

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLOS
ESTABILIZADOS COM CAL, EM PÓ E EM PASTA, PARA
APLICAÇÃO EM RODOVIAS DO ESTADO DO CEARÁ**

Arielton Fonteles Araújo

ORIENTADORA: Prof^a. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

**Fortaleza
2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLOS
ESTABILIZADOS COM CAL, EM PÓ E EM PASTA, PARA
APLICAÇÃO EM RODOVIAS DO ESTADO DO CEARÁ**

Arielton Fonteles Araújo

**Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Transportes.**

ORIENTADORA: Prof^a. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

**Fortaleza
2009**

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, ARIELTON FONTELES ARAÚJO

Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará, 2009.

175 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

1. Solo-Cal

2. Estabilização

3. Pavimentação

4. Rodovia

CDD 888

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, A. F. (2009). Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 175 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arielton Fonteles Araújo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará. Fortaleza.

Mestre/2009

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Arielton Fonteles Araújo
Av. Deputado Oswaldo Studart, 338, Fátima
60.411-260 – Fortaleza/CE – Brasil

AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL, EM PÓ E
EM PASTA, PARA APLICAÇÃO EM RODOVIAS DO ESTADO DO CEARÁ.

Arielton Fonteles Araújo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

Prof^ª. Suelly Helena de Araújo Barroso, Dra. Eng.
(Orientadora)

Prof. Ernesto Ferreira Nobre Junior, Dr. Eng.
(Examinador Interno)

Profa. Sandra de Aguiar Soares, Dc. Sc.
(Examinadora Interna)

Profa. Liedi Légi Bariani Bernucci, Dra. Eng.
(Examinadora Externa)

FORTALEZA, CE – BRASIL

JANEIRO DE 2009

DEDICATÓRIA

A Deus, que me deu sabedoria e paz de espírito,
permitindo que eu realizasse essa dissertação.

Aos meus pais, Ari e Graça, pelo amor,
companheirismo e dedicação de toda uma vida.

Aos meus irmãos, Joari e Ariane, pelo carinho,
apoio e torcida.

À minha namorada Greicy, a quem tanto estimo e
admiro.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve ao meu lado e permitiu que esta pesquisa fosse realizada.

Aos meus pais, pelo carinho, amor, incentivo e companheirismo, sem os quais esse trabalho não teria chegado ao fim.

À minha orientadora Suelly Helena de Araújo Barroso pela paciência, incentivo e disponibilidade dedicados durante todo o decorrer do trabalho.

À minha namorada Greicy Coelho de Souza, por sua dedicação, paciência e companheirismo.

Aos meus irmãos, Joari e Ariane, pela torcida, apoio e orações.

Aos meus amigos Rômulo Jácome de Mesquita e Márcio Muniz, pelo companheirismo e apoio incessante prestado para a realização dessa pesquisa.

A todo o grupo do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), em especial aos amigos Rômulo, Márcio, Marcondes, Henrique Cassaco, Nobre Rabêlo, Lucimar, Pedro, Manuela e Annie Karine, pelo apoio incondicional.

À Professora e companheira de mestrado Lilian Gondim, por toda a ajuda prestada para melhoria e finalização desse trabalho.

Ao professor Franklin Chaves e ao Engenheiro Paulo Loiola, pela solução de dúvidas e pelas grandes contribuições técnicas dadas a este trabalho.

À CARBOMIL pela cessão do estabilizante utilizado nesta pesquisa e, em especial, ao Engenheiro Químico Crisanto Prado Santiago, funcionário dessa empresa, pela atenção e disponibilidade.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela minha bolsa de mestrado.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial aos Professores Jorge Barbosa Soares e Ernesto Ferreira Nobre Junior pelos conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, Carlos Germano e Roberto, por toda ajuda e apoio prestados na realização dos ensaios.

A todos os meus amigos e familiares, pelos momentos de descontração e descanso, e dos quais furtei momentos preciosos durante todo o período em que realizei esta pesquisa.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para
obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes

AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CAL, EM PÓ E
EM PASTA, PARA APLICAÇÃO EM RODOVIAS DO ESTADO DO CEARÁ.

Arielton Fonteles Araújo

Janeiro/2009

ORIENTADOR(A): Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

A região do Agropólo do Baixo Jaguaribe desempenha um importante papel no cenário econômico e social do estado do Ceará, propiciando, a cada dia, novas oportunidades para o desenvolvimento local de atividades relacionadas à agricultura irrigada e aos agronegócios. Verifica-se, contudo, que a infra-estrutura rodoviária da região encontra-se muito precária, apresentando fatores, como a falta de solos adequados e os limitados recursos financeiros, que acabam inviabilizando economicamente os investimentos na melhoria da malha rodoviária local. Torna-se então necessária a busca por alternativas tecnológicas que permitam a redução dos custos de implantação e melhoria de pavimentos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica do uso da cal na estabilização de solos ocorrentes no Agropólo do Baixo Jaguaribe, estado do Ceará, para o emprego em camadas nobres de rodovias. Nesse trabalho foram selecionadas duas amostras de solos da região para o estudo da estabilização com a inserção da cal. Foram analisadas duas formas de aplicação do estabilizante ao solo: uma delas diluída na água de compactação (método proposto) e a outra em pó (método convencionalmente utilizado). As outras variáveis investigadas na pesquisa relacionaram-se com os teores da cal aplicados (3%, 5% e 7%), os tempos de cura aos quais as misturas foram submetidas (0, 7, 14, 28 e 90 dias) e a variação das energias de compactação, normal e intermediária, utilizadas em alguns ensaios específicos. As misturas estabilizadas foram submetidas a dois métodos de dosagem: um analisando o comportamento químico das amostras, por meio da evolução dos valores de pH, e o outro analisando o comportamento mecânico, por meio da evolução dos valores de resistência à compressão simples. As misturas produzidas em laboratório foram submetidas também a avaliação da resistência mecânica por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Foi verificado que a estabilização química realizada através da adição da cal (em pó e em pasta) proporcionou o incremento de resistência nas amostras naturais dos solos estudados, em função de algumas características físicas e químicas dos mesmos. Com base nos ensaios realizados, verificou-se uma melhor aplicabilidade da cal no processo de estabilização de um dos solos estudados.

Abstract of the Dissertation submitted to PETRAN/UFC as part of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.) in Transports Engineering

EVALUATION OF SOILS MIXTURES STABILIZED WITH LIME (IN POWDER AND DILUTED IN WATER) FOR APPLICATION IN HIGHWAYS IN THE STATE OF CEARA.

Arielton Fonteles Araújo

January/2009

ADVISOR: Prof^ª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso

The Baixo Jaguaribe's Agricultural Pole plays an important role in the socio-economic scenario in the State of Ceara. This agriculture pole has been promoting new opportunities for the development of irrigated agriculture and agribusiness; nevertheless, its highway infrastructure is poor. The region's lack of appropriate soil coupled with limited financial resources make economically unfeasible any effort to improve the road network. Therefore, it is necessary to search for technological alternatives that allow both the reduction of implantation costs and the pavement improvement. The objective of this study was to evaluate the technical viability of using lime to stabilize the soil at the Baixo Jaguaribe's Agricultural Pole, Ceara, to be used in noble layers of highway. Two samples from the region's soil were selected for this study in order to investigate the soil stabilization after adding lime. Two methods of administering the stabilizer to the soil were analyzed: in the first one, the lime was diluted in the compacting water (experimental method) and, in the second one, the lime powder was directly administered (control method). Other variables investigated in this study are a) the rate of lime administered (3%, 5%, and 7%), b) the curing time to which the mixtures were administered (0, 7, 14, 28, and 90 days), and c) the compacting energy variation, normal and intermediate, used in some specific tests. The stabilized mixtures were submitted to two dosage methods: one analyzed the samples' chemical performance through the pH values evolution and the other one analyzed the samples' mechanic performance through the resistance to simple compression values evolution. The mixtures produced in the laboratory were also submitted to mechanic resistance evaluations through the compression strength test, the diametrical compression test, and the resilience modulus test. It was observed that the chemical stabilization obtained by adding lime (powder or diluted in water) promoted improvement at the analyzed soil samples due to some of the soil physical and chemical features. Based on these analyses, the best outcome by adding lime to stabilize the soil was observed in one of the investigated soils.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. PROBLEMA E RELEVÂNCIA DO TEMA	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.4. O MÉTODO	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5

CAPÍTULO 2: ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS APLICADA À PAVIMENTAÇÃO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS - CONCEITUAÇÃO	8
2.3. TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO	9
2.3.1. Estabilização Mecânica	9
2.3.1.1. <i>Compactação</i>	10
2.3.1.2. <i>Estabilização Granulométrica</i>	10
2.3.2. Estabilização Química.....	10
2.4. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL	12
2.4.1. Conceituação	12
2.4.2. Breve Histórico	13
2.4.3. Componentes das Misturas Solo-Cal	18
2.4.3.1. <i>A Cal</i>	18
2.4.3.2. <i>O Solo</i>	22
2.4.4. Reações Solo-Cal	24
2.4.5. Fatores que Influenciam no Processo de Estabilização Solo-Cal	32
2.4.6. Produção da Cal no Brasil e em Outros Países	35
2.4.7. Produção da Cal no Estado do Ceará	38
2.4.8. Processo Construtivo de Misturas Estabilizadas pela Cal.....	40
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
3.2. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A ÁREA DE ESTUDO	46
3.3. SELEÇÃO DOS MATERIAIS	53
3.3.1. Solos	53
3.3.2. Cal	56
3.3.3. Água	56
3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	56

3.4.1.	Considerações Gerais	56
3.4.2.	Misturas	59
3.4.3.	Dosagem	62
3.4.4.	Caracterização	64
3.4.4.1.	<i>Análise Granulométrica</i>	64
3.4.4.2.	<i>Limites de Atterberg</i>	64
3.4.4.3.	<i>Ensaio de Compactação</i>	64
3.4.5.	Ensaio Químico	64
3.4.6.	Ensaio de Resistência	65
3.4.6.1.	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão</i>	65
3.4.6.2.	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples</i>	65
3.4.6.3.	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	66
3.4.6.4.	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	67
3.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	74
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	75
4.2.1.	Caracterização Geotécnica	75
4.2.1.1.	<i>Amostra Am-A</i>	75
4.2.1.2.	<i>Amostra Am-B</i>	77
4.2.2.	Análise Química	79
4.2.2.1.	<i>Capacidade de Troca Catiônica (CTC)</i>	79
4.2.2.2.	<i>Atividade das Argilas (Tr)</i>	81
4.2.2.3.	<i>Potencial Hidrogeniônico (pH)</i>	82
4.3.	DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CAL	83
4.3.1.	Método de Eades e Grim (1966)	83
4.3.2.	Método de Thompson (1966)	89
4.4.	LIMITES DE ATTERBERG PARA AS MISTURAS DE SOLO-CAL	91
4.4.1.	Amostra Am-A	91
4.4.2.	Amostra Am-B	91
4.4.3.	Efeitos da Cal nos Limites de Consistência dos Solos Estudados	92
4.5.	CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO	93
4.6.	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)	100
4.7.	EXPANSÃO	103
4.8.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	105
4.8.1.	Resultados da RCS em Função do Tempo de Cura em Dias e do Teor de Cal (Ensaio Convencionais)	106

4.8.1.1.	<i>Amostra Am-A</i>	107
4.8.1.2.	<i>Amostra Am-B</i>	113
4.8.1.3.	<i>Influência do Tipo de Solo Utilizado</i>	117
4.8.2.	Resultados da RCS em Função do Tempo de Espera da Mistura Solo-Cal (Ensaio Não Convencionais).....	117
4.9.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)	121
4.9.1.	Amostra Am-A	122
4.9.2.	Amostra Am-B	124
4.9.3.	Influência do Tipo de Solo Utilizado	125
4.9.4.	Influência entre RCS e RTCD Para as Misturas de Solo-Cal Analisada	126
4.10.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA	127
4.10.1.	Modelo Composto	131
4.10.1.1.	<i>Solo Am-A</i>	135
4.10.1.2.	<i>Solo Am-B</i>	143
4.11.	ANÁLISE MECANÍSTICA DE PAVIMENTOS	151
4.12.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		
5.1.	CONCLUSÕES	156
5.1.1.	Considerações Iniciais	156
5.1.2.	Principais Resultados.....	156
5.1.2.1.	<i>Quanto à Caracterização Geotécnica e a Análise Química dos Solos Naturais</i>	156
5.1.2.2.	<i>Quanto aos Métodos de dosagens das Misturas de Solo-Cal</i>	156
5.1.2.3.	<i>Quanto aos Ensaio de Consistência, Compactação, ISC e Expansão</i>	158
5.1.2.4.	<i>Quanto aos Resultados dos Ensaio de RCS</i>	159
5.1.2.5.	<i>Quanto aos Resultados dos Ensaio de RTCD</i>	16162
5.1.2.6.	<i>Quanto aos Resultados dos ensaios de MR</i>	163
5.1.2.7.	<i>Quanto ao Dimensionamento do Pavimento Proposto</i>	163
5.1.3.	Principais Conclusões	164
5.2.	PRINCIPAIS SUGESTÕES	165
5.2.1.	Proposta Preliminar Para Investigação da Compatibilidade da Cal Com o Solo.....	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa do estado Ceará contendo o agropólo do Baixo Jaguaribe na época da implantação deste (adaptado de IPECE, 2007).....	2
Figura 2.1 - Via Ápia (GUIMARÃES, 2002).	14
Figura 2.2 - Trecho Limoeiro do Norte/Flores (Arquivo pessoal do Eng. Paulo Roberto Reis Loiola).....	17
Figura 2.3 - Trecho da rodovia do Melão em execução (LOYOLA e BARROSO, 2007).	18
Figura 2.4 - Rodovia do Melão após 6 anos de funcionamento (LOYOLA e BARROSO, 2007).	18
Figura 2.5 - Fluxograma de fabricação e industrialização da cal (GUIMARÃES, 2002).	20
Figura 2.6 - Reservas de Calcários e Dolomitos no Brasil em milhões de toneladas, referentes ao ano de 1990 (GUIMARÃES, 2002).	21
Figura 2.7 - Formação de uma camada de água difundida ao redor da partícula de argila (LITTLE, 1995).....	24
Figura 2.8 - Reação de troca de cátions (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).	26
Figura 2.9 - Mudança textural ocorrida devido ao fenômeno da troca de cátions seguido pela floculação e aglomeração (LITTLE, 1995).....	27
Figura 2.10 - Mecanismo de estabilização das misturas de solo-cal (INGLES e METCALF, 1972).....	30
Figura 2.11 - Esquema de fatores que influenciam as reações solo-cal (GUIMARÃES, 2002).....	32

Figura 2.12 - Produção Geral (ABPC, 2007).	36
Figura 2.13 - Mercado livre (ABPC, 2007).....	36
Figura 2.14 - Produção no mercado livre de cal, na forma virgem ou hidratada, referentes ao ano de 2006 (ABPC, 2007).	37
Figura 2.15 - Áreas de consumo da cal no Brasil referentes ao ano de 2006 (ABPC, 2007).	37
Figura 2.16 - Processo de fabricação industrial das cales da Carbomil Química S/A (Fonte: Própria).....	39
Figura 2.17 - Fábrica da carbomil Química S/A em Limoeiro do Norte-CE.	40
Figura 2.18 - Escarificação (NLA, 2004).	41
Figura 2.19 - Posicionamento de sacos de cal (IFG, 2005).	41
Figura 2.20 - Espalhador mecânico para a aplicação da cal em pó (NLA, 2004).	41
Figura 2.21 - Exemplo de aplicação da pasta de cal com o espalhador pneumático (NLA, 2004).	42
Figura 2.22 - Enleiramento lateral do solo para contenção da cal antes do processo de mistura (NLA, 2004).	42
Figura 2.23 - Escarificação e pulverização após a distribuição da cal em pó (NLA, 2004).	42
Figura 2.24 - Adicionamento de água após a aplicação da cal em pó (NLA, 2004).....	43
Figura 2.25 - Mistura da cal ao solo simultaneamente a adição de água (IFG, 2005).	43
Figura 2.26 - Rolo pé-de-carneiro (NLA, 2004).	44
Figura 2.27 - Rolo liso (NLA, 2004).	44

Figura 2.28 - Cura por imprimação betuminosa (NLA, 2004).	45
Figura 3.1 - Mapa do Ceará e seus agropólos (GIRÃO, 2000).	47
Figura 3.2 - Divisão municipal e localização em coordenadas geográficas do agropólo do Baixo Jaguaribe (SEAGRI, 2006).	48
Figura 3.3 - Mapa climático do Agropólo do Baixo Jaguaribe (IPECE, 2007).	51
Figura 3.4 - Mapa Topográfico do Agropólo do Baixo Jaguaribe (IPECE, 2007).	52
Figura 3.5 - Mapa pedológico do agropólo do Baixo Jaguaribe (adaptado do INPLANCE, 2007 por RABÊLO, 2006).....	52
Figura 3.6 - Coleta de Solo (Am -A).	54
Figura 3.7 - Coleta de Solo (Am-B).	54
Figura 3.8 - Mapa de localização das jazidas estudadas e da fábrica da cal (Carbomil) que disponibilizou o estabilizante utilizado nesta pesquisa.	55
Figura 3.9 - Esquema simplificado do programa experimental.	57
Figura 3.10 - Método de ensaio da cal em pasta.	60
Figura 3.11 - Misturas de solo-cal (dosagem).	60
Figura 3.12 – Misturas de solo-cal (ensaios de resistência).	61
Figura 3.13 - pHmetro utilizado na pesquisa.	63
Figura 3.14 - Molde cilíndrico tripartido usado no ensaio de compressão simples.	65
Figura 3.15 - Exemplo de resultados gráficos pelo SiCAEP após o ensaio triaxial.	68
Figura 3.16 – Tela gerada pelo SiCAEP durante a realização do ensaio triaxial.	68
Figura 3.17 - Figura esquemática de um equipamento utilizado no ensaio triaxial dinâmico (MEDINA & MOTTA, 2005).	70
Figura 3.18 - Colocação do corpo-de-prova (CP) sobre a pedra porosa.	71

Figura 3.19 - Colocação do cabeçote sobre o CP.	71
Figura 3.20 - Fixação dos LVDTs ao cabeçote (vista superior).	71
Figura 3.21 - Fixação dos LVDTs ao cabeçote (vista frontal).	71
Figura 3.22 - Colocação do cilindro da célula triaxial.	71
Figura 3.23 - Liberação do ar comprimido.	71
Figura 3.24 – Classificação resiliente (DNIT, 2006).	72
Figura 4.1- Distribuição granulométrica da amostra de solo Am-A (DNER ME 051/94).	76
Figura 4.2- Distribuição granulométrica da amostra de solo Am-B (DNER ME 051/94).	78
Figura 4.3- Variação do pH com o teor de cal e tempo de cura (Am-A).	85
Figura 4.4 - Variação do pH com o teor de cal e tempo de cura (Am-B).....	85
Figura 4.5 - Dosagem Thompson (Solo Am-A).	89
Figura 4.6 – Dosagem Thompson (Solo Am-B).	89
Figura 4.7 – Curvas de compactação (solo Am-A e misturas de solo mais cal em pó).	93
Figura 4.8 – Curvas de compactação (solo Am-A e misturas de solo mais cal em pasta).	94
Figura 4.9 – Curvas de compactação (solo Am-B e misturas de solo mais cal em pó).	94
Figura 4.10 – Curvas de compactação (solo Am-B e misturas de solo mais cal em pasta).....	95

Figura 4.11 – Resultados do ensaio de compactação em função do teor de cal (amostra Am-A).	97
Figura 4.12 – Resultados do ensaio de compactação em função do teor de cal (amostra Am-B).	98
Figura 4.13 – Comparativo entre os resultados de massa específica aparente seca máxima para as misturas estabilizadas (amostra Am-A).	99
Figura 4.14 – Comparativo entre os resultados de umidade ótima para as misturas estabilizadas (amostra Am-A).	99
Figura 4.15 – Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-A.	101
Figura 4.16 – Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-B.	101
Figura 4.17 – Comparativo entre os valores de ISC quanto ao tipo de energia de compactação aplicada (amostra Am-A).....	103
Figura 4.18 – Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de RCS.	105
Figura 4.19 – Formas de ruptura para as amostras submetidas ao ensaio de RCS (ASTM D5102).....	106
Figura 4.20 – Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-A mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.	108
Figura 4.21 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A. mais 3% de cal (em pó e em pasta).....	111

