido e o limite de plasticidade foi elevado. Ocorrendo assim a

redução do índice de plasticidade.

2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade, apresentou tendências a modificação com a adição de cal. A máxima massa específica aparente seca não foi praticamente modificada, enquanto o respectivo teor de umidade ótima foi elevado.
3. A adição de cal melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação durante a imersão. Com a adição de 4% de cal foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento, em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com os do solo natural e com a adição de 1% de cal.
4. Com o incremento de cal ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada, sem que fosse definido máximo.
5. A adição de cal modificou a fração fina da classificação SUCS estendida deste solo, que de um SC/CI passou a comportar-se como um SC/MI.

8.1.3 - Sistema Solo-NaOH

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaOH. A presentando os limites de liquidez e de plasticidade, bem como o índice de plasticidade um comportamento similar ao de uma curva de de flocculação típica.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade óti

ma, não apresentou tendências a modificação .

3. A adição de NaOH melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão. Com a adição de 0,5% de NaOH foi possível a permanência de corpos de prova sem confinamento, em imersão sem desagregarem. O que não foi possível com os do solo natural e com a adição de 0,3% de NaOH.
4. Com o incremento de NaOH, ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada, sem que fosse caracterizado um máximo.
5. A adição de NaOH modificou a fração fina da classificação SUCS estendida deste solo, que passou de um SC/CI para um SC/CL, retornando com o incremento de NaOH para um SC/CI.

8.1.4 - Sistema Solo-NaCl

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaCl. Sendo os limites de liquidez e plasticidade reduzidos. Não ocorrendo praticamente alteração no índice de plasticidade.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o teor de umidade ótima não apresentou tendências a modificação.
3. A adição de NaCl não melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de até 3% de NaCl não foi possível a permanência de corpos de

prova em imersão por 24 horas, sem que desa
gregassem completamente.

4. Os percentuais de NaCl adicionados, não modi
ficaram a classificação SUCS extendida deste
solo.

8.1.5 - Sistema Solo-Cal + traços de NaOH

1. A adição de traços de NaOH reduziu o tempo de
cura do sistema solo-cal. Apresentando o sis
tema solo-cal + traços de NaOH valores de ten
são de ruptura à compressão não confinada no
mínimo 30% mais elevados, que os exibidos pe
lo sistema solo-cal aos 28 dias de cura.
2. A adição de 1,2% de NaOH ao sistema solo-cal
foi mais eficaz em acelerar o tempo de cura
do sistema solo-cal, do que a adição de 0,3%
de NaOH.
3. A tensão de ruptura à compressão não confina
da aumentou substancialmente com o prolonga
mento do tempo de cura.

8.2 - SOLO DE CTPB

8.2.1 - Este solo no estado natural apresenta as se
guintes características:

A.E = 50,7 m²/g; CTC = 10,9 meq/100 g; pH = 4,8%;
 $\sigma = 1,48 \times 10^{-1} \mu\text{S}$; sílica amorfa = 12,2%; alumina amorfa =
4,17; ferro amorfo = 0,80%; sílica/alumina = 2,16; sílica/
sexquióxido = 1,68; matéria orgânica = 1,39%; $\gamma_g = 2,77 \times 10^3$
kg/m³; composição granulométrica, 42,2% de pedregulho;
39,8% de areia; 8,0% de silte e 10,0% de argila; composi

ção mineralógica da fração menor que 2 μm argilo mineral caulinita; LL = 28,6%; LP = 22,2%; IP = 6,4% e LC = 12,7%; $\gamma_s = 1900 \text{ kg/m}^3$; hot = 14,5%; abrasão "Los Angeles" = 34,8%; classificação HRB-A-2-6, SUCS (extendida) - GC/CL (Ver Apêndice III).

8.2.2 - Sistema Solo-Cal

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de cal, sendo elevado o limite de liquidez. O limite de plasticidade tornou-se não plástico com a adição de 4% de cal. Ocorrendo a modificação no índice de plasticidade para não plástico.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade, apresentou tendências à modificação. Tendendo a máxima massa específica aparente seca a reduzir-se, enquanto o respectivo teor de umidade ótima tendeu a elevar-se.
3. A adição de cal melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água com a adição de 1% de cal foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento, em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com o solo natural.
4. Com o incremento de cal ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, não delineado atingindo um máximo.
5. A adição de cal modificou a fração fina da classificação SUCS extendida deste solo, que

de um GC/CL, passou a um GC/ML.

8.2.3 - Sistema Solo-NaOH

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaOH. Apresentando os limites de liquidez e plasticidade e o índice de plasticidade um comportamento similar a uma curva de defloculação típica.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade apresentou tendências a modificação. A máxima massa específica aparente seca praticamente não foi modificada enquanto o respectivo teor de umidade tendeu a um comportamento similar a uma curva de defloculação típica.
3. A adição de NaOH melhorou as características de resistência ao amolecimento / desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 1,2% de NaOH foi possível a permanência de corpos de prova sem confinamento em imersão por 24 horas sem desagregar. O que não foi possível com o solo natural ou com a adição de 0,3% ou de 0,5% de NaOH.
4. Com o incremento de NaOH ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura â compressão não confinada, atingindo um máximo para a adição de 2,4% de NaOH

8.2.4 - Sistema Solo-NaCl

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaCl. Sendo que o limite de liquidez não foi modificado, enquanto o limite de plasticidade foi reduzido. Ocorrendo assim a elevação do índice de plasticidade.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade foi modificada. Sendo a máxima massa específica aparente seca elevada, enquanto o respectivo teor de umidade foi reduzido.
3. A adição de NaCl melhorou as características de resistência ao amolecimento / desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 1,2% de NaCl, foi possível a permanência de corpos de prova em imersão por 24 horas sem que desagregassem completamente. O que não foi possível com os do solo natural.
4. Como o incremento de NaCl ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura à compressão não confinada, não sendo definido um máximo.
5. A adição de NaCl modificou a parte fina da classificação SUCS estendida deste solo, que de um GC/CL, passou a comportar-se como GC/ML.

8.2.5 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

1. A adição de traços de NaOH reduziu o tempo de

cura do sistema solo-cal. Apresentando o sistema solo-cal + traços de NaOH, valores de tensão de ruptura à compressão não confinada no mínimo de 35% mais elevados que os do sistema solo-cal, quando da adição de 0,3% de NaOH. A adição de 1,2% de NaOH retardou o tempo de cura do solo-cal.

2. A adição de 0,3% de NaOH ao sistema solo-cal, foi mais eficaz em acelerar o tempo de cura do sistema solo-cal o do que a adição de 1,2% de NaOH.
3. A tensão de ruptura à compressão não confinada aumentou substancialmente com o prolongamento do tempo de cura.
4. A adição de NaOH acelerou a formação de compostos cimentantes que elevaram a tensão de ruptura do sistema solo-cal.

8.3 - SOLO DE ARPB

8.3.1 - Este solo no estado natural apresentou as seguintes características:

A.E = 33,9 m²/g; CTC = 8,7 meq/100 g; pH = 5,0%;
 $\sigma = 1,12 \times 10^{-1}$ μ S; sílica amorfa = 10,3%; alumina amorfa = 4,32%; ferro amorfo = 3,78%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxido = 1,70; matéria orgânica = 1,35%; $\gamma_g = 2,77 \times 10^3$ kg/m³; composição granulométrica, 47,2% de pedregulho; 34,8% de areia; 7,0% de silte e 11,0% de argila; composição mineralógica da fração menor que 2 μ m argilo mineral caulinita; LL = 42,0%; LP = 31,1%; IP = 10,9% e LC = 14,3%; $\gamma_s = 1710$ kg/m³; $\text{hot} = 13,8\%$; abrasão "Los Angeles" = 62,2% classifica

ção HRB-A-2-6, SUCS (extendida) - GC/CL (Ver Apêndice III).

8.3.2 - Sistema Solo-Cal

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de cal. O limite de liquidez não sofreu variação, o limite de plasticidade foi elevado e o índice de plasticidade foi reduzido.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade não apresentou tendências a modificação.
3. A adição de cal melhorou as características de resistência ao amolecimento /desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 4% de cal foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento, em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com os do solo natural e com a adição de 1% de cal.
4. Com o incremento de cal ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada, não sendo definido um máximo.

8.3.3 - Sistema Solo-NaOH

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaOH. Apresentando os limites de liquidez e plasticidade bem como o índice de plasticidade um comportamento similar a uma curva de defloculação.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade a

presentou tendências a modificação. Tendendo a máxima massa específica aparente seca a um comportamento simétrico a uma curva de defloculação, enquanto o respectivo teor de umidade ótima tendeu a um comportamento similar a uma curva de defloculação.

3. A adição de NaOH melhorou as características de resistência ao amolecimento / desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 1,2% de NaOH foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento, em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com os solos naturais e com a adição de 0,3% e 0,5% de NaOH.
4. Com o incremento de NaOH ocorreu neste solo uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada atingindo um máximo para 2,4% de NaOH.
5. A adição de NaOH modificou a parte fina da classificação SUCS (extendida) deste solo, que de um GM/MI passou a comportar-se como GM/CL passando a GM/CI e GM/CH.

8.3.4 - Sistema Solo-NaCl

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaCl. O limite de liquidez não sofreu modificação, o limite de plasticidade foi reduzido. Ocorrendo assim a elevação do índice de plasticidade.

2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade foi modificada. Sendo a máxima massa específica aparente seca elevada e o respectivo teor de umidade reduzido.
3. A adição de NaCl não melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de até 30% de NaCl, não foi possível a permanência de corpos de prova em imersão por 24 horas sem que desagregassem completamente.
4. Não foi possível mensurar as variações na tensão de ruptura a compressão não confinada em virtude dos corpos de prova não resistirem a imersão.
5. A adição de NaCl modificou a classificação SUCS estendida deste solo, que de um GM/MI, a parte fina foi alterada passando a comportar-se, como um GM/CI.

8.3.5 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

1. A adição de traços de NaOH reduziu o tempo de cura do sistema solo-cal. Passando a exibir o sistema solo-cal + traços de NaOH, valores de tensão de ruptura a compressão não confinada no mínimo 40% mais elevados, que os exibidos pelo sistema solo-cal aos 28 dias de cura.
2. A adição de 0,3% de NaOH foi mais eficaz em acelerar o tempo de cura do sistema solo-cal,

do que a adição de 1,2% (de NaOH). Tendo sido elevada a tensão de ruptura à compressão não confinada do sistema solo-cal com a adição de 0,3% de NaOH em 27% a mais que a adição de 1,2% de NaOH, aos 28 dias de cura.

3. A tensão de ruptura a compressão não confinada aumentou substancialmente com o prolongamento do tempo de cura.
4. A adição de NaOH acelerou a formação de compostos cimentantes que elevaram a tensão de ruptura do sistema solo-cal.

8.4 - SOLO DE CAPI

8.4.1 - Este solo no estado natural apresenta as seguintes características:

A.E. = $36,8 \text{ m}^2/\text{g}$; CTC = $10,8 \text{ meq}/100 \text{ g}$; pH = 4,7; $\sigma = 3,35 \times 10^{-2} \text{ } \mu\text{S}$; sílica amorfa = 10,9%; alumina amorfa = 5,17% ferro amorfo = 1,01%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxidos = ND; matéria orgânica = 1,53%; $\gamma_g = 2,90 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; composição granulométrica, 56,3% de pedregulhos, 26,7% de areia, 7,5% de silte e 9,5% de argila; composição mineralógica da fração menor que $2 \text{ } \mu\text{m}$ argilo mineral caulinita; LL = 25,2%; LP = 19,1%; IP = 6,1%; LC = 5,5%; $\gamma_s = 2085 \text{ kg}/\text{m}^3$; hot = 10,0%; abrasão "Los Angeles" = 28,8%; classificação HRB-A-2-4, SUCS - GC/CL (Ver Apêndice III).

8.4.2 - Sistema Solo-Cal

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de cal, sendo

elevado o limite de liquidez (em diferentes intensidades), o limite de plasticidade foi modificado para não plástico, como também o índice de plasticidade.

2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade, apresentou tendências a modificação. A máxima massa específica aparente seca não foi praticamente modificada, enquanto o respectivo teor de umidade foi elevado.
3. A adição de cal melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão, deste solo. Com a adição de 1% de cal foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com o solo natural.
4. Com o incremento de cal, ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada, não sendo delineado um máximo.

8.4.3 - Sistema Solo-NaOH

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaOH. Apresentando os limites de liquidez e de plasticidade, bem como o índice de plasticidade um comportamento similar ao de uma curva de flocculação típica.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade a

- presentou tendências a modificação. A máxima massa específica aparente seca praticamente não foi modificada, enquanto o respectivo teor de umidade tendeu a um comportamento bastante similar ao de uma curva de defloculação típica.
3. A adição de NaOH melhorou as características de resistência ao amolecimento / desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 1,2% de NaOH foi possível a permanência de corpos de prova em imersão, sem confinamento, por 24 horas em desagregarem. O que não foi possível com os do solo natural ou com a adição de 0,3% ou de 0,5% de NaOH.
 4. Com o incremento de NaOH ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura à compressão não confinada não sendo delineado um ponto de máximo.
 5. Os percentuais de NaOH adicionados, não modificaram a classificação SUCS estendida deste solo.

8.4.4 - Sistema Solo-NaCl

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaCl. Sendo os limites de liquidez e plasticidade reduzidos em diferentes intensidades. Ocorrendo assim a elevação do índice de plasticidade.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade ótima foi modificada. A máxima massa específica aparente seca praticamente não foi modificada

enquanto o respectivo teor de umidade ótima foi elevado.

3. A adição de NaCl não melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão. Com a adição de até 3,0% de NaCl não foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento em imersão por 24 horas sem que desagregassem completamente.
4. Não foi possível mensurar as variações na tensão de ruptura a compressão não confinada em virtude dos corpos de prova não resistirem a imersão.
5. Os percentuais de NaCl adicionados, não modificaram a classificação SUCS (extendida) deste solo.

8.4.5 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

1. A adição de traços de NaOH reduziu o tempo de cura do sistema solo-cal. Apresentando o sistema solo cal + traços de NaOH valores de tensão de ruptura a compressão não confinada no mínimo 50% mais elevados, que os exibidos pelo sistema solo cal aos 28 dias de cura.
2. A adição de 0,3% de NaOH foi mais eficaz em acelerar o tempo de cura do sistema solo-cal, que a adição de 1,2% de NaOH. Tendo sido elevada a tensão de ruptura à compressão não confinada do sistema solo-cal, com adição de 0,3% de NaOH em 85% de mais que a adição de 1,2% de NaOH.
3. A tensão de ruptura à compressão não confinada

da aumentou substancialmente com o prolongamento do tempo de cura.

4. A adição de NaOH acelerou a formação de compostos cimentantes que elevaram a tensão de ruptura do sistema solo-cal.

8.5 - SOLO DE MOPA

8.5.1 - Este solo no estado natural apresenta as seguintes características:

A.E. = 25,8 m²/g; CTC = 6,9 meq/100 g; pH = 4,9; $\sigma = 9,60 \times 10^{-2}$ μ S; sílica amorfa = 13,9%; alumina amorfa = 5,29%; ferro amorfo = 0,75%; sílica/alumina = ND; sílica/sexquióxidos = 1,83; matéria orgânica = 0,70%; composição granulométrica, 29,9% de pedregulhos, 30,1% de areia, 19,0% de silte e 21,0% de argila; composição mineralógica da fração maior que 2 μ m argilo mineral caulinita; LL=46,5%; LP = 26,9%; IP = 19,7%; LC = 17,9%; $\gamma_s = 1617$ kg/m³; hot = 22,9%; abrasão "Los Angeles" = 34,3%; classificação HRB-A-4, SUCS (extendida) GM/MI (Ver Apêndice III).

8.5.2 - Sistema Solo-Cal

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de cal. O limite de liquidez não sofreu variação e o limité de plasticidade foi elevado. Ocorrendo a redução do índice de plasticidade.
2. A relação entre a máxima massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade, não foi modificada pela adição de cal.

3. A adição de cal melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão deste solo. Com a adição de 4% de cal foi possível a permanência de corpos de prova sem confinamento em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com o solo natural e com a adição de 1% de cal.
4. Com o incremento de cal ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura à compressão não confinada. Não sendo delineado um máximo.

8.5.3 - Sistema Solo-NaOH

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaOH. Apresentando os limites de liquidez e de plasticidade, bem como o índice de plasticidade um comportamento similar a uma curva de deflocação típica.
2. A relação entre a massa específica aparente seca e o respectivo teor de umidade, apresentou tendências a modificação. A máxima massa específica aparente seca, praticamente não foi modificada enquanto o respectivo teor de umidade tendeu a um comportamento similar ao de uma curva de defloculação típica.
3. A adição de NaOH melhorou as características de resistência ao amolecimento/desagregação deste solo. Com adição de 0,5% de NaOH foi possível a permanência de corpos de prova, sem confinamento, em imersão por 24 horas sem desagregarem. O que não foi possível com o solo

natural e com a adição de 0,3% de NaOH.

4. Com o incremento de NaOH ocorreu uma gradual elevação na máxima tensão de ruptura a com pressão não confinada, não sendo delineado um máximo.

8.5.4 - Sistema Solo-NaCl

1. As características de plasticidade deste solo foram modificadas pela adição de NaCl. Sendo os limites de liquidez e de plasticidade redu zidos em diferentes intensidades. Ocorrendo a redução do índice de plasticidade.
2. A relação entre a máxima massa específica apa rente seca e o respectivo teor de umidade a presentou tendências a modificação. A máxima massa específica aparente seca praticamente não foi modificada enquanto o respectivo teor de umidade foi reduzido.
3. A adição de NaCl não modificou as caracteris ticas de resistência ao amolecimento/desagre gação pelos efeitos da imersão. Com a adição de até 3,0% de NaCl não foi possível a perma nência de corpos de prova por 24 horas sem que desagregassem completamente.
4. Não foi possível mensurar as variações na ten são de ruptura à compressão não confinada em virtude dos corpos de prova não resistirem à imersão.
5. A adição de NaCl modificou a parte fina da classificação SUCS (extendida) deste solo, que passou de um GC/MI para um GC/CI e para um GC/CL, com o incremento de NaCl.