Figura 4.22 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A mais 5% de cal (em pó e em pasta).	112
Figura 4.23 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A mais 7% de cal (em pó e em pasta).	112
Figura 4.24 – Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-B mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.	113
Figura 4.25 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 3% de cal (em pó e em pasta).	115
Figura 4.26 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 5% de cal (em pó e em pasta).	116
Figura 4.27 – Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 7% de cal (em pó e em pasta).	116
Figura 4.28 – Ensaio não convencionais: Am-A.	119
Figura 4.29 – Ensaio não convencionais: Am-B.	119
Figura 4.30 – Evolução dos valores da RTCD para as misturas de solo Am-A mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.	123
Figura 4.31 – Evolução dos valores da RTCD para as misturas de solo Am-B mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.	124
Figura 4.32 – Relação entre RTCD e RCS para as amostras de solo Am-A mais cal.	126

Figura 4.33 – Relação entre RTCD e RCS para as amostras de solo Am-B mais cal.	127
Figura 4.34 – Algoritmo executado no programa MatLab para geração de gráficos em 3D do comportamento resiliente das amostras naturais de solo e misturas de solo-cal, analisadas neste trabalho.....	134
Figura 4.35 – Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-A (modelo composto).....	135
Figura 4.36 – Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-A (classificação do DNIT, 2006).....	136
Figura 4.37 – Comportamento resiliente do solo Am-A e das misturas de solo Am-A mais cal em pó, ensaiadas após a moldagem dos CPs.	137
Figura 4.38 - Comportamento resiliente do solo Am-A e das misturas de solo Am-A mais cal em pasta, ensaiadas após a moldagem dos CPs.	137
Figura 4.39 - Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pó após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.....	138
Figura 4.40 - Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pasta após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.....	139
Figura 4.41 - Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pó impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.....	141
Figura 4.42 – Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pasta impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.....	142

Figura 4.43 - Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-B (modelo composto).....	144
Figura 4.44 - Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-B (classificação do DNIT, 2006).....	144
Figura 4.45 - Comportamento resiliente do solo Am-B e das misturas de solo Am-B mais cal em pó, ensaiadas após a moldagem dos CPs.....	145
Figura 4.46 - Comportamento resiliente do solo Am-B e das misturas de solo Am-B mais cal em pasta, ensaiadas após a moldagem dos CPs.	145
Figura 4.47 – Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pó após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.....	146
Figura 4.48 – Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pasta após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.....	147
Figura 4.49 – Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pó impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.....	149
Figura 4.50 – Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pasta impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.....	150
Figura 4.51 – Estrutura de pavimento analisada.....	152
Figura 5.1 – Proposta preliminar para investigação da compatibilidade da cal com o solo.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Guia do tipo de estabilização mais efetiva.....	11
Tabela 2.2 - Composição do perfil da “Via Ápia” (GUIMARÃES, 2002).....	15
Tabela 2.3 - Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas..	19
Tabela 2.4 - Composição das cales brasileiras.....	22
Tabela 2.5 - Classificação TRB.....	23
Tabela 2.6 - Produção de cal em alguns países do mundo.....	37
Tabela 2.7 - Produção e destinação das cales da empresa Carbomil Química S/A.....	38
Tabela 3.1 - Dados referentes aos municípios do agropólo do Baixo Jaguaribe.....	49
Tabela 3.2 - Rodovias situadas na região do Agropólo do Baixo Jaguaribe com prioridades para melhorias em sua malha viária.....	50
Tabela 3.3- Classificação pedológica e localização das amostras coletadas.....	54
Tabela 3.4 - Composição Química da Cal Hidratada CHI.....	56
Tabela 3.5 – Etapas do ensaio Triaxial dinâmico.....	69
Tabela 3.6 – Tensões de condicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de módulo de resiliência.....	69
Tabela 3.7 - Tensões de carregamento aplicadas no ensaio de módulo de resiliência....	70
Tabela 4.1 - Índice de grupo e caracterização do solo (TRB): Am-A.....	76
Tabela 4.2 – Valores de ISC e expansão para a amostra de solo Am-A.....	77

Tabela 4.3 – Especificações do DNIT (2006).....	77
Tabela 4.4 - Índice de grupo e caracterização do solo (TRB): Am-B.	78
Tabela 4.5 – Valores de ISC e expansão para a amostra de solo Am-B.	79
Tabela 4.6 – Análise química das amostras de solo Am-A e Am-B.	80
Tabela 4.7 - Valores de pH.	82
Tabela 4.8 - Valores de pH (método de EADES & GRIM, 1966).	84
Tabela 4.9 - Método de THOMPSON (1966) – Rcs aos 28 dias (MPa e kNm ²).	89
Tabela 4.10 – Limites de Atterberg para as misturas de solo natural e solo-cal (Am-A).	91
Tabela 4.11 – Limites de Atterberg para as misturas de solo natural e solo-cal (Am-B).	91
Tabela 4.12 - Resultados da compactação na energia intermediária (amostra Am-A).	93
Tabela 4.13 - Resultados da compactação na energia intermediária (amostra Am-B).	93
Tabela 4.14 – Distribuição Granulometrica ANGELIM (2005).....	96
Tabela 4.15 – Ensaio de Compactação (energia intermediária) ANGELIM (2005).	97
Tabela 4.16- Resultados do ensaio de compactação na energia normal (amostra Am-A).	

.....	98
Tabela 4.17 – Valores de ISC das amostras analisadas (energia intermediária).	100
Tabela 4.18 – Resultados de ISC obtidos por ANGELIM (2005).	102
Tabela 4.19 – Valores de ISC para a amostra Am-A (energia normal).	103
Tabela 4.20 – Valores de expansão encontrados para as misturas de solo-cal.	104
Tabela 4.21 – Resistência à Compressão Simples (MPa): Am-A.	107
Tabela 4.22 – Resistência à Compressão Simples (MPa): Am-B.	107
Tabela 4.23 – Ensaio não convencionais: Am-A.	118
Tabela 4.24 – Ensaio não convencionais: Am-B.	119
Tabela 4.25 – Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa): Am-A.	121
Tabela 4.26 – Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa): Am-B.	122
Tabela 4.27 – Resultados obtidos com a aplicação dos modelos resilientes clássicos para a amostra de solo Am-A.	129
Tabela 4.28 – Resultados obtidos com a aplicação dos modelos resilientes clássico para a amostra de solo Am-B.	130
Tabela 4.29 - Resultados obtidos com a aplicação do modelo resiliente composto para a amostra de solo Am-A.	132

Tabela 4.30 - Resultados obtidos com a aplicação do modelo resiliente composto para a amostra de solo Am-B.	132
Tabela 4.31 – Parâmetros físicos e mecânicos da estrutura de pavimento analisada.	153
Tabela 4.32 – Desvios padrões encontrados, no programa LabFit, para os parâmetros k1, k2 e k3 apresentados na Tabela 4.13.	154
Tabela 4.33 – Resultados do dimensionamento mecânico para a estrutura proposta.	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials)

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

ABPC (Associação Brasileira dos Produtores de Cal)

ASTM (American Society for Testing and Materials)

CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior)

CBR (California Bearing Ratio)

CNT (Confederação Nacional do Transporte)

COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ)

CP (Corpo de Prova)

CTC (Capacidade de Troca Catiônica)

DER/CE (Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará)

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes)

HRB (Highway Research Board)

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)

ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços)

IFG (International Focus Group on Rural Road Engineering)

IP (Índice de Plasticidade)

IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Estado do Ceará)

IPLANCE (Fundação Instituto de Planejamento do Ceará)

ISC (Índice de Suporte Califórnia)

LL (Limite de liquidez)

LMP (Laboratório de Mecânica dos Pavimentos)

LP (Limite de plasticidade)

ME (Método de Ensaio)

MR (Módulo de Resiliência)

NBR (Norma Brasileira)

NL (Não Líquido)

NP (Não Plástico)

NLA (National Lime Association)

NUSIP (Núcleo de Suporte à Infra-estrutura e Gestão de Perímetros Públicos Irrigados)

pH (Potencial Hidrogeniônico)

RCS (Resistência à Compressão Simples)

RTCD (Resistência à Tração por Compressão Diametral)

SEAGRI (Secretaria de Agricultura e Pecuária)

SBRT (Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas)

TRB (Transportation Research Board)

TSS (Tratamento Superficial Simples)

UFC (Universidade Federal do Ceará)

UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora)

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área da seção transversal correspondente dos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples

Ao - Valores da área da seção transversal obtida após a moldagem dos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples

CaO – Óxido de Cálcio

Ca(OH)₂ - Cal cálcica virgem

CaCO₃ + MgCO₃ - Carbonato de cálcio e magnésio

CaO + MgO - Cal dolomítica

Ca(OH)₂ + MgO - Cal dolomítica mono-hidratada

Ca(OH)₂ + Mg(OH)₂ - Cal dolomítica di-hidratada

e – íons trocáveis

ΔpH - Diferença entre o pH em KCl e o pH em água

D_{adm} - Deflexão máxima admissível na superfície

K – constante;

k₁, k₂, k₃, k₄ - Coeficientes das equações de módulo resiliente

M – cátion de valência m

N – cátion de valência n

N_p - Número N para o período de projeto

o – íons presentes na água dos poros;

P – Força axial aplicada ao corpo de prova (kN)

R^2 - Coeficientes de correlação

S - Soma dos cátions trocáveis

Tr - Atividade das argilas

ϵ_p - Deformação permanente ou plástica

ϵ_r - Deformação resiliente

θ - Invariante de tensões

σ - Resistência à compressão simples (kPa);

σ_1 - Tensão principal maior

σ_3 - Tensão principal menor ou tensão de confinamento

σ_d - Tensão desvio atuante

$\sigma_{v adm}$ - Tensão vertical admissível no subleito

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil possui uma das maiores malhas rodoviárias do mundo, contudo, apenas uma pequena porcentagem desta é pavimentada (cerca de 10%). De acordo com a última pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte – CNT (2007) que avaliou 87.572 Km de rodovias em todo país, abrangendo 100% da malha rodoviária federal e os principais trechos sob gestão estadual e sob concessão, 54,5% da malha rodoviária pesquisada apresenta-se com o pavimento em estado regular, ruim ou péssimo, totalizando 47.777 km. Esses dados mostram que grande parte das rodovias brasileiras encontra-se ainda em uma situação de elevado grau de deficiência.

A pesquisa mostrou também que o estado do Ceará, especificamente, apresenta apenas 17,4% (533 km) de sua malha rodoviária considerada como boa ou ótima. Esse fato é alarmante e afeta diretamente toda sociedade local uma vez que estas rodovias servem de acesso aos serviços básicos de educação, saúde e lazer.

A grande maioria das rodovias do estado do Ceará é composta por estradas de baixo volume de tráfego, que representam o principal meio de escoamento de passageiros e de produtos agrícolas oriundos do campo. Uma região do estado que é afetada diretamente por essa realidade e que apresenta uma carência grande de rodovias adequadas ao transporte diário de pessoas e de produtos é a do agropólo do Baixo Jaguaribe.

Esse agropólo localiza-se na região leste do estado Ceará, na divisa com o oceano atlântico e o estado do Rio Grande do Norte, como apresentado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Mapa do estado Ceará contendo o agropólo do Baixo Jaguaribe na época da implantação deste (adaptado de IPECE, 2007).

RABÊLO (2006) afirma que o agropólo do Baixo Jaguaribe é o maior do estado do Ceará, compreendendo uma área de 63.000 hectares, aproximadamente 37% de toda área irrigada do estado. Este autor menciona que a demanda total de pavimentação de rodovias vicinais nessa região é de aproximadamente 234,77 km. Grande parte dos produtos agrícolas ali produzidos é transportada utilizando-se rodovias vicinais não pavimentadas que estão em péssimas condições de tráfego.

Os defeitos dessas rodovias acabam comprometendo os padrões de qualidade dos produtos exigidos pelo mercado estrangeiro. Além disso, a racionalização do uso dos materiais locais em pavimentação pode melhorar a qualidade de rolamento das rodovias, resultando em soluções mais econômicas do que as convencionais, que certamente favorecerão o crescimento e desenvolvimento dessa região. Contudo, os solos naturais que apresentam características tais que permitam o seu uso na construção de bases e sub-bases rodoviárias, estabilizadas granulometricamente sem mistura e que atendam às especificações vigentes, encontram-se cada vez mais escassos.

Essa realidade acaba encarecendo os custos de construção de uma rodovia, uma

vez que, na falta de solos adequados na região, procura-se utilizar outro material (com características satisfatórias para o uso em camadas nobres do pavimento) que se encontra, muitas vezes, distante da obra. Uma alternativa para minimizar esses altos custos é tentar estabilizar os solos locais através de uma estabilização mecânica ou com uso de aditivos químicos, como cimento, cal, betume, sais minerais e materiais a base de enzimas.

A cal é um dos produtos estabilizantes, dentre vários existentes, mais usados até hoje, sendo utilizada desde os primórdios da nossa civilização. A inserção da cal a um material natural pode resultar na melhoria de algumas das propriedades dos solos de interesse à pavimentação, tais como: aumento de resistência mecânica, redução da plasticidade e da expansão, redução da susceptibilidade à água, etc.

O uso da técnica de solo-cal vem sendo investigada, no estado do Ceará, desde o ano de 2000. LOIOLA e NOBRE JÚNIOR (2001) relataram em seu trabalho a primeira experiência utilizando mistura solo-cal para estabilização de sub-base e base no estado. Um trecho de 1 km foi construído em caráter experimental a partir da utilização desta técnica.

Valem destacar, também, os trabalhos de BARROSO e SANTOS (2006) e mais recentemente o de LOIOLA e BARROSO (2007) que mostraram os resultados do estudo realizado em laboratório e o processo construtivo de uma rodovia de 40 km de extensão (rodovia do melão) empregando a técnica de solo-cal.

Com o objetivo de tentar viabilizar economicamente os investimentos em obras de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego no Estado do Ceará, realizou-se o estudo da técnica de solo-cal para dois solos que ocorrem na Região do Baixo Jaguaribe/CE, analisando-se diferentes processos de mistura do estabilizante ao solo: cal em pó e cal em pasta.

1.2. PROBLEMA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Tendo em vista a extensa malha de rodovias não pavimentadas do Estado do Ceará e os altos custos de sua manutenção, há necessidade de investigação de técnicas alternativas de pavimentação que permitam a ampliação da rede rodoviária como, por exemplo, a técnica de solo-cal.

A melhor compreensão dos fatores que influenciam no processo de estabilização das misturas solo-cal, bem como a introdução de ensaios não convencionais (módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, etc) pode contribuir para que essa técnica seja melhor implementada nas rodovias do estado do Ceará.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica da inserção da cal, em pó e em pasta, na melhoria das propriedades mecânicas dos solos, visando o emprego em camadas nobres de rodovias de baixo volume de tráfego no Agropólo do Baixo Jaguaribe. A seguir, estão listados alguns objetivos específicos que foram almejados com o intuito de se atingir o geral:

- a) realizar uma revisão bibliográfica sobre a estabilização de solos aplicadas à pavimentação;
- b) entender como variam as propriedades tecnológicas dos solos analisados em função da técnica e do teor da cal empregada para estabilização;
- c) verificar às modificações ocorridas nas misturas estabilizadas em função dos diferentes períodos de cura analisados;
- d) verificar a influência das energias de compactação, normal e intermediária, nos resultados de alguns dos ensaios laboratoriais realizados para as misturas de solo estabilizados com a cal, e;
- e) verificar a influência da estabilização com a cal na resistência mecânica das misturas ensaiadas;

1.4. O MÉTODO

Para alcançar os objetivos desse trabalho foram desenvolvidas as seguintes etapas metodológicas:

- a) realização de uma revisão bibliográfica sobre estabilização de solos com o uso da cal;

- b) identificação da área de estudo e das classes pedológicas dos solos encontradas na região do Agropólo do Baixo Jaguaribe;
- c) escolha e coleta das amostras de solos a serem estudadas, baseando-se nas características dos materiais e na prioridade de demanda para melhoria da pavimentação local do agropólo estudado;
- d) realização dos ensaios de caracterização geotécnica e química das amostras dos solos selecionados;
- e) escolha e caracterização da cal;
- f) determinação das técnicas de aplicação do estabilizante a serem investigadas;
- g) realização dos ensaios de dosagens para as misturas estabilizadas, visando a identificação do teor ótimo de cada mistura;
- h) realização dos ensaios de resistência mecânica com os solos selecionados e com as misturas de solo-cal;
- i) análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, e;
- j) formulação de propostas técnicas, diante dos resultados obtidos, e de sugestões inerentes ao tema discutido neste trabalho.

1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo o capítulo 1 correspondente à introdução do trabalho. Neste capítulo são expostas a importância e relevância do tema proposto, assim como os objetivos almejados pela pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de estabilização de solos com a cal, o processo de fabricação industrial deste aditivo e o histórico da utilização desse estabilizante em camadas de pavimentos, bem como o processo construtivo dessas camadas.

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa assim como as informações gerais sobre o agropólo do Baixo Jaguaribe, região originária dos solos analisados neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados para as misturas de solo natural e de solo estabilizado pela cal. Neste capítulo, apresenta-se também, um dimensionamento mecânico de estrutura de um pavimento executado com base em solo-cal.

No capítulo 5 são apresentados os principais resultados obtidos após a realização dos ensaios laboratoriais, as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao assunto abordado nesta dissertação.

CAPÍTULO 2

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS APLICADA À PAVIMENTAÇÃO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos problemas enfrentados pelos engenheiros rodoviários, atualmente, é o da escassez de materiais adequados para o uso em camadas de base e sub-base de pavimentos, ou seja, que apresentem características tais que atendam às especificações em vigor.

Dessa forma, surge como alternativa para solucionar este problema a utilização de solos finos locais. Porém, muitos destes solos não são aceitos pelas especificações tradicionais, sendo necessária a utilização de técnicas de estabilização que confirmam a eles as características necessárias ao projeto de pavimentação.

Uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis é a da adição da cal (GUIMARÃES, 2002). A adição da cal a um material natural pode resultar na melhoria de algumas das propriedades dos solos de interesse à pavimentação, possibilitando uma alternativa a mais para a construção de rodovias.

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso da técnica de solo-cal e de suas potencialidades, quando empregados em camadas de pavimentos rodoviários. Inicialmente, foram expostas a conceituação e a finalidade do processo de estabilização de um solo, relatando a sua importância e mostrando os diversos tipos existentes. Na sequência, apresentou-se a conceituação das misturas de solo-cal e algumas de suas peculiaridades, relatando os mecanismos envolvidos em seu processo de estabilização. Por fim, foi discutida a metodologia construtiva de camadas estabilizadas quimicamente pela cal, dando-se ênfase ao processo de aplicação da forma diluída e ao emprego desta em camadas de pavimentos.

2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS - CONCEITUAÇÃO

O solo natural apresenta-se como um material complexo e variável, de acordo com sua localização. No entanto, devido à sua ocorrência universal e ao seu baixo custo torna-se um material bastante utilizado em obras de engenharia (NÚÑEZ, 1991).

Na área da pavimentação rodoviária, especificamente, a racionalização do uso dos materiais locais pode melhorar a qualidade de rolamento das rodovias, resultando em soluções mais econômicas do que as convencionais. Contudo, nem sempre é possível encontrar solos naturais que atendam às exigências das especificações vigentes. Nestas situações, algumas decisões podem ser tomadas em relação à solução mais indicada para cada caso, e possivelmente irá contemplar uma das seguintes hipóteses (FERRAZ, 1994):

- a) aceitar o material local e adaptar o projeto às restrições impostas por ele;
- b) descartar o material, removendo-o de seu local de origem e substituindo-o por outro de qualidade superior, ou;
- c) aceitar o material local e alterar suas propriedades, de modo a torná-lo capaz de responder às necessidades das tarefas previstas.

A última hipótese, apresentada no item “c”, é, segundo NÚÑEZ (1991), normalmente designada por estabilização de solos. Essa definição apresenta-se de maneira simples e objetiva. Porém, alguns autores, como BAPTISTA (1976), apresentam a conceituação do processo de estabilização de um material de uma maneira um pouco mais detalhada.

Para BAPTISTA (1976) estabilizar um solo é, de um modo geral, utilizar um processo qualquer de natureza física, físico-química ou mecânica, de maneira a tornar esse solo estável para os limites de sua utilização, fazendo com que esta estabilidade permaneça sob ações de cargas exteriores e ações climáticas variáveis. O autor complementa sua definição comentando que o processo de estabilização de um solo envolve propriedades de resistência do solo e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos mecânicos, físicos, físico-químicos e químicos.

Analisando-se as definições apresentadas, anteriormente, por NÚÑEZ (1991) e BAPTISTA (1976), percebe-se que o conceito apresentado por ambos é o mesmo, sofrendo apenas algumas alterações na organização das idéias e, no caso específico da definição feita pelo segundo autor, o ganho de alguns incrementos que tornam a conceituação do mesmo um pouco mais ampla.

Baseado nas definições apresentadas conclui-se, então, que estabilizar um solo é, portanto, melhorar as propriedades mecânicas do mesmo de modo a torná-lo apto a resistir às ações oriundas do tráfego e às intempéries decorrentes das variações climáticas apresentadas na região, a fim de atender as especificações contidas no projeto.

2.3. TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO

De acordo com GUIMARÃES (2002), a estabilização de solos pode ser obtida por várias técnicas, que são reunidas em dois grandes grupos:

- a) as que empregam meios mecânicos: correção da granulometria e da plasticidade através da incorporação ou retirada de determinadas quantidades de frações constituintes do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por normas;
- b) as que empregam meios químicos: utilização de aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e outros.

2.3.1. Estabilização Mecânica

LITTLE (1995) relata que freqüentemente os solos utilizados em obras de pavimentação requerem uma estabilidade mecânica adicional, a fim de propiciar a estes uma maior durabilidade ou a alteração de seus volumes potenciais.

De acordo com GONDIM (2008), são considerados métodos de estabilização mecânica os procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo ou a granulometria deste. A autora menciona, ainda, que dentre os métodos existentes se sobressaem à compactação e a estabilização granulométrica.

2.3.1.1. Compactação

De acordo com LITTLE (1995), a compactação é a forma de estabilização mais utilizada, sendo responsável pela melhoria da estabilidade mecânica de praticamente todo tipo de solo. Entretanto, o mesmo faz uma ressalva, afirmando que em muitas ocasiões a compactação sozinha não é suficiente, principalmente quando o solo a ser tratado é coesivo ou apresenta uma granulometria fina.

Problemas, como o citado anteriormente por LITTLE (1995), são responsáveis pela busca constante de novas alternativas tecnológicas que possam suprir as limitações de solos utilizados em obras de engenharia. Esse fato faz com que o número de métodos utilizados na estabilização desses materiais aumente consideravelmente a cada dia.

2.3.1.2. Estabilização Granulométrica

Segundo VILLIBOR (1982), a estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de maneira a se obter um produto de estabilidade maior que os solos de origem e, adequado para aplicação em cada caso particular. Esse autor menciona que alguns fatores, tais como a natureza das partículas dos solos, influenciam diretamente no comportamento das composições granulométricas dos materiais.

O princípio da estabilização granulométrica consiste no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais que se enquadrem dentro de uma determinada especificação, de tal forma que resulte em uma mistura na qual a resistência seja garantida pelo contato entre os grãos das partículas maiores e os vazios sejam preenchidos pelos grãos das partículas mais finas, de maneira a propiciar uma menor permeabilidade e uma maior densidade (GONDIM, 2008).

2.3.2. Estabilização Química

Atualmente, a inserção de aditivos químicos em solos considerados não aptos à pavimentação vem sendo bastante estudada no Brasil e em muitos outros países. O International Focus Group on Rural Road Engineering – IFG (2005) relata que o processo de estabilização química envolve a adição de um agente estabilizante ao solo

fazendo com que este atinja uma umidade ótima adequada, uma compactação eficiente e uma cura final que assegure a obtenção de uma resistência potencial satisfatória.

O IFG (2005) destaca ainda o uso da cal e do cimento na melhoria de solos naturais instáveis, a fim de possibilitar o uso destes em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Este grupo apresenta um critério de escolha, entre os dois estabilizantes, baseado na plasticidade e no tamanho das partículas distribuídas no material a ser tratado, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Guia do tipo de estabilização mais efetiva.

TIPO DE ESTABILIZAÇÃO	PROPRIEDADES DO SOLO					
	Mais que 25% passando na Peneira de 0,075 mm			Menos que 25% passando na Peneira de 0,075 mm		
	IP ≤ 0	10 < IP < 20	IP ≥ 20	IP ≤ 6 LP ≤ 60	6 < IP ≤ 10	IP > 10
Cimento	Sim	Sim	*	Sim	Sim	Sim
Cal	*	Sim	Sim	Não	*	Sim

Fonte: IFG/2005

Outro método de estabilização química de solos conhecido no âmbito rodoviário é o que emprega materiais betuminosos. De acordo com SENÇO (2001) este processo de estabilização ocorre ao se adicionar um material betuminoso a um solo, ou misturas de solos, a fim de melhorar as propriedades destes. Valem destacar alguns trabalhos recentes, a respeito deste assunto, como o de MICELI (2006) e o de GONDIM (2008). Esses autores avaliaram a viabilidade técnica da estabilização betuminosa para o emprego de solos instáveis em camadas de pavimentos rodoviários. Para isso, verificaram o efeito da variação do teor de emulsão e do período de cura no comportamento mecânico dos materiais analisados.

Ressalta-se que a escolha pela cal, pelo cimento ou outro material como agente estabilizante de um determinado solo, não envolve apenas as características da amostra a ser tratada. Dessa forma, dados como os fornecidos pela Tabela 2.1 não são os únicos levados em conta na escolha do melhor material estabilizante.

GUIMARÃES (2002) comenta que a opção por um ou outro método de estabilização seja ela mecânica ou com a inserção de aditivos químicos, como a cal e o cimento, é influenciada por uma série de fatores, entre os quais destacam-se: os econômicos, a própria finalidade da obra, as características dos materiais e as

propriedades do solo que devem ser corrigidas. Além disso, o autor relata que os solos das regiões tropicais úmidas, particularmente, recebem tratamentos deficientes sobre seus problemas devido às significativas diferenças entre suas propriedades e comportamento, exigindo um número maior de estudos e pesquisas para se chegar aos procedimentos mais apropriados.

2.4. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

2.4.1. Conceituação

AZEVEDO *et. al.* (1998) definem a mistura de solo-cal como sendo uma mistura íntima de solo, cal e água em proporções determinadas através de ensaios laboratoriais. Segundo os autores a aplicação dessa técnica é fundamentada em reações químicas e físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a fração argila.

O uso da cal, de acordo com SANTOS (2004), é recomendado para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte. Segundo LITTLE (1999), o tratamento desses solos com a cal pode ser classificado de duas maneiras:

- a) solo modificado pela cal: é um processo que ocorre entre os grãos finos do solo e a cal e que apresenta, para solos argilosos de moderada a alta plasticidade, melhorias substanciais como: redução da plasticidade, redução na susceptibilidade à água e melhorias na estabilidade e trabalhabilidade do solo. De acordo com o autor, esse processo ocorre inicialmente devido a troca de cátions de cálcio fornecidos pela cal (Ca(OH)_2 ou cal hidratada) por cátions presentes no solo, normalmente adsorvidos na superfície do argilo mineral, e desenvolve-se em um ambiente com um pH elevado, promovido pelo sistema cal-água.
- b) solo estabilizado pela cal: o processo de estabilização difere do processo de modificação devido ao ganho significativo de resistência, obtido com o passar do tempo, que ocorre em função do desenvolvimento, a longo prazo, da reação pozolânica. De acordo com LITTLE (1999), essa reação

é representada pela formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados na superfície do argilo mineral. A reação pozolânica pode ser iniciada rapidamente, sendo responsável por alguns dos efeitos do processo de modificação. Contudo, de acordo com AZEVEDO *et. al.* (1998), esta reação pode se estender por muitos anos desde que, como relata LITTLE (1999), esteja presente na mistura uma quantidade suficiente da cal para sua ocorrência e que o pH remanescente permaneça elevado. LITTLE (1999), comenta ainda, que o sucesso da reação pozolânica está diretamente relacionado com a reatividade do solo tratado e com o desenvolvimento de um bom projeto para a mistura, podendo, quando obedecido esses parâmetros, apresentar resultados mais eficazes à amostra estabilizada, ou seja, melhorar substancialmente a capacidade de suporte desta. Estes resultados podem compreender: o aumento dos valores do módulo de resiliência (de um fator de 10 ou mais), melhorias na resistência ao cisalhamento (de um fator de 20 ou mais), ganhos contínuos de resistência e durabilidade, mesmo sobre os efeitos da variação climática ou danos por carregamento (LITTLE, 1995).

DIAS (2004) comenta que o processo de modificação precisa de um teor baixo da cal adicionado ao solo, sendo suficiente apenas para desenvolver as reações imediatas ou da fase rápida, sem desenvolver as reações lentas (cimentantes) ou pozolânicas. Já em relação ao processo de estabilização o autor relata que o teor da cal adicionado é tal, que propicia a ocorrência das reações da fase rápida e da fase lenta. Conforme AZEVEDO *et. al.* (1998) este processo é utilizado quando a necessidade de melhorias de um solo é basicamente estrutural.

2.4.2. Breve Histórico

A cal é um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem na engenharia. No âmbito rodoviário, tem-se notícia que este estabilizante vem sendo utilizado desde a época dos romanos, há mais de 2000 mil anos. HENRRIN e MITCHELL (1968)

relatam que os romanos também foram os primeiros a empregar um material pozolânico (pozolana), que adicionado à cal acelerava o processo de estabilização de solos.

Segundo GUIMARÃES (2002), no ano de 312 a.c., os romanos, grandes peritos em construção de estradas, iniciaram a obra da famosa “Via Ápia”, considerada marcante na história da civilização e uma das pioneiras no uso da técnica de estabilização de solos com a adição da cal. De acordo com o autor, a estrada Via Ápia foi construída pelo censor romano Appius Cláudius e tinha o objetivo de ligar a porta de Roma a Brindisi, numa extensão de 584 km, a fim de transportar provisões, tropas e armamentos da costa Mediterrânea à costa Adriática.

A figura 2.1 apresenta uma vista da estrada Via Ápia e mostra, claramente, a superfície de rolamento rudimentar na qual esta foi construída.



Figura 2.1: Via Ápia (GUIMARÃES, 2002)

GUIMARÃES (2002) relata ainda que, atualmente, grande parte da Via Ápia foi recoberta por pavimentos modernos, sobre alegação de que sua superfície original era tão grosseira que os veículos atuais só trafegavam com velocidades próximas a 16 km/h. No entanto, este autor afirma que a estrada ainda apresenta alguns trechos em condições de tráfego, mesmo após 2300 anos de utilização, e comenta que o uso da cal na construção desta contribui para sua extraordinária durabilidade.

A Tabela 2.2 apresenta as características das 4 camadas que compunham o perfil da estrada Via Ápia.

Tabela 2.2: Composição do perfil da “Via Ápia” (GUIMARÃES, 2002).

Camada 1	Básica (inferior), composta por pedras chatas do tipo laje, de 20 a 60 cm, sobreposta ao subleito compactado.
Camada 2	De cascalho, composta de pequenas pedras misturadas com cal hidratada, tendo 22,5 cm de espessura.
Camada 3	Central, com aproximadamente 30 cm de espessura, composta de cascalho de pequena granulometria, areia grossa e cal. Guimarães (2002) comenta que certamente essa composição é que passou a ser conhecida como concreto romano.
Camada 4	Acima dessa camada de argamassa, ainda fresca, foi colocada a camada superior ou camada de rolamento (de calcedônia de origem vulcânica), com cerca de 15 cm de espessura.

Após vários anos, desde a época da civilização romana, muitas técnicas aplicadas pela engenharia evoluíram, procurando sempre a obtenção de resultados mais eficazes e econômicos. Observou-se, ao longo do tempo, o crescimento do uso da cal para várias finalidades, implicando no aumento constante de fabricação deste material e, conseqüentemente, fazendo com que as técnicas rudimentares evoluíssem para técnicas sofisticadas, embora não mudassem a essência do seu modo de obtenção.

Segundo LIMA (1984), a utilização da cal em grande escala deu-se apenas no início do século XX, nos Estados Unidos da América (EUA), no ano de 1924, e na antiga União Soviética (URSS), em 1926. No entanto, a história da construção de rodovias modernas indica pouco uso da cal até depois da II Guerra Mundial.

HENRRIN e MITCHELL (1968) fazem menção a alguns relatos de Mc Dowell (considerado por muitos pesquisadores como sendo o pai das misturas de solo estabilizado com a cal) que afirmam a criação de campos experimentais com misturas de solo-cal antes do ano de 1945, em diversos estados dos Estados Unidos da América. Nestes experimentos não foi levado em conta o controle, a compactação e a cura dessas misturas, tendo a maioria deles, apresentado resultados desapontadores.

Contudo, estes mesmos relatos contam que de posse dos dados obtidos em uma experiência fracassada no estado do Texas e quando da construção de estradas, nas proximidades do referido estado, sob especificações mais rígidas, o comportamento das misturas solo-cal apresentaram resultados bastante satisfatórios. A melhora foi tanta que os trechos realizados apresentaram um desempenho excelente sob a ação do tráfego médio por um período de 14 anos.

Após um começo tardio à estabilização de solos com a adição da cal foi se espalhando lentamente nos Estados Unidos e, aos poucos, foi sendo usada em maior quantidade por maior número de estados, de ano para ano (HENRRIN e MITCHELL, 1968). Contudo, vale ressaltar, a partir de relatos de Lima (1984), que a evolução técnico-científica do uso da cal se deve muito as inúmeras pesquisas laboratoriais e de campo, em algumas pistas experimentais, desenvolvidas pelo *Texas Highway Department* e que, a partir de então, através de pesquisas posteriores, inúmeras literaturas técnicas foram publicadas sendo subseqüentemente organizadas em bibliografias comentadas.

No Brasil vários trabalhos foram desenvolvidos com a utilização da técnica solo-cal e muitos apresentaram resultados bastante satisfatórios. Algumas obras importantes realizadas com a utilização desse método nas últimas décadas e que obtiveram sucesso foram (GUIMARÃES, 1971 apud LOVATO, 2004):

- a) Aeroporto de Congonhas (em São Paulo): base de solo-cal construída na área (1000 m²) de hangares da antiga Varig (1000m²). O solo utilizado nesta obra foi classificado de acordo com a HRB como um A-7-5 (argiloso) e possuía um IP (Índice de Plasticidade) igual a 12. Após a estabilização com um teor de 6% da cal, o solo apresentou uma resistência à compressão simples igual a 1,5 MPa aos 28 dias.
- b) Rodovia Brasília Fortaleza próximo ao município de Sobradinho/DF: foram executados dois trechos de 150 m. Neste trecho foram realizadas camadas de base com 1 e 3% de cal e de sub-base em solo laterítico. Os solos utilizados nesta obra apresentavam LL = 41% e IP = 11%.
- c) Avenida Sernabetiba (Rio de Janeiro, Guanabara): foram executados 18 km de trecho com camadas de base de solo-cal com 3% e 4% de estabilizante.

Já no estado do Ceará, especificamente, segundo relatos de LOIOLA e NOBRE JÚNIOR (2001), a primeira experiência utilizando mistura de solo-cal em camada de base e sub-base foi executada pelo Departamento de Edificações Rodoviárias e Transporte do Estado (DERT-CE), no ano 2000. Esse segmento possui a extensão de 1

km e faz parte do trecho de 8,72 km que liga o município de Limoeiro do Norte ao distrito de Flores, situado no município de Russas (região do Médio Jaguaribe). O trecho foi executado na época a partir do uso de uma técnica de mistura no local com o espalhamento manual de sacos da cal.

A Figura 2.2 mostra uma vista do segmento experimental Limoeiro do Norte – Flores, na época de sua execução.



Figura 2.2: Trecho Limoeiro do Norte/Flores (Arquivo pessoal do Eng. Paulo Roberto Reis Loiola).

O segmento experimental Limoeiro do Norte – Flores foi construído em duas seções, cada uma usando um tipo específico de solo que foram classificados, na época, segundo a HRB. Na primeira seção foi utilizado um solo argiloso do tipo A-7-6 e executada uma camada de sub-base de solo-cal e outra de base com solo estabilizado granulometricamente. Já na segunda seção, foi utilizado um solo areno siltoso do tipo A-4 e executada uma camada de base de solo-cal sobre a terraplanagem.

LOIOLA e NOBRE JÚNIOR (2001) afirmam ainda que, em uma análise realizada após um ano de sua construção, o segmento do trecho de Limoeiro do Norte – Flores apresentou um comportamento excelente sob a ação de um tráfego de 851 veículos/dia, leves e pesados, superando em muito a demanda de 50 veículos/dia estimada à época da construção da rodovia.

O DERT-CE, no ano de 2001, motivado pela experiência bem sucedida da aplicação de misturas de solo-cal no trecho citado anteriormente utilizou novamente essa técnica para implantar um trecho de 40 km da rodovia CE-377 (LOIOLA e BARROSO, 2007). Essa pista atravessou a Chapada do Apodi, ligando os municípios de Quixeré (CE) e Baraúnas (RN), e ficou conhecida localmente como rodovia do Melão. A execução da camada de base nessa rodovia ocorreu com utilização da cal, em um teor de 5% em relação ao peso de solo. A distribuição da cal foi feita através da

utilização de uma motoniveladora que possibilitou a uniformidade devida na camada através de um acompanhamento monitorado. O espalhamento da cal foi realizado através de um processo de homogeneização, utilizando-se uma recicladora, com um caminhão pipa acoplado, que manteve a mistura na umidade definida em projeto.

As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram a rodovia na época de sua construção e após um período de funcionamento de 6 anos:



Figura 2.3: Trecho da rodovia do Melão em execução (LOYOLA e BARROSO, 2007).



Figura 2.4: Rodovia do Melão após 6 anos de funcionamento (LOYOLA e BARROSO, 2007).

2.4.3. Componentes das Misturas Solo-Cal

NÔBREGA e GUIMARÃES (1981) relatam que os resultados obtidos com a aplicação da técnica solo-cal estão estritamente relacionados com as propriedades da cal empregada e do solo a ser estabilizado. No entanto, segundo AZEVEDO *et. al.* (1998), as reações entre a cal e o solo ocorrem somente na presença de umidade, ou seja, de água. Dessa forma, pode-se afirmar que as misturas de solo-cal possuem três componentes básicos: a cal, o solo e a água.

2.4.3.1. A Cal

De acordo com LOVATO (2004), a cal é um aglomerante resultante do processo de calcinação de rochas carbonatadas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio. O resultado da calcinação são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominados genericamente por cal virgem ou cal área ou cal viva (GUIMARÃES, 2002).

Segundo OLIVEIRA (2001), na calcinação do calcário natural o carbonato de cálcio é decomposto em óxidos de cálcio (CaO) e anidridos carbônicos (CO₂) após ser

submetido a uma temperatura aproximada de 900°C. A cal virgem fornecida por este processo é bastante utilizada na estabilização de solos instáveis, sendo empregada quando o solo é muito úmido (umidade além do ponto ótimo), servindo para secá-lo (GUIMARÃES, 2002). Contudo, conforme AZEVEDO *et. al.* (1998), a aplicação dessa cal exige muitos cuidados com a segurança dos trabalhadores e, dessa forma, em alguns países, como o Brasil e os Estados Unidos, o seu uso vem sendo substituído gradativamente pela cal hidratada que oferece maior segurança aos seus operadores.

A cal hidratada é resultante da hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio e é obtida na forma de pó seco, com 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002). Esta cal é classificada, de acordo com a norma NBR 7175 (2003) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em função de sua composição química, como: CH I, CH II e CH III. AZEVEDO *et. al.* (1998) comentam que a diferença principal entre esses tipos de cales encontra-se nos teores de cálcio (maiores, tanto mais próxima a cal do CH I) e nos teores de carbonatos (menores, tanto mais próxima a cal do CH I).

De acordo com GUIMARÃES (2002) as cales na forma hidratada utilizada na estabilização ou melhoria dos solos no Brasil deve obedecer, no mínimo, às exigências da norma NBR-7175 (Cal hidratada para argamassas). A Tabela 2.3, mostra algumas das exigências contidas nessa norma.

Tabela 2.3: Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas.

EXIGÊNCIAS QUÍMICAS		LIMITES		
COMPOSTOS		CH-I	CH-II	CH-III
ANIDRIDO CARBÔNICO (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 13 %
	No depósito	≤ 7 %	≤ 7 %	≤ 15 %
ÓXIDOS DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NÃO HIDRATADO CALCULADO (CaO + MgO)		≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
ÓXIDOS TOTAIS NA BASE DE NÃO-VOLÁTEIS (CaO _t + MgO _t) ²		≥ 90 %	≥ 88 %	≥ 88 %
EXIGÊNCIAS FÍSICAS		LIMITES		
COMPOSTOS		CH-I	CH-II	CH-III
FINURA (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5 %
	Peneira 0,075 mm	≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
RETENÇÃO DE ÁGUA		≥ 75 %	≥ 75 %	≥ 70 %
INCORPORAÇÃO DE AREIA		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
ESTABILIDADE		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
PLASTICIDADE		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175/ 2003.

Já com relação a sua fabricação, a cal pode ser obtida, através da calcinação de rochas carbonatadas, tanto em fornos rudimentares (de pequena produção) como em fornos de alta tecnologia e de produção volumosa (GUIMARÃES, 2002).

A Figura 2.5 apresenta um fluxograma básico da fabricação da cal, desde a mineração até o mercado consumidor. GUIMARÃES (2002) afirma que neste fluxograma algumas operações, ou até mesmo etapas, podem ser suprimidas, mas que os fundamentos estão presentes em todos os esquemas.