8.5.5 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

1. A adição de NaOH reduziu o tempo de cura do sistema solo cal apresentando o sistema solo-cal + traços de NaOH valores de tensão de ruptura à compressão não confinada no mínimo 31% mais elevados que os exibidos pelo sistema solo-cal aos 28 dias de cura.
2. A adição de 1,2% de NaOH foi mais eficaz em acelerar o tempo de cura do sistema solo-cal, do que a adição de 0,3% de NaOH. Tempo sido elevada a tensão de ruptura não confinada do sistema solo-cal com a adição de 1,2% em 17% a mais do que a adição de 0,3% de NaOH.
3. A tensão de ruptura à compressão não confinada cresceu substancialmente com o prolongamento do tempo de cura.

8.6 - GENERALIZAÇÕES

Se bem que existam certos comportamentos diferenciados em cada um dos solos estudados em relação as propriedades caracterizantes e de engenharia consideradas neste trabalho e mencionadas na parte inicial das conclusões. Pode-se de uma maneira genérica e global, afirmar que existe uma elevada probabilidade de ter ocorrido os seguintes comportamentos:

8.6.1 - Sistema Solo-Cal

1. O limite de liquidez não apresentou tendências definidas de comportamento.

2. O limite de plasticidade foi elevado ou tor
nou-se não plástico.
3. O índice de plasticidade foi reduzido ou tor
nou-se não plástico.
4. A massa específica aparente seca tendeu na ma
neira das vezes a ser reduzida, em geral na
faixa de repetibilidade adotada para o en
saio.
5. O teor de umidade ótima foi de uma maneira ge
ral elevado.
6. A resistência ao amolecimento/desagregação pe
los efeitos da água durante a imersão foi im
plementada.
7. Ocorreu uma gradual elevação na tensão de rup
tura à compressão não confinada (RCS) com o
incremento de cal.
8. A classificação SUCS (extendida) foi em geral
modificada com o incremento de cal.

8.6.2 - Sistema Solo-NaOH

1. Os parâmetros de plasticidade limite de liqui
dez, limite de plasticidade e índice de plas
ticidade exibiram um comportamento similar
ao de uma curva de defloculação típica.
2. A máxima massa específica aparente seca não
foi praticamente modificada pela adição de
NaOH.
3. O teor de umidade ótima exibiu um comportamen
to similar ao de uma curva de defloculação tí
pica.

4. A resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão foi implementada.
5. Ocorreu uma gradual elevação na tensão de ruptura à compressão não confinada com o incremento de NaOH.
6. A classificação SUCS (extendida) foi modificada com o incremento de NaOH.

8.6.3 - Sistema Solo-NaCl

1. Os parâmetros de plasticidade, limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade não apresentaram tendências definidas de comportamento.
2. A máxima massa específica aparente seca praticamente não foi modificada.
3. O teor de umidade ótima foi na maioria das vezes elevado.
4. A resistência ao amolecimento/desagregação pelos efeitos da água durante a imersão, não foi implementada para a maioria dos solos estudados.
5. Não foi possível, na maioria das vezes, avaliar os efeitos do NaCl sobre a compressão não confinada dos corpos de prova após 24 horas de imersão em água.
6. A classificação SUCS (extendida) foi em geral modificada com o incremento de NaCl.

8.6.4 - Sistema Solo-Cal + Traços de NaOH

1. A máxima massa específica aparente seca do solo cal não foi praticamente modificada pela adição de traços de NaOH.
2. O tempo de cura do sistema solo-cal foi reduzido com a adição de traços de NaOH.
3. A tensão de ruptura do sistema solo-cal foi elevada com a adição de traços de NaOH.
4. A tensão de ruptura à compressão não confinada aumentou substancialmente com o prolongamento do tempo de cura.
5. A adição de NaOH acelerou a reação entre o solo e a cal.

Dentro do nível de significancia adotado ($S \leq 1\%$), correlacionando propriedades dos sistemas solo-aditivos estudados, foram obtidas correlações estatísticas lineares simples, pelo método dos mínimos quadrados, que poderão ser utilizadas em previsões de validade restrita.

Finalmente pode-se verificar que os aditivos estudados modificaram em maior ou menor extensão as propriedades caracterizantes e de engenharia dos solos estudados na seguinte escala crescente:

- a) Cal + traços de NaOH
- b) Cal
- c) NaOH
- d) NaCl.

CAPÍTULO IX

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando o carácter preliminar desta pesquisa e suas óbvias limitações bem como os resultados obtidos é opinião do autor desta dissertação, que os seguintes pontos parecem apropriados para o desenvolvimento de estudos adicionais.

9.1 - Prosseguir os estudos para o sistema cal + traços, tendo por finalidade um melhor conhecimento do comportamento resultante da adição de traços de NaOH a solos aditivados com cal, pelo fato dos dados obtidos neste trabalho evidenciarem resultados superiores aos obtidos unicamente com adição de cal.

9.2 - Através de métodos de análise mineralógica, recomenda-se aprofundar os estudos conduzidos até o presente, tendo por objetivo a identificação de novas fases mineralógicas formadas, procurando-se observar na ação cimentícia.

9.3 - Através da cura em temperaturas elevadas entre 50°C e 100°C, com umidade relativa controlada da ordem de 50% a 100%. Observar a eficiência dos aditivos estudados comparando com os dados obtidos no presente trabalho realizado em condições ambientes.

9.4 - Verificar a influência de traços de NaOH em misturas de solo-cal para confecção de tijolos para construções de baixo custo.

9.5 - Verificar a influência dos aditivos incluídos neste trabalho no CBR com e sem imersão.

9.6 - Verificar a influência dos aditivos utilizados neste trabalho na tensão de tração indireta e módulo de resiliência.

9.7 - Verificar a lixiviação dos produtos cimentícios formados para os sistemas estudados neste trabalho. Observando sua influência nas propriedades de engenharia.

9.8 - Prosseguimento de estudos similares ao presentemente conduzido, para novos solos lateríticos objetivando generalizações mais significativas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas MB/33/68
Ensaio Normal de Compactação de Solos Rio de Janeiro -
Brasil, (1968).
- Anday, M.C. - Curing Lime Stabilized Soils. Highway Re
search Record Nº 29. H.R.B. (1963).
- Associação de Cloreto de Cálcio, USA, Plant Mixing Stabili
zed Aggregate for Low-Cost Roads. Bull, 24, (1936).
- ASTM - American Society for Testing and Materials, Desig
nation: C 432 - 65 T Part 9, p. 273, (1966).
- Batista, C.F. Nogueira - Pavimentação, Ed. Globo - Porto
Alegre - R.S. Brasil, 1974 .
- Belcher - A Field Investigation of Low Cost S Stabilized
Roads. Purdue University Bull, 81, Res. Series, (1941).
- Bezerra, Raimundo Leidimar - A Durabilidade de Solos Late
ríticos estabilizados com Cimento e Aditivos. Tese MSc.
CCT-UFPb - Paraíba - Brasil, 1976 .
- Burlen, K. - Introdução a Estatigrafia Geral e Comparada
Expansão Gráfica. Recife-Pernambuco - Brasil, 1964 .
- Bolt - Ion Adsorption by Clays. Soil Science, Vol. 79,
(pp. 267-276, (1955).

- Brandl, H. - The Modification of Physical Properties of Soil by the Admixture of Chemicals Z. Kulturtechn, 12. Nº 4, pp. 206-220, (1971).
- Brandl, H. - Relationship Between Chemical and Physical Properties of Stabilized Soils Z. Kulturtechn, 12. Nº 5, pp. 275-284, (1971).
- BS - 1377 - (1975) - Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes - Inglaterra, (1975).
- Buchanan, F.A. - A Journey from Madras Through the Countries of Mysore, Kanara e Malabar, Vol. 2, ch. 12, pp. 436-461 East India Company, London, 1807 .
- Buchman, H.O. e Brandy, N.C. - Natureza e Propriedades dos Solos. Tradução de Antonio. B.N. Figueiredo Fo Livraria Freitas Bastos. S.A., 5 Ed., Rio de Janeiro - Brasil. The Nature and Properties of Soil, 1979 .
- Busemberg, E. e Clemency, C.V. - Determination of the Cation Exchange Capacity of the Clays and Soils Using an Ammonia Electrode, Clays and Clays Minerals, Vol. 21, (1973).
- Cabrera, J.G. - Notas de Aula. Curso de Projeto Avançado de Estruturas para Pavimentos Flexíveis. CCT-UFPb 1979
- Cabrera, J.G. e Nwakanma, C.A. - Pozzolanic Activity and Mechanim of Reaction of Red Tropical Soil-Lime Systems- Conference on Low-Volume Roads, Iowa, August 20-23 (1979)
- a.