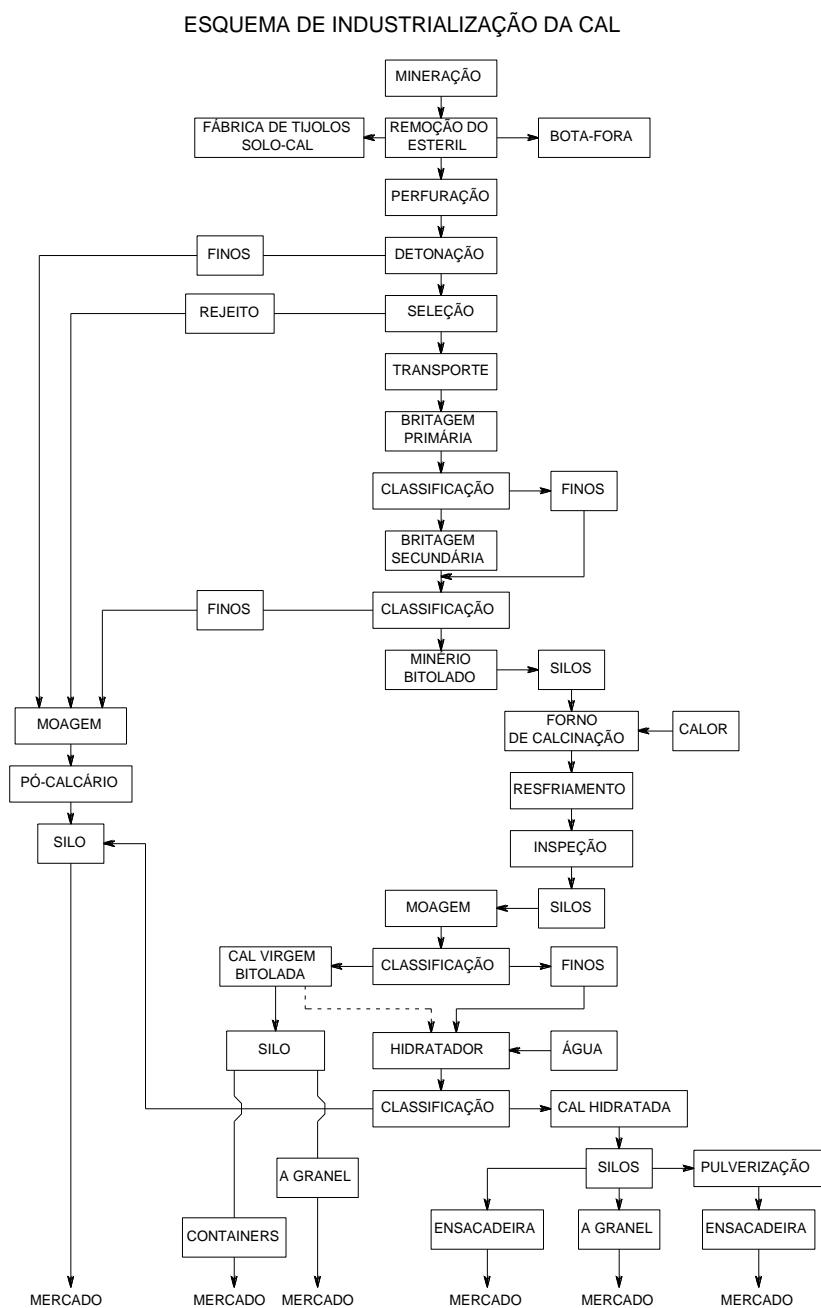
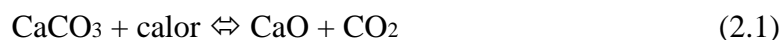


Figura 2.5: Fluxograma de fabricação e industrialização da cal (GUIMARÃES, 2002).

Com relação às reações de formação da cal, virgem e hidratada, LOVATO (2004) afirma que estas podem ser representadas pelas equações 2.1 e 2.2.



O óxido de cálcio (CaO) obtido na equação 2.1 é conhecido por cal cálcica virgem e o Ca(OH)_2 obtido na equação 2.2 como cal cálcica hidratada.

Contudo, de acordo com o HERRIN e MITCHELL (1968), algumas vezes a pedra calcárea dolomítica, rocha carbonatada contendo carbonato de magnésia ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), é queimada para obter-se cal produzindo a chamada cal dolomítica ($\text{CaO} + \text{MgO}$). A hidratação desta cal geram produtos conhecidos por cal dolomítica mono-hidratada ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$) ou a cal dolomítica di-hidratada ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$).

Segundo GUIMARÃES (2002) as reservas medidas de calcários e dolomitos no Brasil, referentes ao ano de 1990, distribuem-se por 23 estados e o Distrito Federal, como apresentado na Figura 2.6.

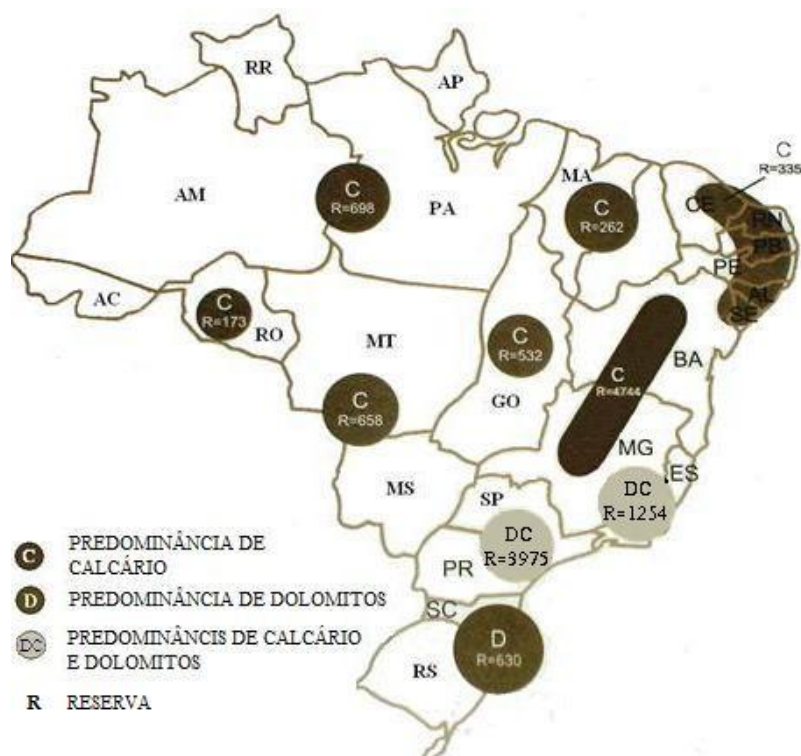


Figura 2.6: Reservas de Calcários e Dolomitos no Brasil em milhões de toneladas, referentes ao ano de 1990 (GUIMARÃES, 2002).

De acordo com a Figura 2.6, os maiores produtores de calcários e dolomitos encontram-se na região Sudeste – São Paulo, Minas Gerais e Paraná. GUIMARÃES (2002) comenta que esse fato ocorre porque nesses locais foram instalados os maiores centros consumidores da cal do país.

GUIMARÃES (2002) menciona ainda que as cales comercializadas no mercado brasileiro apresentam propriedades com seus valores médios enquadrando-se nos intervalos mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Composição das cales brasileiras.

TIPO DE CAL	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO (Base de não volátil) (%)	MgO (Não hidratado) (%)
Cal Cálcica Virgem	90	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,1	96,0 A 98,5	-
	A	A	A	A	A	A	A		
	98	0,8	3,5	1,0	5,0	3,8	0,6		
Cal Hidratada Cálcica	70	0,1	0,5	0,2	23	1,5	0,1	98,5	0,5 A 1,8
	A	A	A	A	A	A	A		
	74	1,4	2,5	0,8	27	3,5	0,0		
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnésiana	39	15	0,5	0,2	19	3,0	0,0	76,0 A 99,0	5 A 25
	A	A	A	A	A	A	2 A		
	61	30	18,2	1,5	27	6,0	0,2 0		
Cal Virgem Dolomítica ou Magnésiana	51	30	0,5	0,2	0,5	0,5	0,0	99,0	-
	A	A	A	A	A	A	5 A		
	61	37	4,5	1,0	4,8	4,5	0,1 0		

Fonte: GUIMARÃES/2002

2.4.3.2. O Solo

Já com relação ao solo, outro componente das misturas de solo-cal, GUIMARÃES (2002) o conceitua como sendo um produto da alteração por intemperismo das rochas superficiais da crosta. De acordo com esse autor, este elemento possui três fases: sólida (minerais e orgânicos), líquida (água que preenche os espaços entre as partículas) e gasosa (que ocupa os espaços não preenchidos pela água).

Os solos recebem designações diversas, conforme a ciência que o estuda. Na área de pavimentação especificamente uma classificação geotécnica bastante utilizada em todo o mundo é a da Highway Research Board (HRB – AASHO), atualmente

conhecida por Transportation Research Board (TRB-AASHO). De acordo com essa classificação os solos podem ser classificados como apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Classificação TRB.

Classificação Geral	SOLOS GRANULARES (P200 < 35 %)							SOLOS SILTO-ARGILOSOS (P200 > 35%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
P10	< 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P40	< 30	< 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-
P200	< 15	< 25	< 10	< 35	<35	< 35	< 35	> 35	> 35	> 35	> 35
LL	-	-	-	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40	< 40	> 40
IP	< 6	< 6	NP	< 10	< 10	> 10	> 10	< 10	< 10	> 10	> 10
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Tipos de material	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		areia fina	Pedregulhos e areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Classificação como subleito	Excelente a bom							Regular a mau			

Fonte: site da Universidade Federal de Juíz de Fora – UFJF (2007).

De acordo com AZEVEDO et. al. (1998) os solos classificados como A5, A6 e A7, e muitos dos solos A-2-6 e A-2-7 são geralmente susceptíveis à estabilização com a cal. Os autores comentam que quando o argilo-mineral componente da fração fina de solo é a caulinita, a reação com a cal se processa de uma forma lenta, principalmente se a fração argilosa for constituída predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro. Esse fato pode ocorrer devido o íon Ca^{++} ter uma enorme dificuldade de substituir o ferro (Fe^{++}), que não fica disponível em meio básico. Nesse caso específico a reação pode até mesmo se anular.

AZEVEDO et. al. (1998) afirmam ainda que se ocorrer o contrário, ou seja, se estiverem presentes na fração fina os minerais aluminosos (óxidos e hidróxidos de alumínio) a reatividade com a cal é bastante grande. Vale ressaltar, porém, que este fato não ocorre pela facilidade da reação, mas sim pela possibilidade da ocorrência desta em função do aumento do pH que possibilita a dissolução da Alumina e da Sílica da fração

argilosa do solo e a formação de $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ após a adição da cal. Isso faz com que o processo de estabilização, nestes casos, ocorra de maneira bastante satisfatória.

Já em relação à água AZEVEDO et. al. (1998) relatam que na superfície destas existem íons de hidrogênio livres, que acabam por polarizar as partículas do solo, gerando uma atração entre elas. E quando da adição de cal ao solo, ocorre a aglutinação de íons de cálcio na superfície da partícula de solo em substituição aos íons de hidrogênio ali localizados, o que leva a um aumento nestas forças de atração entre estas partículas, levando a uma maior coesão do solo.

2.4.4. Reações Solo-Cal

De acordo com MALLELA, QUINTUS e SMITH (2004) a cal é um estabilizante usado extensivamente em solos de granulometria fina (argilosos), a fim de melhorar as propriedades destes que interessam à engenharia. Os autores comentam que a fração argilosa de tais solos possui uma superfície carregada negativamente e que, esta superfície, atrai os cátions livres e as moléculas de água (dipolar). Como resultado, uma camada de água, altamente difundida, como mostrada na Figura 2.7, forma-se ao longo das partículas de argila e, conseqüentemente, separam as partículas do argilo-mineral, tornando-o instável e aguado.

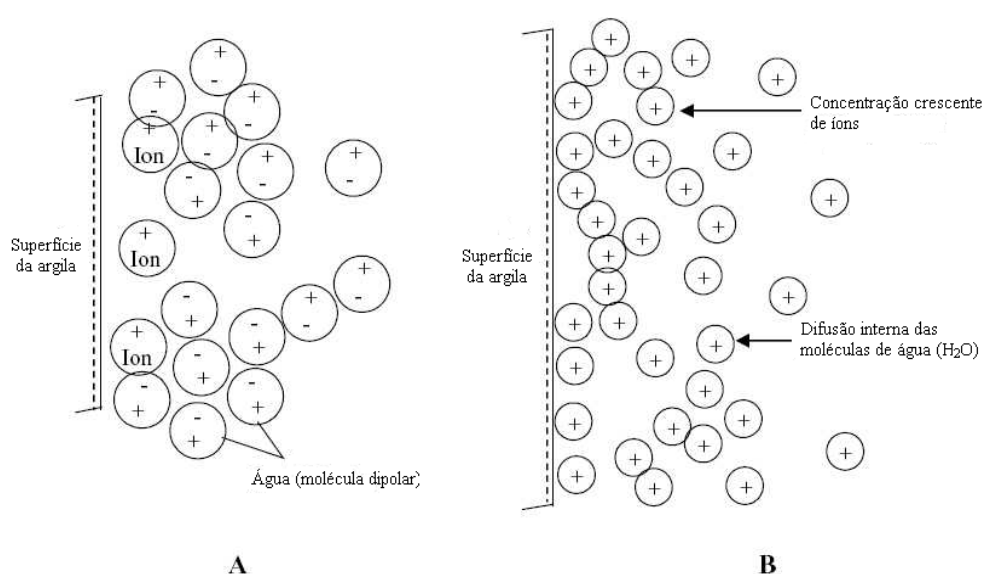


Figura 2.7: Formação de uma camada de água difundida ao redor da partícula de argila (LITTLE, 1995).

Na Figura 2.7, observam-se os íons cátions e as moléculas de água (dipolar) sendo atraídas pela carga negativa da superfície da argila, de modo a satisfazer a mudança de potencial. Na situação “A”, os íons cátions e as moléculas de água são adsorvidos. Na situação “B” uma camada de cátions difundida, devido sua atividade termal e a infusão de água, desloca-se até a superfície da argila por causa da elevada concentração eletrolítica na superfície desta (LITTLE, 1995).

Segundo MALLELA, QUINTUS e SMITH (2004) o grau de ocorrência desse fato depende, diretamente, da quantidade de água presente e da morfologia e mineralogia da argila. Os autores comentam ainda que para melhorar as características de materiais com esse tipo de problema, ou seja, materiais instáveis, uma solução é a da inserção da cal.

A adição de cal a um solo provoca mudanças em várias de suas propriedades, verificando-se, geralmente, um aumento na sua resistência, uma redução de sua plasticidade e uma melhoria em sua trabalhabilidade (CARVALHO, 1988).

Segundo LITTLE (1995), duas fases ocorrem no processo de estabilização das misturas de solo-cal. A primeira envolve praticamente as reações imediatas de troca de cátions e floculação (aglomeração), que se desenvolvem logo após a adição da cal ao solo e podem se estender de minutos a dias. A segunda envolve as reações pozolânicas, que são responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica das misturas de solo-cal. Estas últimas reações, conforme AZEVEDO et. al. (1998), podem levar meses ou até anos para serem concluídas.

A reação de troca de cátions, de acordo com CARVALHO (1988), ocorre com o cálcio da cal substituindo o cátion trocável (ex: K, Mg, H) na superfície da fração argila. Segundo LITTLE (1995) esse fato é possível devido a divalência dos cátions de cálcio, normalmente, substituírem os cátions de valência unitária presentes na superfície do argilo-mineral, uma vez que os íons com maior concentração (valência) substituem aqueles com menor concentração.

LITTLE (1995) afirma que, assumindo-se concentrações iguais, a ordem de adsorção preferencial dos cátions comuns associados com o solo é dada pela série seguinte: $Li^+ < Na^+ < H^+ < K^+ < NH_4^+ \ll Mg^{2+} < Ca^{2+} \ll Al^{3+} < Fe^{3+}$. Nesta série

o cátion da direita substitui o cátion da esquerda. Dessa forma, em concentrações iguais, o íon Ca^{2+} pode facilmente substituir os cátions, comumente, encontradas na maioria das argilas, com exceção do Al^{3+} e do Fe^{3+} . O mecanismo das reações de troca de cátions é mostrado na Figura 2.8.

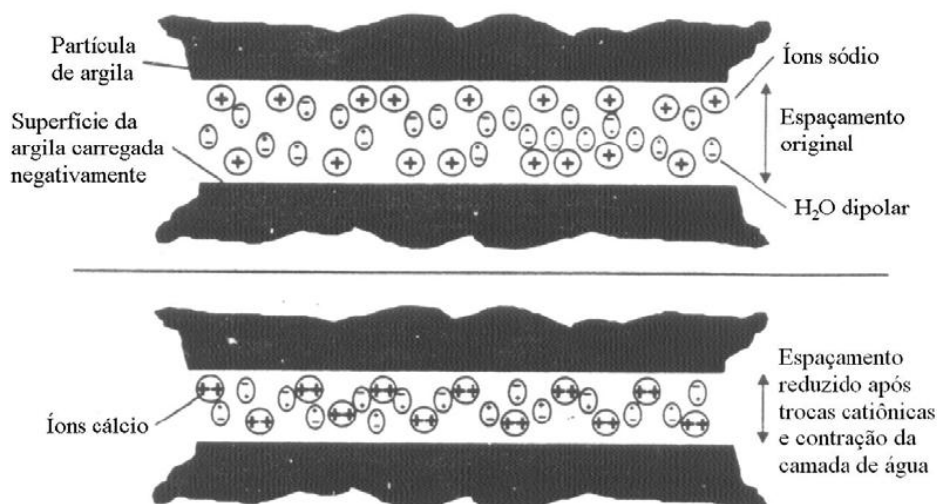


Figura 2.8: Reação de troca de cátions (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

De acordo com LITTLE (1995) a espessura da camada de água intersticial é maior, dependendo do tipo e da concentração de cátions disponíveis na água de poro. O autor comenta que cátions divalentes (cátion com uma carga +2, como exemplo o Ca^{2+} e o Mg^{2+}) podem equilibrar de maneira bem mais eficaz o potencial de carga negativa quando comparado com o cátion monovalente (cátions com uma carga +1). Portanto, o resultado cátion divalente mais camada de água difundida, ao redor das partículas de argila, é muito menor que o resultado do cátion monovalente mais camada de água, ao redor das partículas de mineralogia idêntica.

LITTLE (1995) relata ainda uma equação, desenvolvida por YONG e WARKENTIN (1966), que explica que a relação entre os íons de cátions adsorvidos na superfície de argila não é função apenas da concentração de cátions, mas também da valência. A equação (conhecida por equação Gapon) é bem simples e pode ser representada pela fórmula 2.3.

$$\frac{M_e^{+m}}{N_e^{+n}} = K \frac{\sqrt[m]{M_o^{+m}}}{\sqrt[n]{N_o^{+n}}} \quad (2.3)$$

Onde:

M – cátion de valência m;

N – cátion de valência n;

e – íons trocáveis;

o – íons presentes na água dos poros;

K – constante.

A constante K, segundo LITTLE (1995) depende dos efeitos específicos da adsorção de cátions na superfície da argila. Conforme o autor, baseado na equação de Gapon, em concentrações iguais de íons Ca^{2+} e Na^+ na solução de água, resultará em 17,5 vezes mais íons Ca^{2+} presentes na superfície da argila do que íons Na^+ . O duplo efeito da divalência dos íons de cálcio e sua elevada concentração podem ser obtidos quando a cal é adicionada ao sistema solo-água.

A troca de cátion devido à adição da cal resulta na estabilização da camada de água intersticial e em uma redução considerável no tamanho desta (LITTLE, 1995). O autor comenta que quando as partículas de argila aproximam-se mais umas das outras, devido a redução da camada de água dos poros, ocorre a floculação e a atração borda à face (Figura 2.9). Esse fenômeno (floculação) é causado pela concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução na espessura de água, através de trocas catiônicas (LITTLE, 1995).

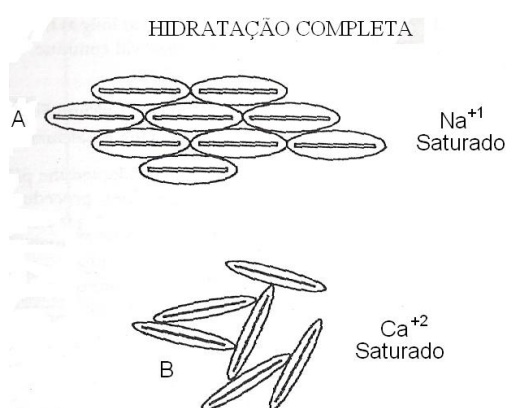


Figura 2.9: Mudança textural ocorrida devido ao fenômeno da troca de cátions seguido pela floculação e aglomeração (LITTLE, 1995).

Na Figura 2.9, pode-se observar que em “A” ilustra-se a perda de resistência do solo argiloso, onde as partículas estão separadas por uma larga camada de água. Em

“B”, devido à adição da cal (cálcio) a camada de água é reduzida e ocorre a atração face à borda (aglomeração) das partículas e sua floculação.

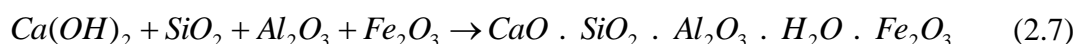
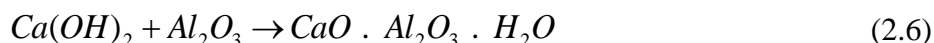
LITTLE (1995) comenta também que as reações mencionadas anteriormente (de troca de cátions, aglomeração e floculação) são responsáveis pelo processo de modificação das misturas de solo-cal, descrito no subitem 2.3.1 desse capítulo. O processo de modificação, de acordo com GUIMARÃES (2002), possibilita uma ação imediata, que promove após alguns instantes (minutos) de contato, mudanças nas propriedades físicas do solo, como:

- a) alteração na granulometria, em função da floculação ou agregação das partículas originais;
- b) alteração dos limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente decresce;
- c) normalmente alteração na compactação, de maneira que para uma mesma energia ocorre uma diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima, quando comparados ao solo natural;
- d) redução da expansão e contração, ou seja, menor variação volumétrica, e;
- e) pequeno ganho de resistência, ou seja, pequeno aumento da capacidade de suporte.

Contudo, quando considerado o ganho de resistência a longo prazo, que é um fenômeno bem mais complexo e bastante influenciado pelas condições e mineralogia do solo, percebe-se que a reação responsável pelo desenvolvimento de uma matriz cimentante ao redor das partículas de solo e pelo processo de estabilização do mesmo, que ocorrem devido as reações entre a cal, a água, a sílica e a alumina, é denominada de pozolânica (LITTLE, 1995).

Em outras palavras, a reação pozolânica ocorre quando a cal reage com a sílica e/ou a alumina do solo para formarem gel de cálcio silicato ou de cálcio aluminato hidratados (CARVALHO, 1988). De acordo com CARVALHO (1990), as reações

pozolânicas para solos lateríticos e cal hidratada podem ser representadas, de forma resumida, pelas expressões de 2.4 a 2.7.



GUIMARÃES (2002) comenta que a reação pozolânica está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. O autor relata ainda uma definição, apresentada por NÓBREGA (1981), sobre um material de característica pozolânica, afirmando que este quando em combinação com a cal e em presença de água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos hidratados estáveis com propriedades ligantes.

Os solos, conforme relatos de GUIMARÃES (2002), apesar de não se constituírem em pozolanas propriamente ditas, podem apresentar uma fração argila com caráter pozolânico mais ou menos acentuado, dependendo de sua natureza mineralógica e textural. De acordo com o autor, quando a cal é adicionada ao solo, seu pH, em geral 4,5 à 6,5, eleva-se para 11-12, criando-se condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila, e até o próprio quartzo, podem reagir com a cal. Assim são formados aluminatos, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, todos com influência no processo de estabilização pelas suas características cimentosas.

LOVATO (2004) apresenta relatos de INGLES e METCALF (1972) que afirmam que os géis de silicato resultantes da reação pozolânica imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios e, que os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Os relatos dos autores salientam ainda, que esta reação só ocorre na presença de água, que tem a

função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície de argila. A Figura 2.10 apresenta o mecanismo de estabilização das misturas de solo-cal.

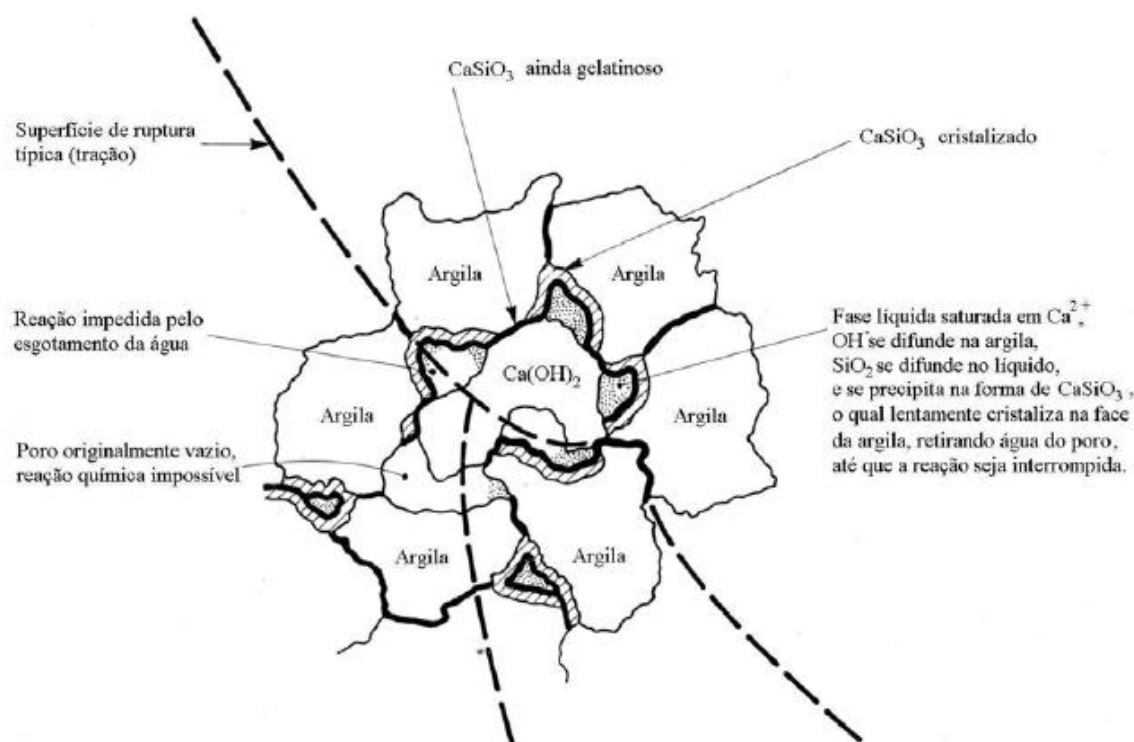


Figura 2.10: Mecanismo de estabilização das misturas de solo-cal (INGLES e METCALF, 1972).

CARVALHO (1988) comenta que os fatores mais importantes para o sucesso da reação pozolânica são as fontes de sílica, alumina e ferro. O autor destaca os argilo-minerais como a fonte principal de sílica e alumina e menciona que em solos lateríticos, os componentes livres de sílica, alumina e ferro participam ativamente no processo de estabilização.

Devido ao processo de estabilização de um solo ser relativamente complexo, outros fatores podem influenciar negativamente ou positivamente. CARVALHO (1988) cita como exemplo a presença de matéria orgânica e afirma que esta não favorece a interação solo-cal. Este autor comenta, ainda, que a participação do ferro na reação entre a cal e o solo é de difícil interpretação, uma vez que existem evidências na literatura, de que o ferro pode ser ou não fator positivo na reação solo laterítico-cal.

De acordo com CARVALHO (1988), a diferença de comportamento do ferro está diretamente ligada à sua forma de ocorrência nos solos lateríticos. Segundo ele, se o ferro ocorre como partículas discretas o mesmo não deve interferir negativamente na reação. No entanto, se o ferro ocorre como partículas encobrendo as superfícies do argilo-mineral ou como agente cimentante, este deve ser um fator negativo para reação solo-cal. É sabido, porém, que o cátion Fe^{++} também pode causar a formação de eflorescência na superfície das partículas de solo, em função da lixiviação dos sais (e uma posterior cristalização), dificultando, dessa forma, a Capacidade de Troca Catiônica do material.

Outra reação que pode ocorrer durante a estabilização de um solo com a adição da cal é a carbonatação. De acordo com GUIMARÃES (2002), esta reação apresenta origem diferente das anteriores. Contudo, também tem características de ação imediata e é de alta importância para a ocorrência ou não dos objetivos da estabilização.

De acordo com CARVALHO (1988) a reação de carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal para formar carbonatos de cálcio ou de magnésio, dependendo do tipo da cal utilizada (calcítica ou dolomítica). O autor afirma que este carbonato é um composto cimentante muito fraco e deletérico para o resultado final em termos de resistência.

SANTOS (2004) comenta que a reação de carbonatação, que ocorre entre o gás carbônico do ar e as minúsculas bolhas gasosas absorvidas pela mistura (refazendo o carbonato primitivo ($CaCO_3$)) é indesejável e que esta resulta em uma expansão do volume do solo.

Porém, CARVALHO (1988) friza que nem sempre todas as reações descritas anteriormente ocorrem. E cita o exemplo em que o cátion trocável do solo é o cálcio, situação esta que inibirá ou reduzirá a ocorrência da reação de troca de cátions. Esse fato pode ocorrer devido o cátion presente na cal também ser o cálcio.

CARVALHO (1988) cita, ainda, o caso da reação de carbonatação, que pode ser impedida à medida que alguns cuidados são tomados, como a impermeabilização da superfície de contato da mistura com o ar.

2.4.5. Fatores que Influenciam no Processo de Estabilização Solo-Cal

De acordo com SANTOS (2004), o processo de estabilização solo-cal é influenciado, diretamente, pelo tempo de cura ao qual a mistura é submetida, pela temperatura em que esta sofre durante a cura, pela natureza do solo a ser tratado e pela natureza da cal utilizada. Além da temperatura, conforme GUIMARÃES (2002), outros fatores ambientais interferem nos resultados obtidos nas reações entre o solo e a cal, como por exemplo: o anidrido carbônico presente no ar, a presença de águas superficiais e/ou subterrâneas no local, os índices pluviométricos da região e os esforços mecânicos produzidos na obra.

Segundo GUIMARÃES (2002), a técnica solo-cal baseia-se na inter-reação entre os elementos constituintes do solo, a cal e os componentes presentes no meio-ambiente, de maneira que a interdependência entre eles é traduzida através das reações químicas, físicas e físico-químicas que ocorrem durante todo o processo de estabilização do solo. A Figura 2.11 apresenta o esquema dessa interdependência.

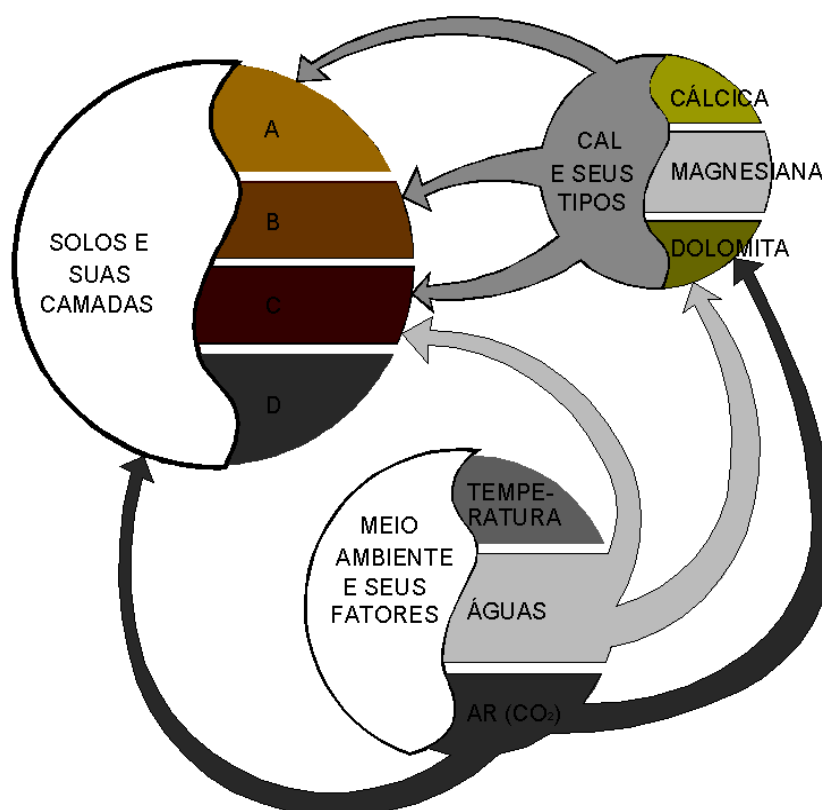


Figura 2.11: Esquema de fatores que influenciam as reações solo-cal (GUIMARÃES, 2002).

GUIMARÃES (2002) comenta, ainda, que a cal, seja ela virgem ou hidratada, influi no processo de estabilização de um solo em função do valor de seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio. Segundo NÔBREGA (1981), os íons desses elementos, presentes nas cales, são responsáveis pela modificação no comportamento dos argilo-minerais presentes no solo. Contudo, a autora afirma que cada solo reage de forma particular para cada tipo de cal aplicada e que a escolha e aplicação desta não pode ser aleatória.

Ainda com relação a cal, SANTOS (2004) afirma que, de maneira geral, a resistência de um solo tratado com este estabilizante aumenta a medida que se adiciona uma porcentagem maior deste, havendo um crescimento além de determinado teor do aditivo. Este aumento está intimamente ligado ao tempo de cura ao qual a mistura foi submetida e a temperatura apresentada durante esse processo. A autora comenta que dos materiais envolvidos na mistura solo-cal, a natureza do solo é a que mais interessa, uma vez que a cal é facilmente selecionada e controlada.

Para MALLELA, QUINTUS e SMITH (2004), o solo possui diversas propriedades e características que influenciam a sua reatividade com a cal. Dentre elas, podem ser citadas: o pH do solo, a mineralogia da fração argila, a presença de carbonatos e/ou sulfatos, a relação sílica/alumínio, a relação sílica/sesquióxidos, o grau de intemperismo, o teor de matéria orgânica, a drenagem natural, a presença excessiva de sódio permutável e o ferro extraível.

De acordo com NÔBREGA (1981), um solo após ser misturado com a cal sofre alteração em suas propriedades físico-químicas expressa pela elevação do pH, significando um ataque agressivo aos constituintes do solo que são estáveis nas condições de pH normais. Segundo a autora, a partir de um valor de pH 9 o silício e o alumínio, presentes no solo, se solubilizam levando a destruição do argilo-mineral. Contudo, ela comenta que, quando da estabilização com a cal, além do ataque e solubilização do silício e do alumínio, há a possibilidade de recombinação destes com o cálcio e formação de silicatos, aluminatos ou alumínio-silicatos de cálcio, que têm propriedades cimentantes.

NÔBREGA (1981) afirma ainda que a predominância de neoformação de um determinado produto, da reação entre o solo e a cal, é condicionada pela natureza

mineralógica do solo, ou seja, pela ocorrência maior de silício ou alumínio. Segundo CARVALHO (1988) esta ocorrência está intimamente ligada com a atividade pozolânica de um solo laterítico. O autor comenta ainda que o parâmetro de reatividade à cal em um solo aumenta a medida que a porcentagem de sílica cresce e que a de alumina decresce, considerando ambas no estado amorfo.

Para GUIMARÃES (2002) cada solo possui as suas peculiaridades, e dependendo destas, a mistura com a cal será bem sucedida ou não. O autor apresenta uma classificação pedológica das camadas de solos, conforme apresentada anteriormente na Figura 2.11, e classifica estas da seguinte maneira, em função de seus materiais constituintes:

- a) camada A: constituída por materiais orgânicos ou caracterizada por ser lavada;
- b) camada B: constituída por sais que emigram de outras camadas;
- c) camada C: constituída por rocha levemente alterada;
- d) camada D: constituída por rocha fresca.

Segundo o autor, as camadas representadas pela letra B e C, normalmente correspondentes aos materiais A6 e A7 da classificação do TRB, ou seja, aos solos argilosos, são as que intervêm no processo de estabilização. O autor comenta que nessas camadas localizam-se principalmente os óxidos e hidróxidos, particularmente os de ferro e de alumínio. Estes óxidos e hidróxidos interferem diretamente nas reações das misturas de solo-cal, dependendo do mineral argílico ao qual o solo é constituído.

De acordo com LOVATO (2004) a presença de matéria orgânica influencia o processo de estabilização, retardando as reações, e produzindo pequenos ganhos de resistência. Alguns autores afirmam que em solos com teor de matéria orgânica maior que 1% não há resposta à estabilização.

Com relação a presença de sulfatos no solo, LOVATO (2004) afirma que este fato pode prejudicar as reações solo-cal. O autor comenta ainda que o grau de deterioração relacionados aos sulfatos depende de diversos fatores, e não apenas do teor

de sulfato solúvel, devendo ser levados em consideração também a disponibilidade de outros íons, o pH, o grau de carbonatação, o teor de umidade e a temperatura.

A NATIONAL LIME ASSOCIATION DOS ESTADOS UNIDOS – NLA (2000) afirma que o efeito deletério do sulfato pode ser reduzido e comenta que uma solução para isto, seria forçar o início destas reações antes da compactação, adotando-se um tempo de espera de pelo menos 24 horas até 7 dias (dependendo do teor de sulfato).

A NLA (2000) relata ainda a definição dos teores de sulfatos que definem seu risco quando um solo é estabilizado pela cal, relatos estes citados posteriormente por LOVATO (2004). De acordo com a NLA (2000) os teores estabelecidos de sulfatos que definem seu risco de estabilização de solo com a cal são:

- a) níveis de sulfato de pouco risco: $< 0,3 \%$;
- b) níveis de sulfato de moderado risco: $> 0,3 \%$ e $< 0,5 \%$;
- c) níveis de sulfato de risco moderado à alto: $> 0,5 \%$ e $< 0,8 \%$;
- d) níveis de sulfato de elevado risco: $> 0,8 \%$;
- e) níveis de sulfato inaceitáveis: $> 1 \%$.

De forma geral, percebe-se que a estabilização de um solo pela cal depende de vários fatores, que variam desde as propriedades do solo a ser tratado até as condições ambientais encontradas no meio. Contudo, deve ser observado à priori, o custo/benefício da utilização da cal como estabilizante e os recursos, tanto financeiro quanto de equipamentos, disponíveis para a execução da infra-estrutura rodoviária em questão.

2.4.6. Produção da Cal no Brasil e em Outros Países

Em relação à produção de cal no Brasil, à Associação Brasileira dos Produtores de Cal – ABPC (2007), através de dados fornecidos pelos seus associados, apresenta como valor da produção geral anual, referente ao ano de 2006, um número aproximado de 7.057 mil toneladas, o que mantém o país na disputa da 5ª posição entre os países produtores. Contudo, quando considerado apenas o mercado livre, ou seja, aquele em

que a cal é comercializada por terceiros, a produção é de, aproximadamente, 5.9 milhões de toneladas. Segundo a ABPC (2007) essa diferença deve-se aos setores de consumo que suprem suas necessidades com produção própria e que são representantes do mercado denominado de cativo.

A Figura 2.12 mostra a distribuição do volume total produzido entre empresas associadas à ABPC, empresas não associadas e o chamado mercado cativo. Já a Figura 2.13 mostra apenas a produção no mercado livre, eliminando-se do total geral à produção cativa.

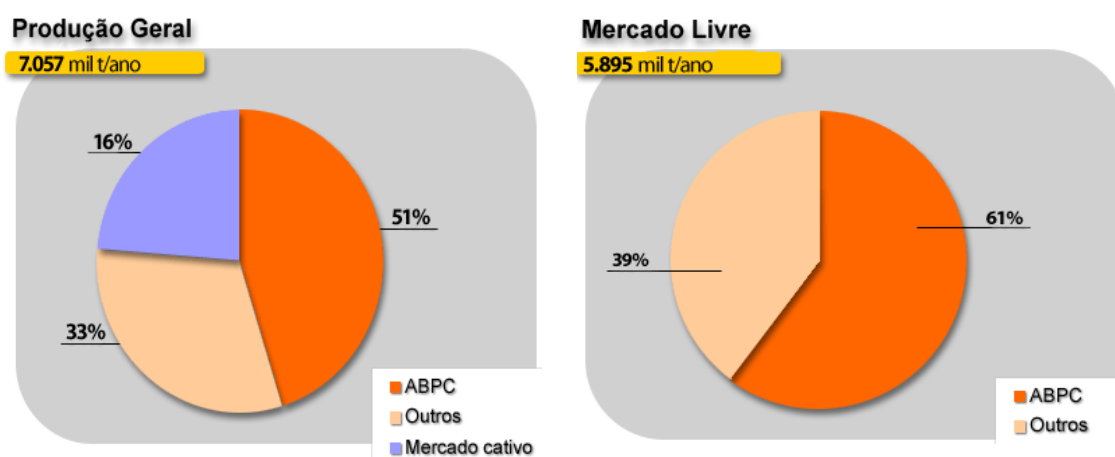


Figura 2.12: Produção Geral (ABPC, 2007). **Figura 2.13:** Mercado livre (ABPC, 2007).