- Cabrera, J.G. e Nwakanma, C.A. - Reaction Products and Strength of Red Tropical Soil-Lime System, Comunicação Privada, a ser Publicada em Cement and Concrete Research, (1979) b.
- Cabrera, J.G. e O'Flaherty, C.A. - The Modifying Effects of Lime on the Engineering Properties of Clay Soils. Presented to the Australian Research Board for Publication in the Proceedings. August (1975) (Comunicação Privada).
- Chadda, L.R. e Uppal, H.L. - Laboratory Studies on the Chemical Stabilization of Laterite in Road Construction. Road and Road Construction. January (1971).
- Chasyantet, J.D. - "Chemical Modification of Lime Stabilization" M.Sc. Thesis Department of Civil Engineering. M.T.T. (19).
- Cartmell, H.S. e Bergh, A.D. - Lime Stabilization of Soils for use as Road Foundation in Northern Rhodesia. Overseas Bulletin nº 9. Road Research Laboratory, (1969).
- Correia, Ricardo - A Influência da Energia Térmica e Mecânica na Granulometria de Solos Vermelhos Tropicais, Tese de Mestrado em Execução no CCT-UFPb, 1981 .
- Daniels, D.J. - The Modifying Effects of Additive Quantities of Lime on Variou Clay Soils. M.Sc. Tesis, University Leeds, 1971 .
- Davidson, D.T., Mateos, M. e Katti, R.K. - Activation of the Lime-Fly-ash Reaction by Trace Chemicals. H.R.B. - Bull. 231, pp. 67-81, (1959).

- Davidson, D.T. Mateos, M. e Barnes, H.F. - Improvemente of Lime Stabilization of Montmorillonitic Clay Soils With Chemical Additives. H.R.B.-Bull. Nº 262, pp.33-50,(1960).
- De Alwis, K.A. e Pluth. A.J. - The Red Latosols de Sri Lanka. Soil Sci. Society of America Journal. Vol.40- Nº 6, Nov. pp. 812-929, (1976).
- Diamond, S. e Kinter, E.B. - Mechanism of Soil-Lime Stabilization an Interpretive Review. Highway Research Record Nº 92, pp. 18-102, (1965).
- Diamond, S. e Kinter, E.B. - Gravimetric Determination of Monolayer Glycerol Complexes of Clay Minerals. N.A.S. NRC 5th. Conference ou Clays and Clay Mineral. Pub. 566, pp. 318-347, (1968).
- Diamond, S., White, J.L. e Dolch, W.L. - Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack, Proc. 12th Nacional Conf. on Clays and Clay Minerals, Pergamon Press, New York, pp. 359-379, (1966).
- DNER (1972) - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Divisão de Pesquisas e Normas Técnicas. Métodos de Ensaio - 3 Ed. Rio de Janeiro - Brasil 1972 .
- DNER (1974) ES 49/74 - Especificações para Base de Solos Lateríticos, pp. 10, 1974 ES 48/74 - Especificações para Sub-base de Solos Lateríticos pp. 11- 1974 .
- DNER (1976) - Souza, Murilo Lopes de, Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Pub. do DNER 1976 .

- DNER (1977) - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Brasil Materiais para Obras Rodoviárias Métodos e Instruções de Ensaios 1977 .
- DNPM (1974) - Departamento Nacional de Produção Mineral Levantamento de Recursos Naturais Projeto RADAM 1974 .
- Drake, J.A. e Haliburton, T.A. - Accelerated Curing of Salt-Treated and Lime-Treated Cohesive Soils. HRB, Highway Research Record. 381, pp. 10-19, (1972).
- Duarte, Evandro, F. - Impermeabilização de Canais em Terra com Solução de Soda Caústica Revista Agronomia. Vol. 19, Nºs 3-4, pp. 5-13, Julho-Dezembro (1961).
- Ducan, S.J. - Salt Stabilization of Soils. Nº. Ohio Geol. Soc. Inc., Second Symposium on Salt, Vol. 1. pp. 352-355, 1966 .
- Eades, J.L. e Grim, R.E. - "A Quick Test to Determine Lime Requerimentos Stabilized Clay" Highway Research Record Nº 263, HRB, (1966).
- Eades, J.L. e Nicholes, F.P. Jr e Grim, R.E. - Formation of new Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiment in Virginia Highway Research Board, Bull. Nº 335, p. 31-39, (1962).
- Earth Movers. - Stabilized Road Construction in Minnesota. Vol. 23, Nº 10, (1936).
- Feltre, R.S. e Getso Yoshinaga. - Química Geral. Vol. 1. Teoria e Exercícios Ed. Moderna Ltda. S.Paulo, Brasil, 1969 .

- Ferreira (1976) - A Influência do Tempo de Percolação e da Acidez da Água nas Características de Resistência ao Cizalhamento e Permeabilidade de um Solo Vermelho do Estado da Paraíba. Tese M.Sc, CCT-UFPb, 1976 .
- Ferro, J.G. - A Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos. Tese M.Sc., CCT-UFPb , 1976 .
- Ferro, J.G. - A Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos. Federação das Escolas Superiores do Maranhão, 1977 .
- O'Flaherty, C.A. - Highway Engineering. Ed. Edward Arnold, p. 420, 1978 .
- Fiedelman, H.W. - Evaluation of Sodium Chloride-Calcium - Chloride Mixture for Dust Control. No. Ohio Geol. Soc. Inc., Second Symposium on Salt, Vol. 1, pp. 348-351, (1966).
- Funada, S., Ogura, Y. e Sakurai, T. - On the Effectiveness and Cost of Soil Stabilization by Addition of Salt. Bull. Soc. Salt. Science, Japan, Vol. 17, pp.7-18,(1963).
- Gidigas, M.D. - Laterite and Soil Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, 9 Elsevier Scient. Pub. Co. Amsterdam p. 554, (1976).
- Goldberg, I. e Klein, A. - Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide, ASTM Special Publication No 142, pp. 53-68, (1952).
- Gow, A.J., Davidson, D.T. e Sheeler. J.B. - Relative Efficiency

fectts of Chlorides, Lignosulfonates and Molasses on Properties of a Soil-Aggregate Mix. HRB Bull. 282, pp. 66-83, (1961).

Grim, Ralph, E. - Applied Clay Mineralogy Mc Graw-Hill Book Company Inc. New York - U.S.A., 1962 .

Guida, Hugo Nicodemo - Estabilização de um Solo Laterítico Fino pelo Ácido Fosfórico. Tese M.Sc. COPPE Rio de Janeiro-Brasil, 1971 .

Guimarães, J.E.P. - Estabilização de Solos. Nova e Importante Aplicação da Cal seus Conceitos e Vantagens. A.B. C.P. - Boletim Nº 5, S.P. Brasil, (1971).

Handy, R.L. - Chemical Treatments for Surface Hardening of Soil Cement and Soil-Lime-Fly ash. H.R.B.-Bull 241- pp. 49-66, (1960).

Harrassowitz, H. - Laterite, Fortschritte der Geologie and Paleontologie, Vol. 4, pp. 253-566, (1926).

Harty, J.R. - Factors Influencing the Lime Reactivity of Tropicallly and Sub-tropicallly Weathered Soils, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, p. 139, 1971 .

Harty, J.R. e Thompson, M.R. - Lime Reactivity of Tropical and Sub-tropical Soils. HRB Nº 442, pp. 102-111, (1973).

Hayter, M.A., Cairns, H. e Morgan, R.T. - A Field and Laboratory Investigation into the Strength of a Trial

- Stretch of Lime-Stabilized Soil Pavements in Eastern Nigeria, Road Research Overseas Bulletin Nº 20. p. 39, (1966).
- Heagler, J.B. - Clay Mineralogy and Soil Stabilization. 15th, Highway Geology Symposium, Missouri Geol. Surv. and Water Resources, pp. 133-137, (1964).
- Herkins, E.R. e Hammerquist, D.W. Irley D. - Investigation of Several Additives for Controlling the Expansion de Pierre Shale. H.R.R. No. 381 . pp. 34-36, (1972).
- Herrin, M. e Mitchell, H. - Lime-Soil Mixtures, HBB Bull. Nº 304, pp. 99-138, (1961).
- Highway Research Board - Report of Subcommittee on Treatment With Sodium Chloride, Parte 5, (1936).
- Hilmay, A.K. e Elgabaly, M.M. - Exchange Reactions Between Sodium Salts and Calcium Saturated Soils. Alexandria Journal Agricultural Research, Vol. 2, Nº 1, pp. 42-57, (1954).
- Ingles, O.W. e Metcal, J.B. - Soil Stabilization, Principles and Practice. John Wiley & Sons - New York Toronto, (1973).
- IPR/DNER/UFPb - Relatório de Execução Março-Agosto 1980 - CCT-UFPb-Paraíba, Campus II - Campina Grande-Pb, 1980.
- Kassiff, O.G. - A Comparison of the Behavior of Cement Stabilized and Lime, (1962).
- Katti, R.K. e Barve, A.G. - Effect of Inorganic Chemicals