A ABPC (2007) relata ainda que a cal, na sua forma virgem ou hidratada, possui inúmeras aplicações, tanto na construção civil como na área industrial. Além disso, afirma que no ano de 2006 o faturamento anual deste setor (considerando apenas as empresas associadas a ABPC) foi de R\$ 1 bilhão, gerando cerca de 5000 mil empregos diretos e, aproximadamente, R\$ 120 milhões de ICMS (imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços). A Figura 2.14 expõe a produção anual (3.577 mil toneladas) no mercado livre, referente ao ano de 2006, dessas formas de cal, e especifica a porcentagem fabricada para cada uma. Já a Figura 2.15 mostra as áreas de consumo destes materiais, referentes também ao ano de 2006.

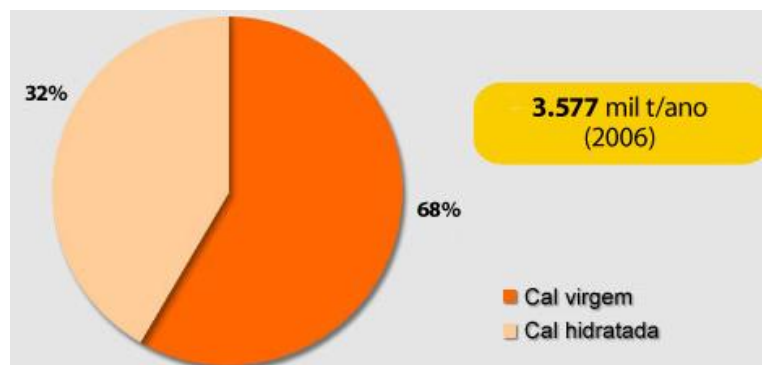


Figura 2.14: Produção no mercado livre de cal, na forma virgem ou hidratada, referentes ao ano de 2006 (ABPC, 2007).

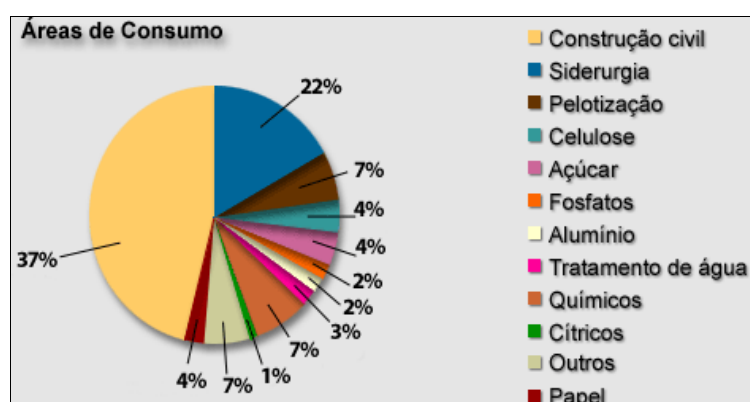


Figura 2.15: Áreas de consumo da cal no Brasil referentes ao ano de 2006 (ABPC, 2007).

Com relação à produção e destinação da cal em outros países, GUIMARÃES (2002) apresenta dados referentes ao ano de 1990 (Tabela 2.6) dos setores de consumo e da fabricação em 1000 toneladas na França, Alemanha, Japão, África do Sul e Estados Unidos. Estes países de acordo com o autor estão entre os maiores produtores e consumidores de cal no mundo.

Tabela 2.6: Produção da cal em alguns países do mundo.

SETORES DE CONSUMO	PAÍSES (em 1000 ton)				
	FRANÇA	ALEMANHA	JAPÃO	AF. DO SUL	EUA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	364	140	537	12	845
CONSTRUÇÃO CIVIL	79	584	64	160	499
AGRICULTURA	261	161	375	-	20
SIDERÚRGICA	976	1850	8034	802	5002
MEIO AMBIENTE	383	772	3752	26	4180
CONSUMO TOTAL	2063	3507	12762	1000	10546

Fonte: GUIMARÃES/2002.

Entretanto, GUIMARÃES (2002) faz uma ressalva sobre os dados da Tabela 2.6 e comenta que não estão incluídas as produções da China e das Repúblicas que integravam a antiga União Soviética - URSS. O autor relata que a China produziu mais de 17 milhões de toneladas nesse mesmo ano, enquanto a URSS, maior produtora mundial, produziu mais de 28 milhões de toneladas de cal.

2.4.7. Produção da Cal no Estado do Ceará

Com relação ao estado do Ceará, especificamente, vale ressaltar a produção da cal da empresa Carbomil Química S/A (cujo escritório está situado no município de Fortaleza), responsável pelo fornecimento desse material em praticamente todo o estado e cedente das cales utilizadas nesta pesquisa. Essa empresa produz não só para atender as necessidades locais, como importa e exporta boa parte de seus produtos.

A fábrica da Carbomil Química S/A está situada na fazenda Baixa Grande, a aproximadamente 20 Km do município de Limoeiro do norte, no estado do Ceará. Esta empresa fornece ao mercado três formas de cales distintas: o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), o óxido de cálcio ou cal virgem (CaO) e o hidróxido de cálcio ou cal hidratada $Ca(OH)_2$. A produção mensal desses produtos e sua destinação são apresentadas, conforme informações obtidas com o Eng. Químico Crisanto Prado Santiago (gerente de assistência ao cliente da Carbomil) em visita à empresa em Agosto de 2007, na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Produção e destinação das cales da empresa Carbomil Química S/A.

PRODUTOS	DESTINAÇÃO	PRODUÇÃO MENSAL APROXIMADA (em toneladas)
Carbonato de cálcio ($CaCO_3$)	Fabricação de tubos PVC, cola, móveis e plásticos de um modo geral.	6.000
Óxido de cálcio (CaO)	Indústrias químicas e químico-siderúrgicas.	12.000
Hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$	Construção civil, usina de açúcar, tratamento de água e higienização.	2.500 – 3.000

Fonte: Própria

Além da Carbomil Química, o grupo Carbomil apresenta outras 4 unidades: a Itamil mineração situada em Fortaleza-CE, a Itamil mineração situada em Cachoeiro de Itapemirim-ES, a Libra situada no município de Banabuiú-CE (rodovia CE 113, km 40),

e a CalBras. De acordo com o Eng. Químico Crisanto Prado Santiago, da Carbomil Química, a Itamil de Fortaleza e a Cachoeira destinam seus produtos apenas para serem utilizados como matéria-prima na fabricação de tintas. Já a Libra destina seus produtos à fabricação de ligas de ferro de silício.

Com relação ao processo construtivo das cales da empresa Carbomil Química S/A, a Figura 2.16 apresenta um fluxograma simplificado desde a mineração desses materiais até a sua distribuição ao mercado consumidor, como mostrado anteriormente no fluxograma da Figura 2.5.

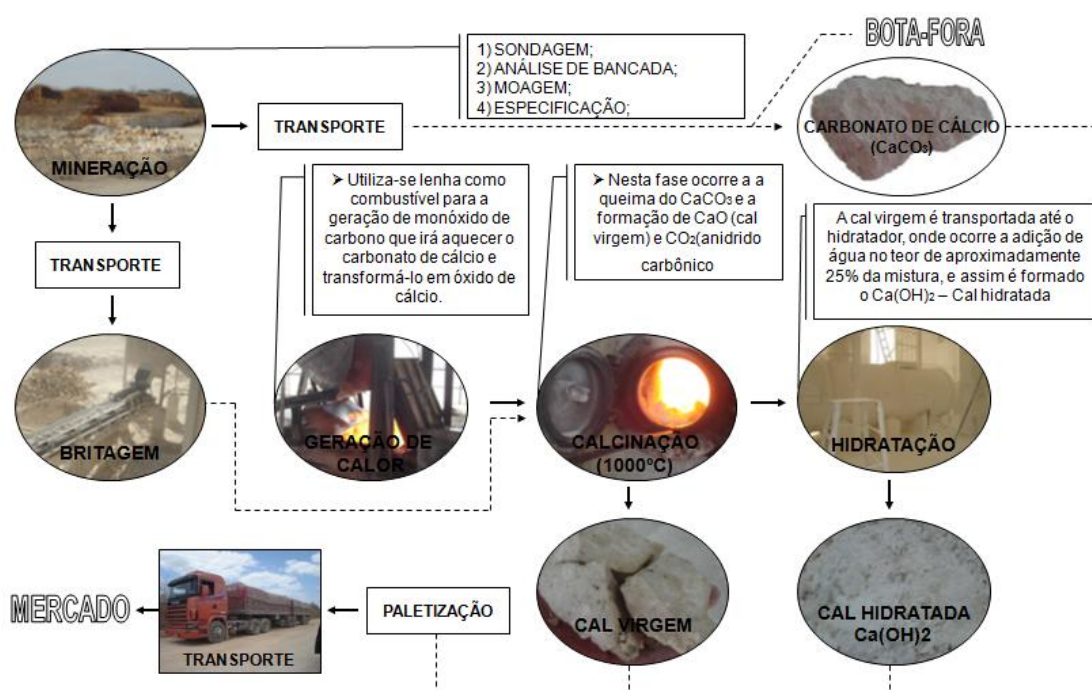


Figura 2.16: Processo de fabricação industrial das cales da Carbomil Química S/A (Fonte: Própria).

A Carbomil Química S/A está no mercado desde 1960 e atualmente apresenta um quadro de funcionários superior a 400, além de possibilitar a terceirização de muitos outros serviços realizados diariamente na empresa. A fábrica desta empresa, situada no município de Limoeiro do Norte-CE, apresenta uma grande infra-estrutura e apresenta um esquema de produção bastante mecanizado, como mostra a Figura 2.17.



Figura 2.17: Fábrica da carbomil Química S/A em Limoeiro do Norte-CE (Fonte: Própria).

2.4.8. Processo Construtivo de Misturas Estabilizadas pela Cal

De acordo com o IFG – INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005), a construção de camadas estabilizadas pela cal obedece às seguintes etapas construtivas:

1. regularização da superfície da camada a ser estabilizada;
2. distribuição da cal sobre a superfície da camada;
3. mistura da cal ao longo da camada;
4. umedecimento;
5. compactação do material e cura.

Os efeitos de cada operação (etapa) no projeto e no desempenho do pavimento são discutidos a seguir:

Inicialmente, na etapa de regularização da superfície, deve-se realizar a escarificação e pulverização da camada a ser estabilizada a fim de se obter a sua perfeita regularização. Feito isso, deve-se proceder novamente a escarificação da camada ao

longo de toda a faixa a ser estabilizada, em uma profundidade pré-determinada (Figura 2.18). É desejável que sejam removidos alguns materiais danosos, que possuam um tamanho superior a 3 polegadas, tais como: tocos, raízes, turfas, e agregados (NATIONAL LIME ASSOCIATION, 2004).



Figura 2.18: Escarificação (NLA, 2004).

Na etapa seguinte, a distribuição da cal é feita pelo condicionamento de sacos em intervalos pré-determinados (Figura 2.19), indicados por estudos preliminares do projeto (IFG, 2005). No entanto, a National Lime Association (2004) comenta que a cal também pode ser distribuída a granel, por meio de caminhões ou trailers adaptados com um espalhador mecânico (Figura 2.20) ou pneumático (Figura 2.21), que distribuem a pasta de cal uniformemente ao longo de toda a área superficial da camada a ser estabilizada.

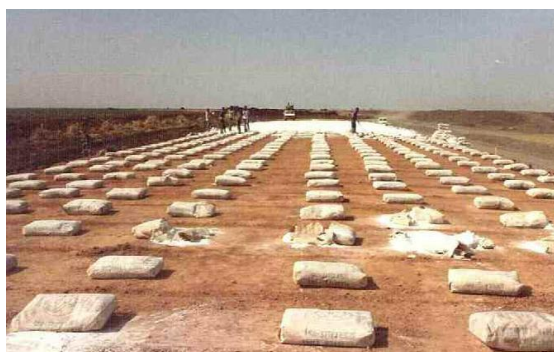


Figura 2.19: Posicionamento de sacos de cal (IFG, 2005).



Figura 2.20: Espalhador mecânico para a aplicação da cal em pó (NLA, 2004).



Figura 2.21: Exemplo de aplicação da pasta de cal com o espalhador pneumático (NLA, 2004).

Após a etapa de distribuição do estabilizante, formam-se leiras para sua contenção (antes deste ser misturado ao solo). Em seguida, uma mistura preliminar é realizada para a distribuição da cal sobre toda a camada de solo (Figura 2.22). Feito isso, procede-se uma pulverização e escarificação iniciais (Figura 2.23) a fim de preparar a mistura de solo e cal para a adição de água utilizando-se caminhões pipas (Figura 2.24), dando início, dessa forma, as reações químicas estabilizantes. A água deve ser adicionada durante todo o processo de mistura, à medida que a camada for sendo novamente pulverizada e escarificada (NATIONAL LIME ASSOCIATION, 2004).



Figura 2.22: Enleiramento lateral do solo para contenção da cal antes do processo de mistura (NLA, 2004).



Figura 2.23: Escarificação e pulverização após a distribuição da cal em pó (NLA, 2004).



Figura 2.24: Adicionamento de água após a aplicação da cal em pó (NLA, 2004).

De acordo com o IFG (2005) equipamentos robustos de mistura, com potência adequada, realizam o processo de pulverização do solo e o de mistura, simultaneamente, com a cal e a água (Figura 2.25). As máquinas mais eficientes realizam a operação em apenas uma passada, permitindo que a camada seja compactada rapidamente e minimizando a perda da densidade da mistura e da força causada por algum atraso durante a compactação.



Figura 2.25: Mistura da cal ao solo simultaneamente a adição de água (IFG, 2005).

Com relação ao processo de compactação dos materiais, a NATIONAL LIME ASSOCIATION (2004) recomenda que a compactação de uma camada deve ser

iniciada imediatamente após o processo de mistura. Caso isto não ocorra, um atraso de até 4 dias pode não ser um problema se algumas precauções forem tomadas. Essas precauções determinam que a mistura seja compactada levemente e mantida úmida até a compactação ser completamente realizada. Já em relação aos longos atrasos, pode ser necessária a incorporação de uma quantidade adicional da cal ao solo. O processo de compactação pode ser realizado em uma camada, inicialmente, utilizando-se um rolo pé-de-carneiro (Figura 2.26). A execução do acabamento final da superfície é realizada com a utilização de um rolo de rodas lisas (Figura 2.27).



Figura 2.26: Rolo pé-de-carneiro (NLA, 2004).



Figura 2.27: Rolo liso (NLA, 2004).

Após a etapa de compactação procede-se a cura. Este processo, segundo O IFG – INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005), é muito importante por três razões:

1. assegura que uma umidade suficiente fique retida na camada de modo que a cal possa continuar hidratada;
2. reduz a retração;
3. e reduz o risco de carbonatação no topo da camada.

A NATIONAL LIME ASSOCIATION (2004) define cura como sendo o tempo necessário para que uma camada, após a sua compactação, obtenha o seu total endurecimento. Este endurecimento tende a ocorrer de tal forma que as operações de descarregamento, realizadas por caminhões, durante a construção das camadas seguintes

não causem nenhuma deterioração a camada inferior. O processo de cura pode ser realizado de maneiras distintas:

- a) cura úmida – consiste em manter a superfície da camada em condições adequadas de umidade, realizando para isto, quando necessário, uma distribuição de água e rolagem;
- b) cura de membrana – consiste na selagem da camada compactada através de uma imprimação betuminosa que pode ser aplicada uma ou mais vezes. Essa selagem protege a camada de solo-cal do contato com o dióxido de carbono, evitando assim a ocorrência da reação de carbonatação e a formação de carbonato de cálcio - $CaCO_3$ (Figura 2.28).



Figura 2.28: Cura por imprimação betuminosa (NLA, 2004)

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de estabilização de solos pela cal, dos componentes integrantes dessas misturas, do processo de fabricação industrial desse aditivo, especificamente, do material nesse trabalho, e das etapas construtivas das camadas tratadas por esse estabilizante. No capítulo seguinte serão abordados outros temas, como a seleção dos materiais analisados e os métodos utilizados para realização dos ensaios laboratoriais executados nessa pesquisa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta informações gerais sobre a região estudada, as características dos materiais empregados na pesquisa, os critérios adotados para a escolha desses materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais.

3.2. INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

De acordo com o relatório anual de atividades, desenvolvido em 2003 pela secretaria de desenvolvimento econômico do governo do estado do Ceará, a política de desenvolvimento econômico do respectivo estado tem atraído uma série de indústrias e de agroindústrias para a região. Segundo esse relatório, desde 1995 foram assinados 759 protocolos de investimento, com mais de 100 municípios beneficiados, US\$ 7,9 bilhões investidos, gerando aproximadamente 173 mil empregos.

O grande número de investimentos realizados pelo Governo Cearense e pelos investidores nacionais e internacionais da iniciativa privada, principalmente em atividades envolvendo o agronegócio, está ampliando as frentes produtivas dos agrópolos locais, em especial do agrópolo da região do Baixo Jaguaribe.

De acordo com dados obtidos junto à SEAGRI (Secretaria de Agricultura e Pecuária) e citados por RABÊLO (2006), o agropólo do Baixo Jaguaribe, juntamente com outros seis agropólos de agricultura, representa o modo de organização espacial do estado do Ceará, levando-se em conta as áreas com maiores potencialidades para agricultura irrigada do estado, com foco na exploração sustentável do setor produtivo. Essa divisão em agropólos foi implementada na região em 1998, a fim de possibilitar um maior desenvolvimento sustentável e uma melhor qualidade de vida aos moradores locais.

Atualmente, o território do estado do Ceará, segundo o site do IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, encontra-se dividido em 18 agropólos de desenvolvimento agrícolas, englobando todos os municípios do estado.

A Figura 3.1 apresenta um mapa do estado do Ceará com 6 dos 7 agropólos implantados em 1998. Esses agropólos, acrescidos do agropólo localizado na região central do estado, foram denominados por: Baixo Acaraú, Ibiapaba, Cariri, Centro Sul, Baixo Jaguaribe, Metropolitano e Sertão Central.

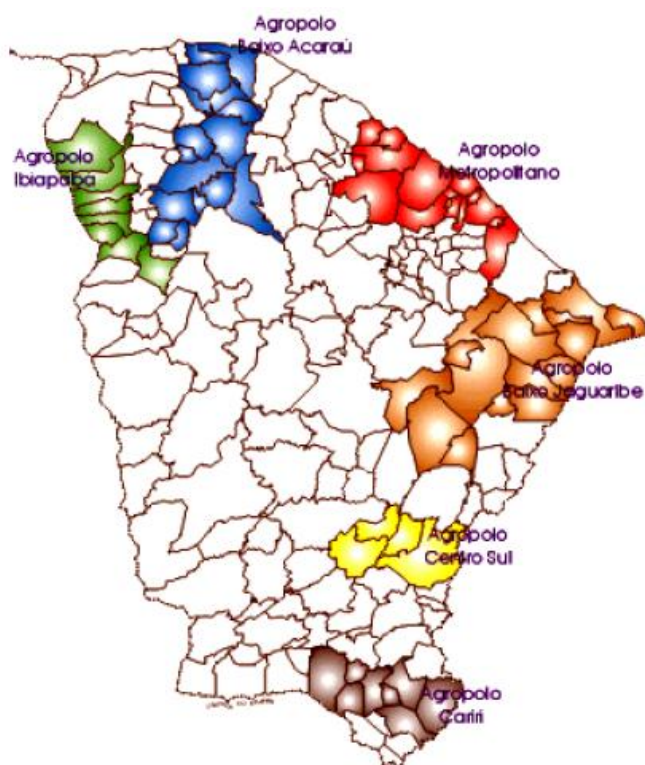


Figura 3.1: Mapa do Ceará e seus agropólos (GIRÃO *et. al*, 2000)

Segundo RABÊLO (2006) esses agropólos envolvem 80 dos 184 municípios cearenses e mais de 2,9 milhões de pessoas, o equivalente a 39% da população do estado. O autor menciona ainda, com base em informações obtidas no IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) que a participação dessas regiões na composição do PIB (Produto Interno Bruto) do estado do Ceará é da ordem de 29%.

Com relação ao agropólo do Baixo Jaguaribe, especificamente, pode-se mencionar que este, no ano de sua implementação, era constituído por 15 municípios: Limoeiro do Norte, Russas, Tabuleiro do Norte, São João do Jaguaribe, Morada Nova, Ibicuitinga, Jaguaruana, Palhano, Quixeré, Alto Santo, Icapuí, Itaiçaba, Aracati, Jaguaratama e Nova Jaguaribara.

Esse agropólo, como mostrado na Figura 3.2 está situado entre os meridianos de $37^{\circ} 58' 30''$ e $38^{\circ} 58' 12''$ de longitude a oeste de Greenwich e os paralelos de $04^{\circ} 24' 00''$ e $05^{\circ} 48' 00''$ de latitude sul, limitando-se ao norte com o oceano atlântico e com os municípios de Fortim, Ocara, Ibaratama e Beberibe; ao sul limita-se com o estado do Rio Grande do Norte e com os municípios de Jaguaribe, Iracema e Potiretama; a leste, com o oceano atlântico e com o estado do Rio Grande do Norte; e a oeste, com os municípios de Ibaratama, Quixadá, Banabuiú e Solonópole.

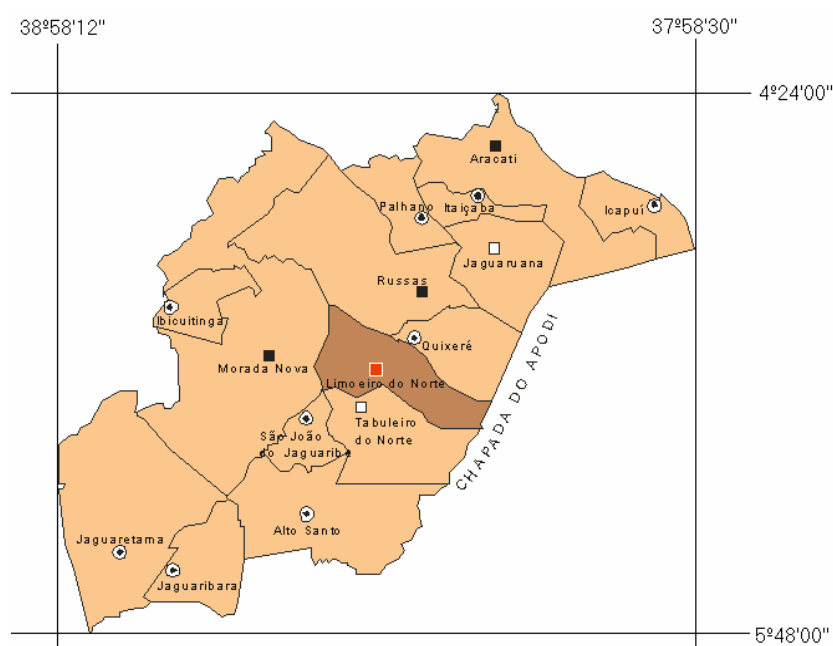


Figura 3.2: Divisão municipal e localização em coordenadas geográficas do agropólo do Baixo Jaguaribe (RABÊLO, 2006).

Segundo informações coletadas pelo IBGE (2007), a população residente desse agropólo, incluindo os 15 municípios pertencentes ao mesmo no ano de sua implementação, é de aproximadamente 424.267 habitantes, resultando em uma densidade demográfica de 31,96 hab/km². Esses valores, assim como a população, a área e a densidade demográfica de cada município encontram-se expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados referentes aos municípios do agropólo do Baixo Jaguaribe.

Municípios	População Residente (hab.)	Área (Km²)	Densidade Demográfica (hab./Km²)
Alto Santo	19176	1339	14,32
Aracati	65903	1229	53,62
Ibicuitinga	10997	424	25,94
Icapuí	18197	429	42,42
Itaiçaba	7433	209	35,56
Jaguaretama	17854	1760	10,14
Jaguaruana	30843	867	35,57
Limoeiro do Norte	53599	752	71,28
Morada Nova	61908	2779	22,28
Nova Jaguaribara	9992	668	14,96
Palhano	8792	443	19,85
Quixeré	18780	617	30,44
Russas	64177	1588	40,41
São João do Jaguaribe	8344	280	29,80
Tabuleiro do Norte	28272	862	32,80
Total	424267	14246	Média = 31,96

Fonte: IBGE (2007)

O agropólo do Baixo Jaguaribe, além de possuir uma parcela representativa da população do estado do Ceará, compreende uma área de aproximadamente 63.000 hectares, o que representa 37% de toda área irrigada do estado, sendo considerado o maior agropólo da região (SEAGRI, 1999). De acordo com Ceará (2003) os números crescentes de investimentos recebidos por essa região acarretarão novas oportunidades para o desenvolvimento local de atividades relacionadas à agricultura irrigada e aos agronegócios melhorando, dessa forma, a piscicultura, as bacias leiteiras, o lazer e o turismo local.

Dessa maneira, levando-se em consideração as perspectivas de crescimento dessa região, faz-se necessária a elaboração de um planejamento racional de desenvolvimento da região a partir da melhoria da infra-estrutura de suas cidades, especificamente, de suas estradas.

A região do agropólo do Baixo Jaguaribe não possui em sua infra-estrutura básica ferrovias e hidrovias. Contudo, a mesma é servida pela rodovia BR-116.

Atualmente, existe uma enorme carência de novas estradas na região devido aos inúmeros investimentos, públicos e privados, na área dos perímetros irrigados.

Segundo levantamento de dados junto aos técnicos da SEAGRI, em Outubro de 2005, a demanda reprimida de rodovias vicinais na região do Baixo Jaguaribe é de aproximadamente 235 Km (ver RABÊLO, 2006). A Tabela 3.2, com dados fornecidos em Novembro de 2005 pelo Núcleo de Suporte à Infra-estrutura e Gestão de Perímetros Públicos Irrigados – NUSIP da SEAGRI, citada por RABÊLO (2006), apresenta as rodovias situadas na região do agropólo de Baixo Jaguaribe com prioridade para melhorias em sua malha viária.

Tabela 3.2: Rodovias situadas na região do Agropólo do Baixo Jaguaribe com prioridades para melhorias em sua malha viária.

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	MUNICÍPIO	EXTENSÃO (Km)
1	Limoeiro do Norte – FAPIJA	Limoeiro do Norte	13
2	Acessos aos Projetos 7.1, 7.2 e 4.1	Limoeiro do Norte	10
3	Acesso ao Projeto Inthor	Limoeiro do Norte	7
4	Cabeça Preta - Lagoinha – Tomé	Limoeiro do Norte	20
5	Jaguaruana - Perímetro Irrigado	Jaguaruana	5
6	BR-304 - Assentamento Campos Verdes	Aracati	10
7	BR-304 - Agrícola Cajazeiras	Aracati	22
8	Tabuleiro do Norte - Projeto Altinho	Tabuleiro do Norte	7
9	Entroncamento BR-116 (Morada Nova)	Morada Nova	26
10	Morada Nova - Beira Rio	Morada Nova	30
11	Tabuleiro do Norte - Olho D'Água da Bica	Tabuleiro do Norte	30
12	Entroncamento BR-116 - Entroncamento CE-046	Limoeiro do Norte	33
13	Alto Ferrão - Condomínio Itaiçaba	Itaiçaba	2
14	Entroncamento BR-304 - Projeto Santa Fé	Aracati	3
15	Entroncamento CE-377 - Organics Holdings	Quixeré	12
16	Itiçaba - Alto Ferrão	Itaiçaba	5

Fonte: RABÊLO (2006)

Com relação ao clima encontrado no agropólo do Baixo Jaguaribe, pode-se observar que, através do mapa da Figura 3.3 fornecido pelo IPECE (2007), apenas dois tipos predominam na região: o tropical quente semi-árido, característico do sertão, e o tropical quente semi-árido brando, característico da zona litorânea. A linha vermelha na figura indica a separação entre as duas áreas climáticas.



Figura 3.3: Mapa climático do Agropólo do Baixo Jaguaribe (IPECE, 2007).

Os municípios que possuem um clima tropical quente semi-árido, de acordo com IPECE (2006), apresentam uma precipitação anual média variando de 700 a 850 mm, enquanto que a precipitação pluviométrica anual média dos municípios com clima tropical quente semi-árido brando varia de 700 a 950 mm.

Já as características topográficas da região, apresentadas na Figura 3.4, foram obtidas através de um mapa digital fornecido pelo IPECE (2007), onde pode ser observada a variação de altitude, em metros, de cada área situada no agropolo. A linha vermelha presente nesta figura indica os limites de abrangência da Chapada do Apodi, onde verifica-se uma altitude média de 600 metros.

Através dos mapas apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4 foi possível identificar três regiões do agropólo com características climáticas e topográficas distintas: Litoral, Sertão e Chapada. Essas regiões, bem como às características pedológicas dos solos locais encontrados são apresentadas na Figura 3.5 (adaptada do Instituto de Planejamento do Estado do Ceará – IPLANCE (1997)). Observando esta figura percebe-se a ocorrência de uma grande diversidade de materiais na região, constatando-se, contudo, a predominância de planossolos, neossolos, argissolo e cambissolo.

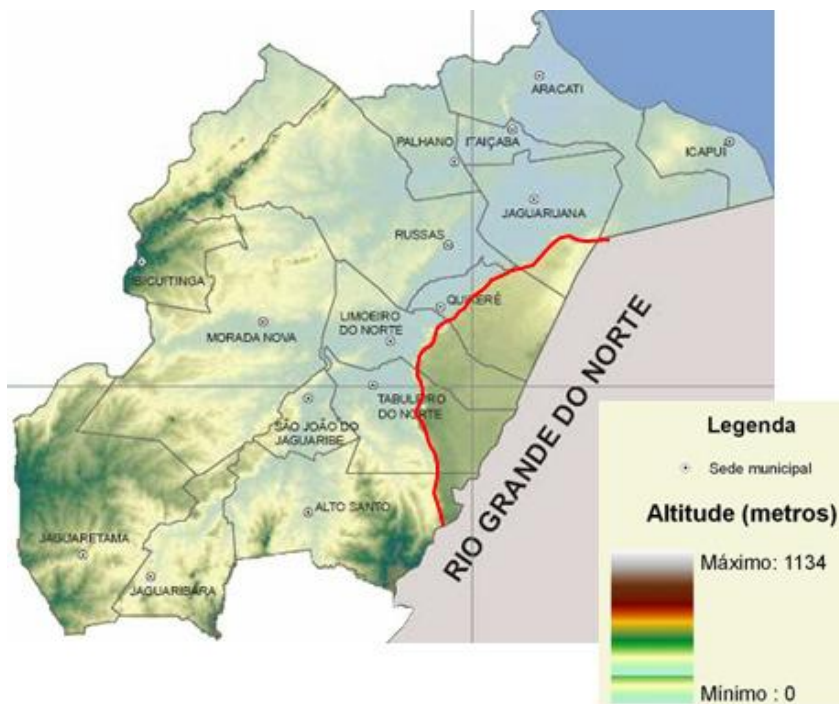


Figura 3.4: Mapa Topográfico do Agropólo do Baixo Jaguaribe (IPECE, 2007).



Figura 3.5: Mapa pedológico do agropólo do Baixo Jaguaribe (adaptado do INPLANCE, 1997 por RABÊLO, 2006).

3.3. SELEÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1. Solos

Os trechos de coletas dos solos, analisados nesta pesquisa, foram escolhidos com base nas características dos materiais, bem como pela prioridade de demanda para melhoria da pavimentação local.

É importante ressaltar que os pontos de coleta das amostras analisadas nesta pesquisa encontram-se próximos às duas regiões, Aracati e Morada Nova, com uma demanda considerável de pavimentação (91 Km) em relação ao número de vias apresentadas na Tabela 3.2, que necessitam ser melhoradas.

Para a realização dos ensaios laboratoriais foram selecionadas e coletadas duas amostras de solos finos situadas na região do agropólo do Baixo Jaguaribe. Esses solos foram escolhidos por apresentarem presença marcante de partículas finas (argila principalmente), índices de plasticidade elevados e baixas capacidades de suporte. Tais propriedades inviabilizam o emprego desses materiais, sem estabilização, nas camadas do pavimento.

Os solos estudados no trabalho foram inicialmente coletados nas duas regiões previamente selecionadas, sendo uma amostra retirada nas proximidades do município de Aracati (Am-A) e a outra nas proximidades do município de Morada Nova (Am-B). Durante a coleta das amostras foi utilizado um aparelho GPS (Global Positioning System) de navegação da marca Garmin, Etrex 12 Channel, com precisão máxima de 10 m. O perfil de cada jazida de solo foi registrado por meio de uma Câmera Fotográfica Digital da marca Sony do tipo Cyber-Shot DSC-S40.

A primeira amostra de solo utilizada na pesquisa, intitulada por Am-A, foi retirada a uma profundidade de 0,25 m a 1,25 m, como ilustrado na Figura 3.6, aproveitando um corte de talude interno da microempresa Agropecuária Aracati, produtora local de melão, localizada no município de Aracati, em uma estrada vicinal sobre a chapada do Apodi que sai do entroncamento com a CE-377 (conhecida na região como rodovia do Melão) ligando a localidade de Limoeiro do Norte – CE a Tomé – CE. Esse material foi coletado no horizonte B e apresentou 45,4% de sua composição passando na peneira de nº 200 (0,075 mm), sendo classificado de acordo

com a classificação do Transportation Research Board - TRB (AASHTO) como um solo do tipo A-6.

Já a segunda amostra, Am-B, foi coletada em uma jazida situada no Km 64 da CE-138 que fica a, aproximadamente, 4 Km do centro urbano do município de Morada Nova. Essa amostra foi retirada entre uma profundidade de 0,15 m a 0,45 m (Figura 3.7). Esse material foi coletado no horizonte B e apresentou 44,09% passando na peneira de nº 200 (0,75 mm), sendo classificado de acordo com a classificação do Transportation Research Board - TRB (AASHTO) como um solo A-4.

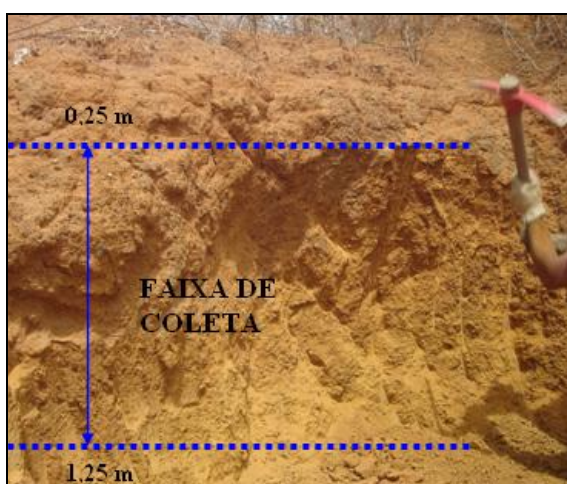


Figura 3.6: Coleta de Solo (Am -A).

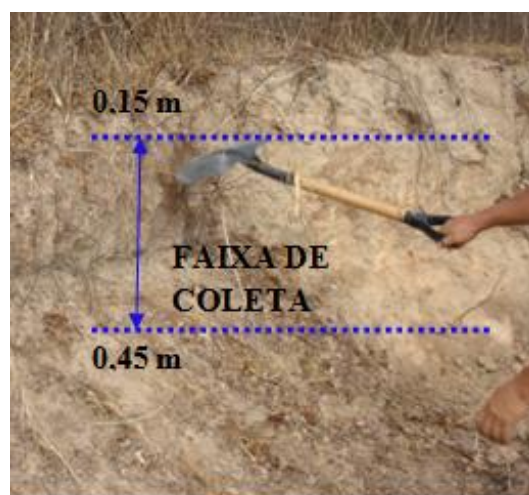


Figura 3.7: Coleta de Solo (Am-B).

A Tabela 3.3 apresenta alguns dados sobre a classificação pedológica dos solos analisados (baseado nos dados disponibilizado no mapa da Figura 3.3) e as coordenadas geográficas dos pontos de coleta desses materiais

Tabela 3.3: Classificação pedológica e localização das amostras coletadas.

Amostra	Horizonte	Prof. de Coleta (m)	Coordenadas Geográficas		Classificação Pedológica
			Latitude	Longitude	
Am-A	B	0,25 – 1,25	4° 52' 11"	38° 02' 56"	Planossolo hápticos
Am-B	B	0,15 – 0,45	5° 28' 43"	38° 33' 30"	Neossolo Litólico

Após a coleta, as amostras de solos selecionadas foram armazenadas em sacos plásticos, com capacidade de 50 Kg, e, em seguida, transportadas até o laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram, posteriormente, realizados os ensaios de laboratório.

É importante ressaltar que os pontos de coleta, das duas amostras de solos estudadas neste trabalho, encontram-se no mesmo agropólo de desenvolvimento agrícola (do estado do Ceará) que a fábrica de cal da empresa Carbomil (Figura 3.8), cedente do estabilizante utilizado na pesquisa. Dessa forma, a possibilidade do emprego da cal na melhoria dos solos investigados além de poder proporcionar a melhoria da pavimentação local na região estudada, poderá ampliar os negócios da empresa Carbomil e, conseqüentemente, aumentar o número de empregos na localidade.

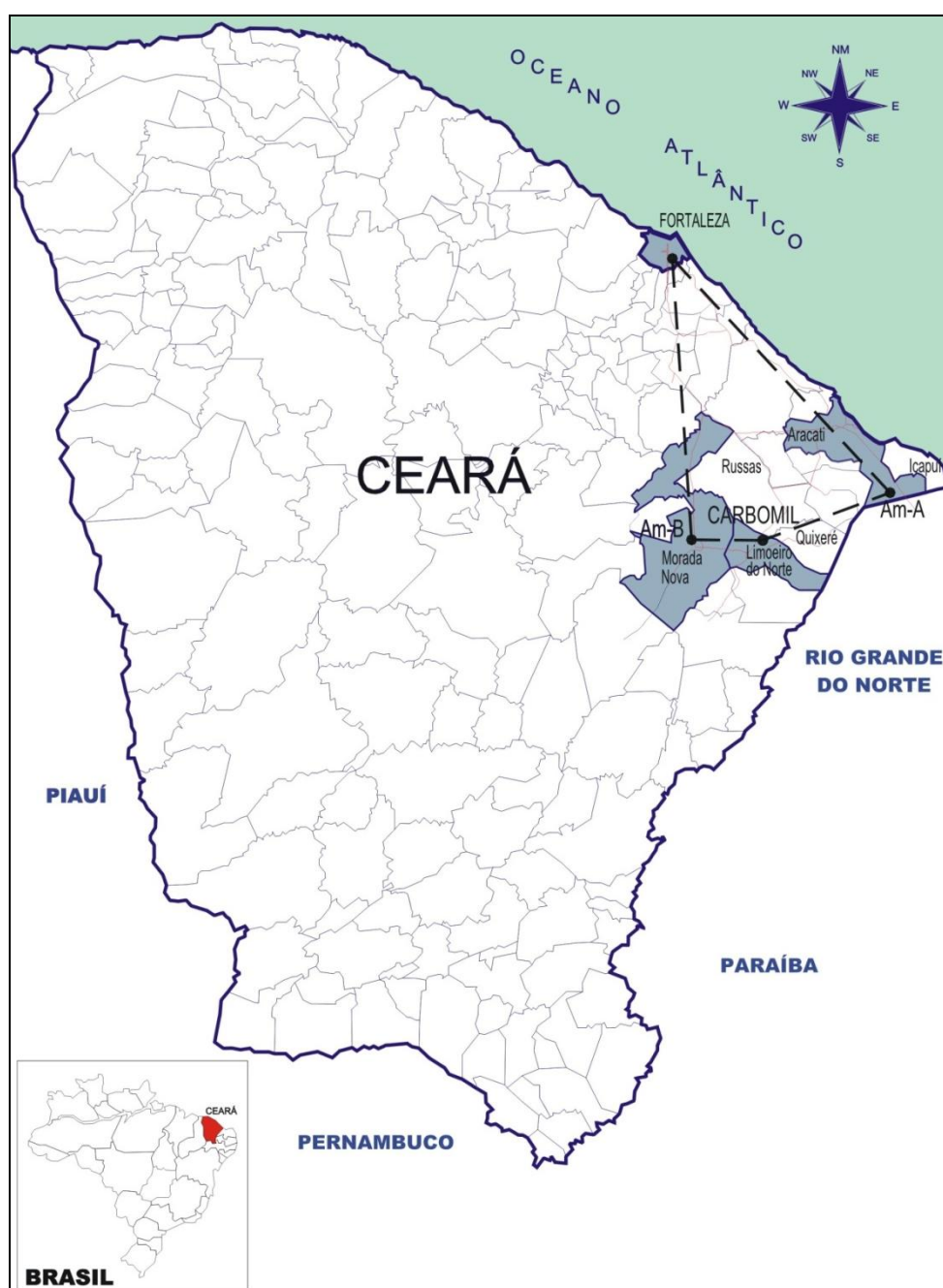


Figura 3.8: Mapa de localização das jazidas estudadas e da fábrica da cal (Carbomil).

A distância da jazida onde foi coletada a amostra de solo Am-A, em relação a fábrica da Carbomil, é de aproximadamente 121 km. Enquanto que a distância entre a jazida do solo Am-B à esta mesma fábrica é de cerca de 33 km.