- on the Consistency Properties of an Expansive Soil Sample. H.R.B. Bull. 349 - pp. 1-8, (1962).
- Katti, R.K. et alli - Stabilization of Bourbay Marine Clay with Varius Inorganic Additives. Proc. and Southeast Asian Conf. Soil Engng. Singapore. pp. 589-599 June, (1970).
- Kelly, (1965) F.G. - Gravel Roads Stabilized by Rock Salt. Contractors and Engineering Monthly, Vol. 50, Nº 5, p. 33, (1953).
- Kozan, G.R. - Reviuns of Materials and Methods for Dust proofing and Waterproofing Soils. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Misc. Paper Nº 3-196, 1956 .
- Kozan, G.R. e Pimentel, R.A. - Guide Manual for Selection and Use of Dust Palliatives and Soil Waterprooferes in the Theater of Operations. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Misc. Paper 4-756, 1965 .
- Kozan, G.R. e Fenwick, W.B. - Soil Stabilization V.S. Army Cosps of Engineers Waterways Experiment Station , Tech, Rept. 3-455, Rept. 7, 1965 .
- Ladd, C.C. Moh, Z.C. e Lambe, T.W. - Recente Soil Lime Research at the Massachushtts Institute of Technology. H.R.B.-Bull. 262. pp. 64-85, (1960).
- Laguros, J.G. e Davidson, D.T. - Effect of Chemicals on Soil-Cement. Stabilization. Highway Research Record Nº 36, pp. 172-203, (1963).

- Lambe, T.W. - The Structure of Compacted Clay. Proceedings of the ASCE Nº 84, pp. 1684 a 1654-May, (1968).
- Lambe, T.W., Michaels, A.S. e Moh, Z.C. - "Improvements of Soil-Cement with Alkali Metal Comprounds" Paper Presented at the 38th Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington. D.D. January, (1959).
- Lambe, T.W. e Whitman, Robert - Mecanica de Suelos Limusa Editorial. México, 1976 .
- Lee, C.H. - Sealing the Lagoon Lining at Treasure Island with Salt. Trans. ASCE, Vol. 106, pp. 577-607, (1941).
- Looker, C.D., Spencer, W.T., Kushing, J.W. e Allen, H. - Use of Sodium Chloride in Road Stabilizations, H.R.B. Proc., Vol. 18, pt. 2, pp. 257-274, (1938).
- Lyons Associates Inc. e United States Agency for International Development. - Laterite and Lateritic Soils and Other Problem Soils of Africa. Report Prepared by Lyons Associates Inc., and Building and Road Research Institute Ghana. USAID., (1971).
- Lyons Associates Inc. e United States Agency for International Development. - Laterite and Lateritic Soils and Other Problem Soils of South America. Report Prepared by Lyons Associates Inc., and Building and Road Research Department of Road Highway of Brazil (DNER), Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1975 .
- Lucena, F.B. - Propriedades de Solos Vermelhos do Estado da Paraíba. COPPE-UFRJ. Tese M.Sc. - Rio de Janeiro-Brazil, 1976 .

- Marinho, R.L. - Estudo da Variabilidade Estatística de Ensaios de Classificação de Solos. Tese de M.Sc., apresentada ao CCT-UFpb - Campina Grande-Pb, (1976).
- Marks, B.D. e Haliburton, T.A. - Acceleration of Lime-Clay Reactions with Salt. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. Proc. ASCE, Vol. 98, Nº SM4, pp. 327-340, April, (1972).
- Marley, J.J. e Sheeler, J.B. - Studies on Soil-Aggregate-Sodium Chloride Stabilized Roads in Franklin Conty, Iowa. Highway Research Record 7, pp. 47-62, (1963).
- Massachusetts Institute of Technology - Proceedings Conference on Soil Stabilization, June, 18-20, (1952).
- Massachusetts Institute of Technology - Soil Solidification by Chemical Methods. Phase X Report, Nov., (1958).
- Mateos, M. e Davidson, D.T. - Further Evaluation of Propromising Chemical Additives for Accelerating Haderning of Soil-Lime Fly Ash Mixtures. H.R.B. 304, pp. 32-50, (1961).
- Mc Leland, C.J. - Sodium Chloride Stabilization Work in Steuben County, Indiana. ARBA, Tech. Bull, 254, (1964).
- Mellienz, R.C. e King, M.E. - Physical-Chemical Proproperties and Engineering Performance of Clays. Clays and Clay Technology, Dept. of Natl. Resources State California Bull. 169, pp. 196-254, (1955).
- Melo, A.L., Santana, H. e Silveira, L.T. - Geotecnia da Transamazônica Trabalho apresentado na II Reunião das

- Organizações Rodoviárias do Brasil em Conjunto com a International Road Federation Meeting-Brasília-DF. Brasil, 1972 .
- Michaels, A.S. - Attering Soil Properties with Chemicals. Industrial and Engineering Chemistry Vol. 47, Nº 11, 127th - Meeting A.C.S. Cincinnati, Ohio, (1955).
- Micheev, V. e Petrushin, V. - Properties of Salts as a Foundation Material in Industrial and Civil Engineering Osnov. Fund. Mech. Grunt. 15, Nº 1, pp. 17-20, (1973)..
- Minter (Ministério do Interior/SUDENE) - Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba, Boletim Técnico Nº 15 Serie Edafologia Nº 8, Rio de Janeiro - Brasil, 1972 .
- Mitchell, J.K. - Fundamentals of Soil Behavior, University of California, Berkely. Lonth Wiley & Sons, Inc. New York, 1976 .
- Moh, Z., Chieh. - Soil Stabolization with Cement and Sodium Additives, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Amer. Soc. of Civil Engrg. Vol. 88, Nº SM6 - December, (1962).
- Moore, R.K. - Tensile Properties for the Design of Lime-Treated Mixture. HRB - Highway Research Record 351, pp. 112-114, (1971).
- Newil, D,A, . Laboratory Investigation of Two Red Clays from Kenya Geotechnique, Vol. XI, Nº 4 pp. 302-318, (1961).
- O'Flaherty, C.A. - Highway Engineering Ed. Edward Arnold, 1978.

- O'Flaherty, C.A. e Gray, M.N. - The Influence of Alkali-Metal Compounds on the Compaction and Early Strength Properties of Limes and Mixtures. Austral Road, Res. 5, Nº. 5, pp. 4-15, (1974).
- Ogawa, T., Funada, S., Nakamura, T., Haslimoto, S., e Masui, N. - Studies on the Limitation of Soil Stabilization by the Addition of Sodium Chloride. Bull. Soc. Salt Science, Japan, Vol. 17, pp. 3-7, (1963).
- Ola, S.A. - The Potencial of Lime Stabilization of Lateritic Soils, Engineering Geology. Nº 11, pp. 305-317 (1977).
- Ormsby, W.C. e Bolz, L.H. - Microtexture and Composition of Reaction Products in the System Kaolin-Leime-Water, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 49, Nº 7, pp. 364-366, (1966).
- Ozier, J.M. e Moore, R.K. - Factores Affecting Unconfined Compressive Strength of Soil-Lime-Treated Clay. TRR, 641, pp. 12-17, (1977).
- Purdue University (1955) - Road Stabilization with Sodium Chloride. Progress Report on Research Project. Nº 16, Dec. 28, (1955).
- Qayyum, M.A. e Kemper, W.D. - Salt Concentration Gradients in Soils and Their Effects on Moisture Movement and Evaporation. Soil Science, Vol. 93 Nº 5, pp. 333-342, (1962).
- Queiroz de Carvalho - Soil Properties Affecting The Lime Stabilization of Red Tropical Soils From North East

- Brazil. Ph.D. Tesis. Depart. Civil Engng. University of Leeds-England, March, (1979).
- Queiroz de Carvalho - Amorphous Materils and Lime Stabi
lized, Soils, (1981).
- Reginatu, Robert, J., Nakayama, Francis e Miller, J. Ber
mett. - Reducing Supage from Stock Tanks with Uncompac
ted Sodium Treated Soils. Journal of Soil and Water
Couservation. September, Ouctober, pp. 214-215, (1978).
- Rico, Afonso e Del Castillo - Hernilo La Ingenharia de
Suelos em las Vias Terrestres. Ed. Limusa - México, Mé
xico, 1977 .
- Road, Research Laboratory - Soil Mecanics for Road Engi
neers H.M.S.O., Inglaterra, (1952).
- Rosenquist, I.T. - Considerations on the Sensitivity of
Norwagin Quick-Clays. Geotechnique, Vol. 3, pp. 195-200,
(1953).
- Salt Institute (1954) - Salt for Road Stabilization,
(1954).
- Sanborn, A.F. e Yoder, E.J. - Stabilization of Soil-
Aggregate Mixtures with Sodium Chloride. Progress Re
port Nº 1, Purdue University, (1956).
- Sandergren, E. - The Practical Use of Chemical and Physi
cal Changes in Cohesive Soils. Geol. Foren. Farh, 93,
Nº 544, pp. 157-162, (1971).
- Saw, J. Duncam - Introdução à Química dos Colóides e de

- Sheeler, J.B. - Sodium Chloride Stabilized Roads in Iowa. HRB Bull. 282, pp. 59-65, (1961).
- Schofield, A.N. - Consolidação pela Cal de uma Concreção de Laterita Granular Argilosa na Miassalândia, LNEC. Tradução do Overseas Bulletin Nº 3. Road Research Laboratory, (1962).
- Sherwood, R.T. - The Properties of Cement Stabilized Materials. R.R.I. Report LR 205, (1968).
- Skempton, A.W. - Soil Mechanics in Relation to Geology, Proceedings of the Yorkshire Geological Society, Vol. 29, Part. 1 Nº 3, (1953).
- Souza, Murilo Lopes - Dimensionamento de Pavimentos - DNER, (1966).
- Souza Santos, P.-Tecnologia de Argilas Vol. II Ed. Edgard Blucher. Ed. da USP, São Paulo-SP-Brasil, 1975 .
- Souza Santos, P. - Estudo sobre a Variação do Limite de Plasticidade de Três Argilas do Estado de São Paulo pelo Efeito de Alguns Aditivos. Cerâmica, 26 (128), Agosto, (1980).
- Somaserhara, P.Y. - Effect of Secondary Additives on the Strength of Soil-Lime M.S. Thesis, Department of Civil Engineering. MIT, (1960).
- SUDENE - Departamento de Solos, Mapa de Regiões Bioclimáticas e Mapa e Isoietas, Recife-Pe-Brasil.
- SUDENE - Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, Recife-Pe-Brasil.

- Terzaghi, K. e Peck, R.B. - Mecânica dos Solos na Prática de Engenharia. Ao Livro Técnico S.A. Rio de Janeiro. RJ, 1962 .
- Thompson, M.R. - Lime Reactivity of Illinois Soils, Journal of the Soil Mech. and Fund. Division, ASCE, pp. 67-92, September, (1966).
- Thornburn, T.H. e Mura Romeo - Stabilization of Soils with Inorganic A Review of the Literature, H.R.R. Nº 294, pp. 1-22, (1968).
- Townsend, F.C., Manke, P.G. e Parcher, U.V. - Effects of Remolding on the Properties of a Lateritic Soil. H.R.R. Nº 284, pp. 76-84, (1969).
- Towsend, F.C., Manke, P.G. e Parcher, J.V. - The Influence of Sesquioxides on the Lateritic Soil Properties. H.R.B. Nº 374, pp. 80-92, (1971).
- TRR - Transportation Research Circular. State of the Art. Lime Stabilization. Reactors, Properties Design, Construction, Nº 180, September, (1976).
- Vargas, Milton - Introdução à Mecânica dos Solos, São Paulo-Brasil, Ed. Mc Grawhill do Brasil. Ed. da Universidade de São Paulo, 1977 .
- Ventori, Leandro - Métodos de Análise do Solo. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Ministério da Agricultura - Brasil. Boletim Técnico Nº 7, Julho, (1969).
- Zolkov, Elias - Influence of Chlorides and Hydroxides of Calcium and Sodium on Consistency Limits of a Fat Clay. H.R.B. Bull. 309, pp. 109-115, (1962).

Williams, F.H.P., - The Laboratory Testing of Soils from Six Sites in Renya, Road Research Lab. Note N^o, 39, p. 11, (1961).

Willoughby, D.R. et alli - The Identification of Reaction Products in Sekali. Stabilized Clays by Electron Microscopy, Xoray and Electron Diffraction. Australian Road. Res. Board. Proc's, 4th Conf. Vol. 4, Part. 2, pp. 1386-1408, (1968).

Wissa, Amwar, E.Z., Halaby, Rurik - Chemical Stabilization of Selected Tropical Soils. (From Puerto Rico and Panamá). Publised in MIT, Research Report R 64-25, Soils Publication N^o 178, October, (1964).

Wood, F.O. - Salt Stabilization Research H.R.R. N^o, 294, pp. 42-25, (1968).

Yoming, A. - Tropical Soils and Soil Survey; Cambridge University Press. Inlaterra.

BIBLIOGRAFIA INDICADA

- Araldite AZ 15 - Impregnation of Kaolin, Indican Geotchn. N^o 3 pp - 244-249 (1972).
- Bally, R.I. - New Data on Loess Silification, Const. Materiale de Constructie, Buharest 22 N^o 10, pp-533-539 (1970).
- Blaser, H.D. e Scherer, O.J. - Expansion of Soils Containing Sodium Sulfate Caused by Drop in Ambient Temperatures. Highw. Res. Bd. Spec. Dep. N^o 103, pp-150-160, (1969).
- Bogossian, F. Azevedo, E.G. e Lopes, D.C.C. - Contribution to the Study Expansive Soils. Proc. Second. Int. Gongo Int. Assoc. Engng. Geology, São Paulo - Brazil, August Vol. 1, Theme IV-24, 1974.
- Brandel, H. - Reactions in Soil Buider and Soil Electrolyte Systems. Mitt. Inst, Grundb. n. Bodenmech TH Vienna N^o 11 pp - 25-43, (1970).
- Brandel, H. - The Modification of Physical Properties of Soil by the Admisture of Chemicals. Z. Kukturtechn, 12- N^o 4, pp - 206-220 e N^o 5, pp-275-279, (1971).
- Brandel, H. - Relationship Betmem Chemical and Physical Properties of Stabilized Soils. Z. Kukturtechn, 12- N^o 4, pp - 280-320 e N^o 5, pp - 295-329, (1971).
- El Rayah, H.M. E. e Rowell, D.L. - The Influence of Iron and Aluminum on the Swelling of Na - Montmorillonite and the Permeability of a Na Soil. J. Soil Sci. 2 N^o 1 pp - 137-144, (1973).

- Foster, R.H. e Gazzard, J.J. - The Influence of Polymeric Hydroxy Aluminium Cations on the Consolidation Shear Strength and Consistency Limits of Clay Soils. Geotechnique 25 N^o 3, pp - 513-525, (1975).
- Fosberg, P.E. - Sulphite by Treatment for Gravel Roads in South Africa. Proc. 3rd, Regional Conference for Africa on SM and FE, Vol. I, pp - 73-76, June, 1963.
- Gregg, J.S. - The Performance of Several Stabilized Roads and Some Concepts on Design. Proc. 3rd, Regional Conference for Africa on SM and FE, Vol. I, pp - 77-79, 1963.
- Gorbunov, N.I., Yudina, L.P., e Ryzhoya, L.V. - Sodium Ion Activity During the Interaction of Solonchets with Water and Gypsum. Soviet Soil Science Vol. 10, pp - 312 - 319, May-June, (1978).
- Gronko, G.J. - Review of Expansive Soils. J. Geotechn. Engng Div. Proc. ASCE 100, N^o GT6, pp-667-687, 1974.
- Quinet, M. - New Methods of Soil Stabilization, Baumasch, u. Bautechn. 17, N^o 12 pp-536-538, (1970).
- Horkins, E.R. Hammerquist, D.W. e Irby, D. - Investigation of Several Additives for Controlling the Expansion of Pierre Shale. H.R.R. N^o 381, pp-34-36, (1972).
- Ingles, O.G. - Mechanisms of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis. Aust. J. Soil Res. 8, (1970).
- Kanker, A. - Nomograph Earth Acceleration Calculation. Geotechnique 22, N^o 4, pp-667-668, (1972).

- Kézdi, A. e Nagyvati, B. - Effect of Additives on the Pro properties of Stabilized Soils. Acta Technn. Acad. Sci. Hung 68, N^o 314, pp - 283-291, (1970).
- Kirda, C. Nielsen, D.R. e Biggar, J.W. - Simultanens Trans port of Chloride and Water During Infiltration. Proc. Soil Sci, Svc. Amer, 37, N^o 3 - pp -339-345, (1973).
- Lambe, T.W. - The Effect of Polymers in Soil Properties. Pro ceedings, 3 rol International Conference, Vol. I, pp - 253-257, (1953).
- Lambe, T.W. - The Altering of Soil Properties with Chemi cals MIT (Massachusetts Institute of Technology, 1953).
- Lukas, R.G. e Guaedinger, R.J. - Seltlement and to Chemical Attack of Soils. Pardue Univ. Lafaeytte, Ind. USA Vol. 1, Part. 2, pp - 1087-1104, 1972.
- MaDowell, C. - Evaluation of Soil-Lime Stabilization Mixtu res. Highway Research Record, n^o 139, pp - 15-24, 1966.
- Ngnyeu, Dac Chi - Comparison of Moduli Obtained by Diffe rent Methods of Testing on Gravel-Saud Mixtures Treated with Hydraulic Binders. Bull. Lab. Dont. Ponts Chays. N^o 37, pp - 83-96, (1969).
- Packarol, R.G. - Alternate Methods for Measuring Freezethaw and Wet-Dry Resistance of Soil - Cement Mixtures. Highway Research Board, Bulletin, 353, pp - 8-41, (1962).
- Sandegren, E. - The Practical use of Chemical and Physical Clauges in Cohesive Soils. Synpunrterpa Praktisk Utnyt tjaude av. Keniska och Fysikakis. Geol. Foren, Forh 93 N^o 544, pp- 157-162, (1971).

- Sherwood, P.T. - Soil Stabilization by the Use of Chemical Ad Mixtures Road and Road Construction, London, Vol. 39, pp - 102-110, (1961).
- Shukla, E.P. - Stabilization of Soils by Chemical Treatment Proc. 1st Asian Conf. on Soil Mech Paper No III a VIII, 1960.
- Turnbull, W.J. - The Expansive Soil Problem on Subgrades of Pavements and Structures for Roads and Airfields. Zeimes_utone, Nat, Limestone Inst. 6, No 21, pp - 18-21, 25-27 , 43-60, (1969)
- Wang, M.C. Mitchell, J.K. - New Stress and Strain Gages for Measurements in Stabilized Soil Pavements. J. Mater No 4, pp - 774-787, (1971).
- Weingart, W. - Splitting Tensile Strength of Stabilized Soils. Strassi, 10, No 9, pp-493-500, (1970).

A P Ê N D I C E I

APÊNDICE I

TENSÃO DE RUPTURA A COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

As condições para determinação da tensão de ruptura a compressão não confinada principalmente com propósito rodoviário é uma questão ainda carente de uma tecnologia adequada, TRR (1976).

O método para avaliação da reatividade proposto por Thompson (1966) se adequa para inferir-se sobre o comportamento do sistema solo-cal no concernente a interação físico-química o mesmo ocorrendo com os métodos de Queiroz de Carvalho (1979) e Cabrera e Nawaknama (1980).

Queiroz de Carvalho (1979) admite que as condições de ensaio por ele utilizadas, isto é, corpos de prova moldados no teor de umidade ótima, curados por 28 dias em câmara úmida e rompidos por compressão não confinada não sejam talvez, condições reais.

O TRR (1976) revisando os critérios de dimensionamento de solo-cal mostra a dificuldade de estabelecer-se uma comparação entre os mesmos devido as diferentes condições sugeridas pelos mesmos.

A ABCP (1969) no seu critério para dimensionamento, de solo-cimento, sugere uma imersão por quatro horas dos corpos de prova antes da execução do ensaio de compressão.

A ótica de ensaio sugerida pelo MIT Ladd (1960)

em geral recomenda imersão por 24 horas dos corpos de prova solo-aditivo, antes do início do ensaio de compressão não confinada.

Assim sendo verifica-se que não existe um critério único para avaliação da tensão de ruptura à compressão não confinada. Se com, ou sem imersão dos corpos de prova antes do ensaio, que é uma condição algo realista.

Resultados de estudos recentes conduzidos por Nogueira (1979) demonstram que o teor de umidade das rodovias do estado da Paraíba, em geral, se encontravam a um valor mais baixo que o teor de umidade ótima, para locais razoavelmente drenados.

Diante destes fatos realizou-se um estudo paralelo, para observar os efeitos da imersão na tensão de ruptura a compressão não confinada (RCS) de mistura solo-aditivo sendo o escolhido o sistema solo-cal + traços de NaOH. Os valores da tensão de ruptura (RCS) encontram-se na Tabela Ap. I.

SISTEMA CAL + TRAÇOS DE NaOH.
Solo de MOPA (90 dias de cura)

RCS (4% de cal + 0,3% de NaOH, (kPa)	
Com imersão	723
Sem imersão	2499
RCS (4% de cal + 1,2% de NaOH, (kPa)	
Com imersão	688
Sem imersão	1739
RCS (4% de cal + 3,0% de NaOH, (kPa)	
Com imersão	605
Sem imersão	1995

Tabela ApI - Tensão de Ruptura a Compressão não Confinada do Solo MOPA com e sem Imersão.

Como pode ser observado na Tabela ApI a tensão de ruptura à compressão não confinada (RCS) mensurada após imersão durante 24 horas em relação a tensão de ruptura (RCS) mensurada sem esta imersão, para um tempo de cura de 90 dias variou da seguinte maneira: para a adição de 0,3% de NaOH de 246% (de 723 kPa para 2499 kPa); para a adição de 1,2% de NaOH 153% (de 688 kPa para 1739 kPa); para a adição de 3,0% de NaOH 230% (de 605 kPa para 1995 kPa).

Ora os resultados da tensão de ruptura (RCS) sem imersão foram no mínimo 153% mais elevadas que com imersão podendo-se inferir deste aspecto que a tensão de ruptura (RCS) sem imersão é superior a com imersão e que a metodologia de avaliar a tensão de ruptura após imersão é bem mais desfavorável que a sem imersão.

Tendo por respaldo, também este estudo limitado para avaliar a tensão de ruptura de (RCS) do solo no estado natural foram moldados os corpos de prova (do solo natural) e determinada a tensão de ruptura (RCS) sem imersão, visto que os corpos de prova, sem aditivo, não resistiram à imersão por 24 horas, desagregando completamente. Os valores da tensão de ruptura a compressão não confinada sem imersão RCS (*), encontram-se nas Tabelas 6.18.1, 6.18.2, 6.18.3 e 6.19.1 tendo apenas uma conotação qualitativa no presente estudo.

A Figura ApI mostra em forma de gráfico a relação entre a tensão de ruptura (RCS) para o solo de MOPA tratado com cal + traços de NaOH com e sem imersão.

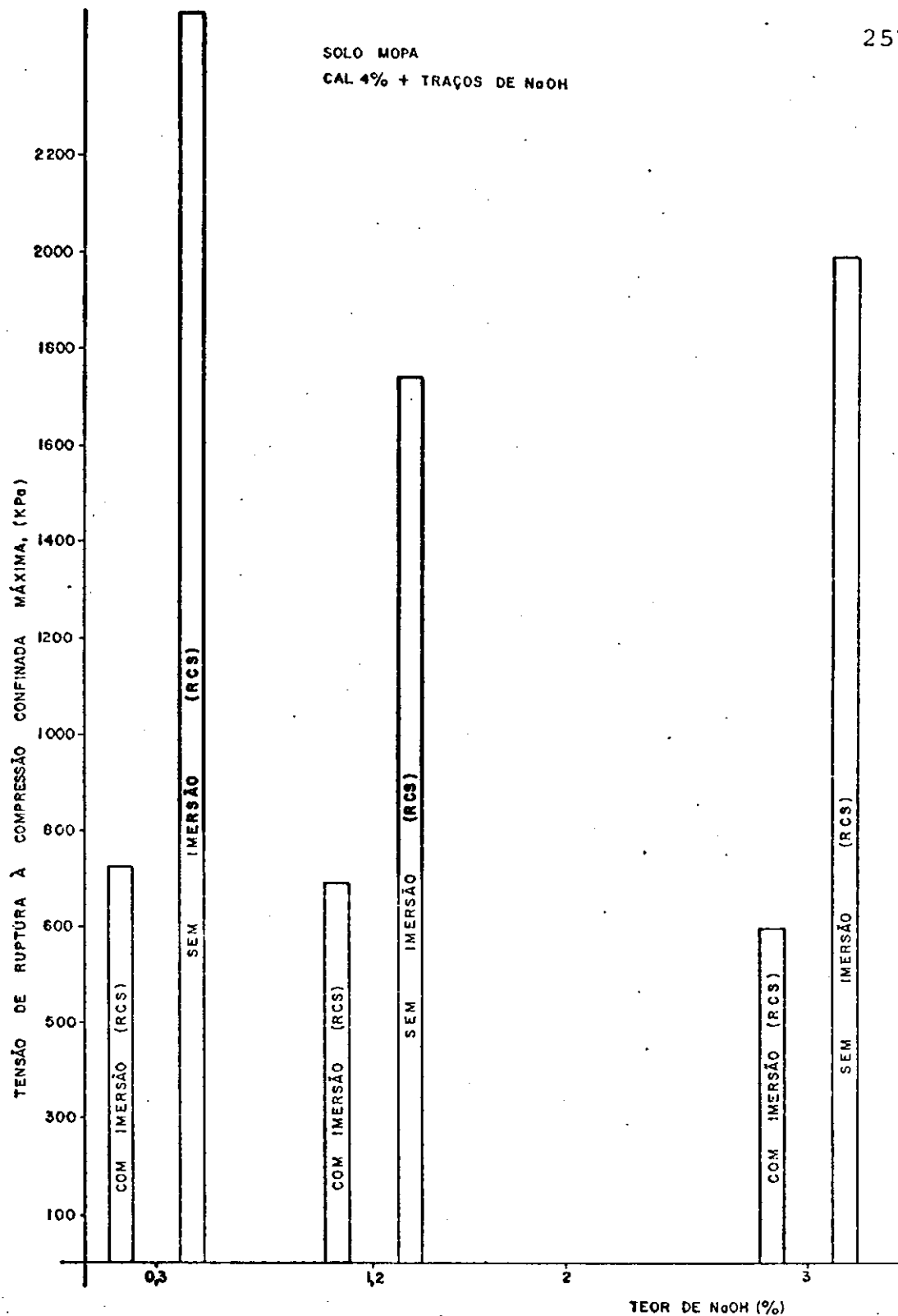


Figura ApI - Tensão de Ruptura à Compressão não Confinada com e sem Imersão para o Solo de MOPA Tratado com Cal + Traços de NaOH.

A P E N D I C E I I

APÊNDICE II

ÍNDICE DE ATIVIDADE

O índice de atividade dos solos está mostrado na Tabela Ap. II e foram calculados em consonância com o preconizado com as sugestões de Skempton (1953) (*) e Williams (1961) (**).

Como pode ser observado na Tabela Ap. II os valores do índice de atividade variaram de 0,64 a 0,99 segundo definição de Skempton e de 0,15 a 0,30 segundo definição de Williams.

Solos	IP (%)	Teor Argila (2,0 m) (%)	Índice de Atividade (Skempton) (Williams)	
TEPB	15,0	16,0	0,94	0,26
CTPB	6,4	10,0	0,64	0,15
ARPB	10,9	11,0	0,99	0,29
CAPI	6,1	9,5	0,64	0,16
MOPA	19,4	21,0	0,94	0,30

Tabela Ap. II - Índice de Atividade dos Solos

(*) Segundo Skempton o índice de atividade dos solos é definido como $I_a(s) = IP/(\%)$ da fração menor que 2 mm

(**) Segundo Williams o índice de atividade dos solos é definido como $I_a(w) = IP/(\%)$ da fração menor que 0,42 mm

Utilizando-se a classificação de atividade dos so los proposta por Skempton (1953) (*), pode-se enquadrar os so los estudados como inativos do grupo 2 a normal do grupo 3.

-
- (*) Grupo 1 - Inativa com atividade menor que 0,50
Grupo 2 - Inativa com atividade entre 0,50 e 0,75
Grupo 3 - Normal com atividade entre 0,75 e 1,25
Grupo 4 - Ativa com atividade entre 1,25 e 2
Grupo 5 - Ativa com atividade maior que 2.

A P Ê N D I C E I I I

APÊNDICE III

CLASSIFICAÇÃO DE ENGENHARIA DOS SOLOS

Segundo Cabrera (1979) um sistema de classificação útil do ponto de vista do engenheiro civil é aquele que permite agrupar materiais usando uma ou várias propriedades que podem ser mensuradas sem grande dificuldade e com a condição de que a variabilidade destas propriedades sejam menores que a variabilidade entre os grupos.

A utilização de uma classificação de solos existente na prática da mecânica dos solos, para classificar solos vermelhos tropicais, é muito limitada. Em decorrência das propriedades que servem para classificar solos de regiões temperadas terem um intervalo de variação muito grande, quando aplicadas a solos de regiões tropicais.

As classificações típicas utilizadas na engenharia civil foram desenvolvidas como um aprimoramento do uso de um simples parâmetro e uma ajuda do critério intuitivo característico do engenheiro civil, sendo em geral de difícil flexibilidade como também de difícil comunicação. Para se reconhecer grupos neste tipo de classificação os mesmos têm que ser claramente bem definidos. Geralmente nestas classificações de engenharia os parâmetros para definir os grupos estão baseadas na granulometria e plasticidade dos solos e não levam em considerações propriedades "in situ" dos solos nem consideram o perfil do solo, exceto nas classificações que são usadas para o estudo e prognóstico do comportamento de taludes e fundações de estruturas, conforme Cabrera (1979).

Queiroz de Carvalho (1979) critica os sistemas clássicos de mecânica dos solos por não selecionarem os solos em relação a sua provável estabilização principalmente em regiões tropicais propondo um novo sistema de classificação baseado na reatividade à cal.

No momento uma classificação que desperta grande atração nos engenheiros civis é a Classificação Unificada de Casagrande modificada para sua aplicação em solos vermelhos tropicais originada nos trabalhos de Vallerga et alli (1969) (*) que estudaram solos da Tailândia. Não obstante seu uso seja aceito pela maioria dos pesquisadores de solos, a maior crítica a esta classificação é devida a modificação ao clássico sistema unificado (SUCS) que é muito empírica, falhando esta classificação quando tenta produzir grupos nos quais as propriedades mensuradas variam em intervalo menor que a variação geral contudo seu uso é recomendado por Gidgasu (1976) e será utilizada no presente estudo para avaliar as modificações na classificação dos solos pela adição de cal, NaOH e NaCl.

Os resultados dos estudos desenvolvidos nesta pesquisa permitem classificar os solos como mostrado na Tabela AP III.

(*) Vallerg, B.A., Shuster, J.A., Love, A.L. e Vantile - Engineering Study of Laterite & Lateritic Soils in Connection with Construction of Roads, Highways, & Airfields - Contract No. AID/CSD 1850 - USAID Woodward-Clyde & Associates Miller-Warden-Werthern Inc. Materials Research & Development, Inc. Southeast Asia (Thailand), June, 1969.

SOLOS	HRB	SUCS (Extendida)	$\frac{S_1 O_2}{R_2 O_3}$	FAO UNESCO COMPROMISSO
TEPB	A-2-6	SC/CI	SL	FE
CTPB	A-2-4	GC/CL	SL	FE
ARPB	A-2-6	GM/MI	SL	FE
CAPI	A-2-4	GC/CL	SL	FE
MOPA	A-4	GM/MI	SL	FE

SL = solo lateríticos

PE = ferralsolos

Tabela AP III - Classificação dos Solos por Diferentes Critérios.

A Figura AP III-1 apresenta um resumo da classificação SUCS (extendida).

A adição de cal, NaOH, e NaCl modificou a classificação SUCS (extendida) dos solos; este comportamento pode ser visto em forma de gráfico na Figura AP III-2.

EXTENDED UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

CLASSIFICATIONS TO BE MADE ON ALL SOIL MATERIALS					Soundness Classification to be made on Aggregates if desired	
ROCK	Gravel or Rock greater than 8 inches		Boulder	Large crushed or weathered rock fragments		
	Gravel or Rock between 3 inches and 8 inches		Cobble	Medium sized crushed or weathered rock fragments		
GRAVEL	Gravel or rock smaller than 3" in which the majority of the material retained on the # 200 sieve is also retained on the # 4 sieve	CLEAN	$C_u > 4$ $1 < C_c < 3$	GW	Well graded gravels with very few fines	Perform the California Coarse Durability Test** on the natural, or as used, grading of the 3/4" to #4 fraction of the material. Add symbol: $D_p > 35$ use symbol (1) $20 < D_p < 35$ use symbol (2) $D_p < 20$ use symbol (3) i.e., GCI(2)
		DIRTY	6 - 12% passing # 200	GW/-	Well graded gravels with silt or clay fines	
		EXCESS FINES	> 12% passing # 200	GP/-	Poorly graded gravels with silt or clay fines	
				GM/-	Gravel - sand - silt mixtures of variable plasticity	
SAND	Majority of the material retained on the # 200 sieve passes the # 4 sieve	CLEAN	$C_u > 6$ $1 < C_c < 3$	SW	Well graded sands with very few fines	Perform the California Fine Durability Test** on the natural, or as used, grading of the minus # 4 material. Add symbol: $D_p > 35$ use symbol (1) $20 < D_p < 35$ use symbol (2) $D_p < 20$ use symbol (3)
		DIRTY	6 - 12% passing # 200	SW/-	Well graded sands with clay or silt fines	
		EXCESS FINES	> 12% passing # 200	SP/-	Poorly graded sands with clay or silt fines	
				SM/-	Clayey - silty sands of variable plasticity	
CLAY AND SILT	Non-Plastic	Atterberg limits unobtainable		SP	Very fine sands, silty - silts, silts	
		Atterberg limits plot above "A" line		CL	Inorganic clayey silts, clays of low plasticity	
	LL of minus #40 material < 35	Atterberg limits plot below "A" line or in hatched area		ML	Inorganic silts, and rock flour of low compressibility	
		Atterberg limits plot above "A" line		CL	Organic silts and clays	
	LL of minus #40 material 35 to 50	Atterberg limits plot above "A" line		CI	Inorganic clays of moderate plasticity	
		Atterberg limits plot below "A" line		MI	Inorganic silty clays, sandy clays, moderately compressible silts	
	LL of minus #40 material > 50	Atterberg limits plot above "A" line		OI	Organic clays and silts	
		Atterberg limits plot below "A" line		CH	Inorganic clays of high plasticity	
		Atterberg limits plot below "A" line		MH	Highly compressible silts, micaceous or diatomaceous soils	
		Atterberg limits plot below "A" line		OH	Organic clays and silts	
Decaying organic soils usually brown or black possibly with strong odor				P _T	Fibrous organic soils with very high compressibility and moisture content	

* $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$, the term D_{10} , etc., means the diameter of the particle corresponding to the 10% passing point on the plot of grain size versus percent passing.

** California State Highway Department, Materials Division, Sacramento, California, Test Procedure 229-D.

Figura Ap III-1 - Classificação dos Solos, SUCS estendida
Proposta por Vallerga et alli 1969.