3.3.2. Cal

A cal utilizada no estudo é a do tipo CH-I, de acordo com a NBR 7175. Este material é bastante abundante no estado do Ceará e foi fornecido pela fábrica da Carbomil Química S/A, que está situada na fazenda Baixa Grande, a aproximadamente 20 Km do município de Limoeiro do Norte - CE. A Tabela 3.4 apresenta a composição química dessa cal, fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.4: Composição Química da Cal Hidratada CHI.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA - CAL HIDRATADA CH-I					
PPC*	Ca(OH) ₂	MgO	RI* (Insolúvel em HCL)	SiO ₂	R ₂ O ₃
23,0 % - 25,0 %	92,5 % - 98,5 %	3,5 % máx	0,5 % Max	0,3 % máx	1,5 % Max

* PPC – Perda Por Calcinação

*RI – Resíduo Insolúvel

3.3.3. Água

Foi utilizada água destilada na execução de todos os ensaios laboratoriais. Contudo, na imersão das amostras (24 horas antes da ruptura dos ensaios de resistência à compressão simples e de 96 horas antes dos ensaios de índice de suporte Califórnia) foi utilizada água potável, proveniente da rede de abastecimento público.

3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.4.1. Considerações Gerais

Inicialmente foi realizada a preparação das amostras de acordo com norma ME-041/94 do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (atual DNIT), intitulada por “Preparação de Amostras para Ensaio de Caracterização”.

Na pesquisa foram analisadas amostras naturais de solos e estabilizadas com 3%, 5% e 7% da cal em relação ao peso seco destes. Dois procedimentos foram testados para a mistura do estabilizante ao solo, um adicionando-se cal em pó (método convencionalmente utilizado) e o outro adicionando-se cal diluída na água de compactação (pasta de cal), que será melhor discutido no subitem 3.4.2 deste trabalho.

ANGELIM (2005) apresentou alguns resultados do comportamento de solos misturados com pasta de cal. O autor realizou, na época, para essas misturas e para outras ensaiadas com cal em pó e com o solo em seu estado natural, os ensaios de caracterização, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão. O autor observou que os resultados obtidos com a utilização da pasta da cal na estabilização do solo analisado, quando considerados os valores de ISC, eram mais satisfatórios do que os obtidos com a utilização da cal em pó, ou seja, apresentavam valores mais elevados.

Para a realização desse trabalho, investigou-se o efeito da forma de aplicação da cal (em pó e em pasta) em ensaios ditos “convencionais” e “não convencionais” (comentados posteriormente) para a estabilização de solos aplicados à construção de rodovias. A Figura 3.9 apresenta um esquema simplificado das etapas realizadas durante esta pesquisa.

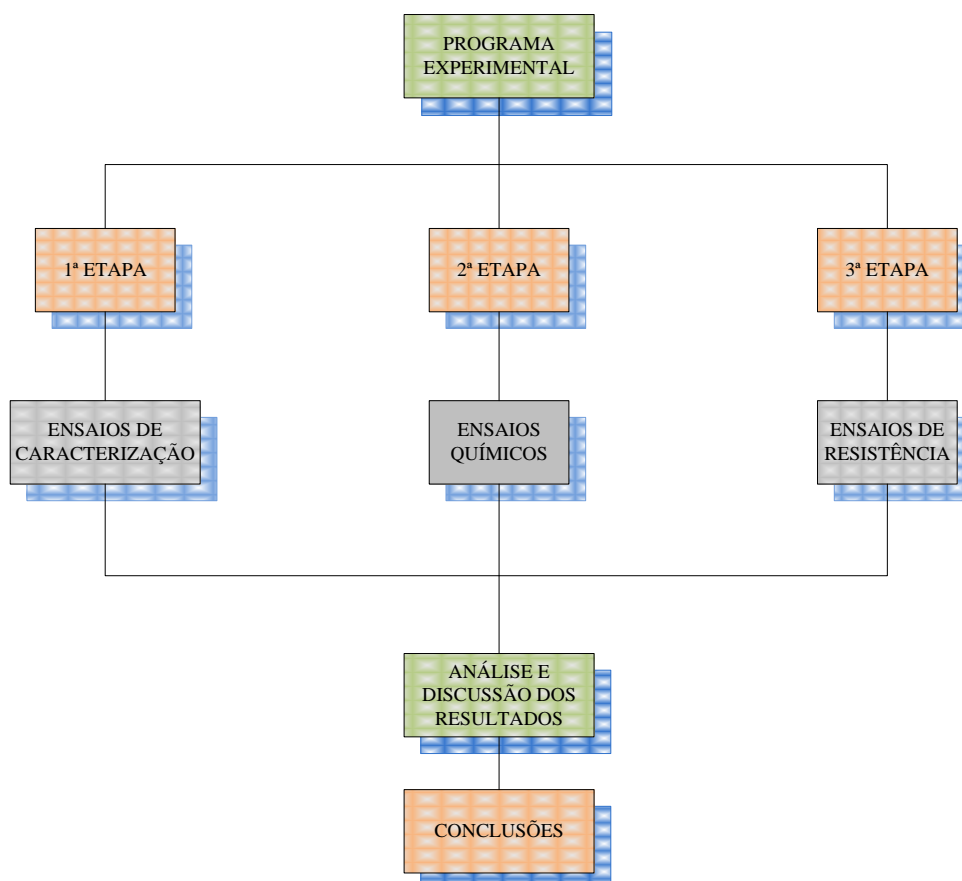


Figura 3.9: Esquema simplificado do programa experimental.

O programa experimental realizado com as amostras coletadas, como pode ser observado na Figura 3.9, foi dividido em três etapas:

- 1ª etapa – ensaios de caracterização das amostras de solos, englobando caracterização granulométrica, densidade real, limite de liquidez e limite de plasticidade, bem como os ensaios de compactação, ISC e expansão para essas amostras;
- 2ª etapa – ensaios químicos, englobando dosagem das misturas de solo-cal pelo método do pH (EADES e GRIM, 1966) e o ensaio de complexo sortivo das amostras naturais de solo;
- 3ª etapa – ensaios de resistência das amostras naturais de solos (RCS, MR e RTCD) e das amostras estabilizadas, englobando a dosagem das misturas de solo-cal pelo método proposto por THOMPSON (1966), discutido posteriormente no item 3.4.3, e os ensaios de compactação Proctor, Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e triaxial dinâmico (MR).

Com relação aos ensaios de resistência, pode-se dizer que cada amostra de solo foi preparada em quantidade suficiente para a moldagem de um corpo de prova para os ensaios de compactação Proctor, dois corpos de prova para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia, três corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), dois corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão diametral e um corpo de prova para os ensaios de Resiliência.

Já para as misturas de solo-cal analisadas, foram realizados os mesmos ensaios elaborados para as amostras naturais de solos, em quantidades similares às executadas nestas, acrescidos do ensaio de dosagem proposto por THOMPSON (1966) e outros ensaios nomeados por “não convencionais”, onde foi analisado o efeito da variação do tempo de espera entre a mistura e a moldagem dos CPs nos resultados de RCS das amostras estabilizadas.

Nos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e resiliência as amostras foram ensaiadas após um período de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Sendo que para o ensaio de RCS, essas amostras foram imersas por um

período de vinte e quatro horas antes da ruptura, enquanto que para os outros dois, a ruptura ocorreu sem imersão prévia.

Já nos ensaios não convencionais, foram analisados os valores de resistência à compressão simples para as amostras de solo-cal (em pó e em pasta), após um período de 28 dias de cura, no teor de 3% da cal em relação ao peso seco de solo, sendo realizadas amostras com um período de 2, 4, 6 e 8 horas entre a mistura e a compactação.

Ressalta-se que todos os corpos-de-prova submetidos a um período de cura, antes da realização dos ensaios, foram previamente enrolados por papel filme, a fim de evitar a perda de umidade para o ambiente.

Com relação aos materiais (solo, cal e água), utilizados nos ensaios laboratoriais, é importante mencionar que os mesmos foram pesados com uma precisão de 0,01 gf, exceto para ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia, cuja precisão adotada foi de 0,1 gf. As percentagens desses materiais foram definidas de modo a se obter um teor de umidade próximo do ótimo ($\pm 0,5\%$) e um peso específico aparente seco próximo ao máximo da curva de compactação ($\pm 0,5 \text{ KN/m}^3$).

3.4.2. Misturas

Com relação às técnicas de estabilização utilizadas, cal em pó e cal em pasta, pode-se dizer que a diferença durante a realização dos ensaios encontra-se na forma em que o estabilizante é adicionado ao solo. No método tradicionalmente utilizado, usando-se cal em pó, adiciona-se inicialmente o aditivo ao solo e, em seguida, é feita a mistura e homogeneização da amostra para, posteriormente, ser adicionada a água de compactação na mistura.

Já no método da cal em pasta (Figura 3.10), o estabilizante é adicionado ao solo após este ser diluído na água de compactação para, posteriormente, a amostra ser misturada, homogeneizada e compactada. Esse método, aparentemente, mostra ser menos agressivo ao ambiente, uma vez que o aditivo reage inicialmente com a água, evitando assim sua dispersão durante a aplicação da técnica, além de se evitar a formação de pó.

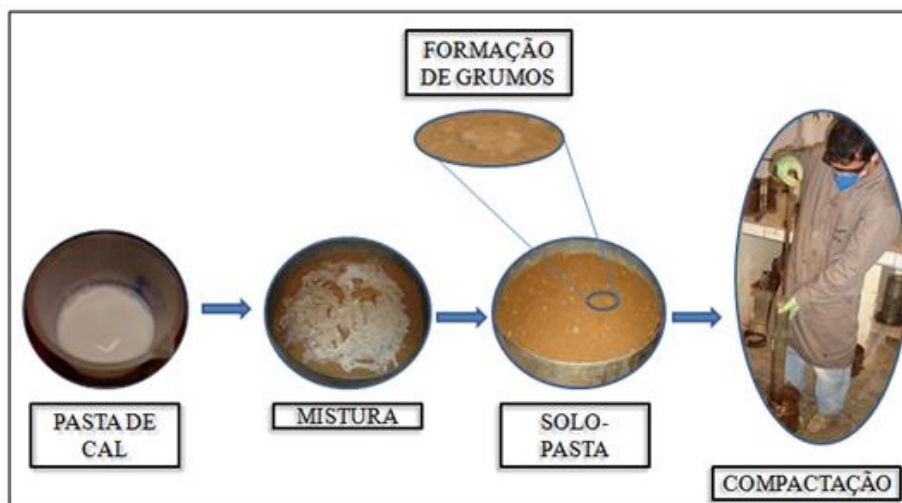


Figura 3.10: Método de ensaio da cal em pasta.

As amostras de solo foram, em quase toda sua totalidade, preparadas com misturas estabilizadas com 3%, 5% e 7% da cal em relação ao peso seco de solo. Para o caso dos métodos de dosagem (Figura 3.11), utilizaram os teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% para o método de dosagem proposto por EADES e GRIM (1966) e 3%, 5%, 7% e 9% para o método de dosagem seguido por THOMPSON (1966).

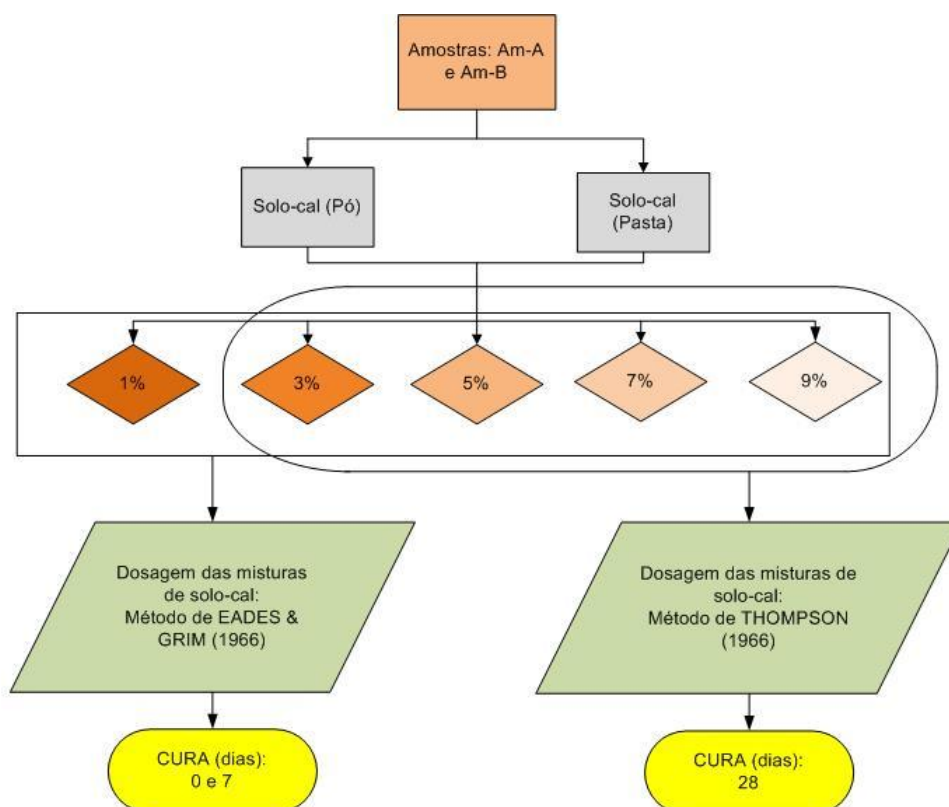


Figura 3.11: Misturas de solo-cal (dosagem).

Para a realização dos ensaios de resistência (RCS, MR, RTCD) nas misturas estabilizadas, selecionaram-se os teores de 3%, 5% e 7%, conforme é apresentado na Figura 3.12, para períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias.

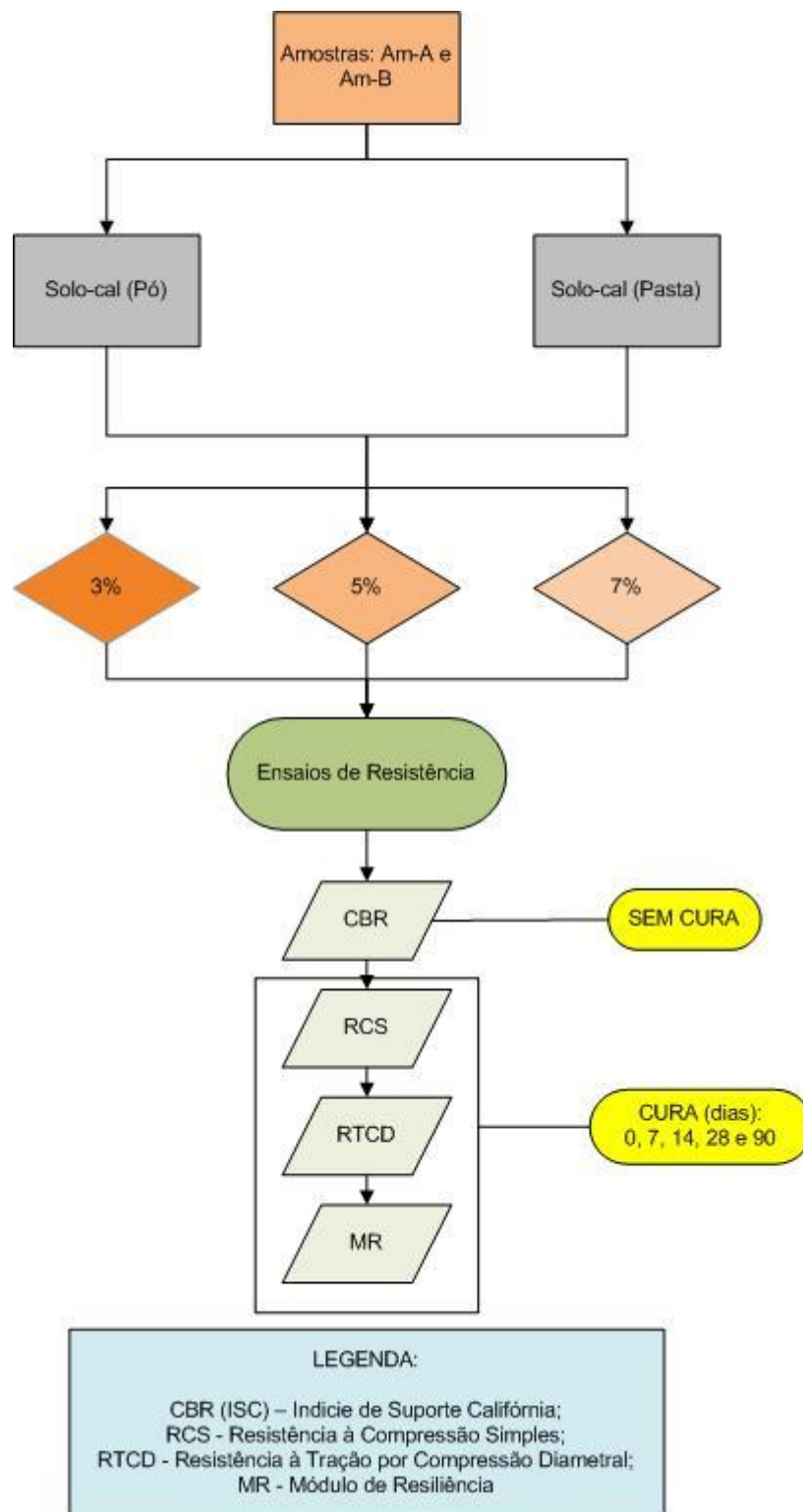


Figura 3.12: Misturas de solo-cal (ensaios de resistência).

3.4.3. Dosagem

A dosagem das amostras de solo-cal foi realizada utilizando-se dois métodos preconizados nos Estados Unidos (na década de 60), mais precisamente no estado de Illinois. Inicialmente, foi utilizado o método proposto por EADES e GRIM (1966), conhecido também como método do pH. De acordo com estes autores, o menor teor de cal que proporcionar um valor de pH de 12,4 é o suficiente para estabilizar o solo. O resumo do procedimento desse método consiste nas seguintes etapas:

- a) amostras representativas de 20 g de solo seco, passadas na peneira nº 40, são pesadas com uma precisão de 0,1 g e, posteriormente, adicionadas a um recipiente plástico de 150 ml;
- b) em seguida, são acrescentados teores crescentes da cal a cada recipiente, pesados com uma precisão de 0,01 g. O método indica o uso de no mínimo 5 teores da cal a serem misturados ao solo seco;
- c) posteriormente, acrescenta-se 100 ml de água destilada às misturas de solo-cal agitando-as a fim de garantir a homogeneização;
- d) a cada 10 minutos, agitam-se os recipientes por 30 segundos;
- e) após uma hora de ensaio são determinados os valores de pH.

Foram ensaiadas misturas de solo-cal com teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9% da cal em relação ao peso seco de solo. As amostras de solo-cal foram ensaiadas imediatamente após a mistura e após um período de 7 dias de cura, a fim de se verificar a evolução do valor do pH com o tempo. Para a determinação dos valores de pH foi utilizado um pH-metro da marca WTW e modelo PH 330i, ilustrado na Figura 3.13, calibrado com soluções tampão de pH igual a 4 e 7.



Figura 3.13: pHmetro utilizado na pesquisa.

O outro método utilizado para a dosagem das misturas de solo-cal foi o utilizado por NÚÑEZ (1991) e, posteriormente, citado por LOVATO (2004) tendo como parâmetro o critério de reatividade estabelecido por THOMPSON (1966). De acordo com THOMPSON (1966) um solo após ser estabilizado pela cal é qualificado como reativo quando apresenta ganhos de resistência à compressão simples não inferiores a 345 kN/m^2 após 28 dias de cura, precedidos por uma imersão prévia de 24 horas em água potável. Nesse método são adotados quatro teores crescentes da cal (em relação ao peso seco de solo) cujos percentuais utilizados no respectivo trabalho foram de 3%, 5%, 7% e 9%.

Nesta pesquisa, utilizou-se o método proposto por EADES e GRIM (1966) apenas como referência, devido às limitações deste para utilização em solos tropicais. De acordo com alguns relatos do TRB (1987), citados por LOVATO (2004), a porcentagem da cal obtida pelo método do pH não produz a máxima resistência à compressão simples nos solos tropicais e subtropicais. Conforme esses relatos, o método não assegura se a reação do solo com a cal produz um substancial aumento de resistência.

Assim, adotou-se para determinação do teor ótimo da cal, na estabilização de cada solo estudado no trabalho, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, obtidos após um período de cura de 28 dias e uma imersão prévia de 24 horas em água potável antes da ruptura, que apresentaram um valor superior a 345 kN/m^2 , sendo escolhido a menor percentagem da cal que proporcionou a obtenção desse resultado.

3.4.4. Caracterização

3.4.4.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica das amostras de solos, por peneiramento e por sedimentação, foi realizada conforme o método de ensaio ME 051/94 do antigo DNER (atual DNIT). Já as densidades reais das amostras naturais de solo foram determinadas através do método de ensaio ME 093/94 do antigo DNER (atual DNIT).

3.4.4.2. Limites de Atterberg

Os valores dos limites de liquidez (LL) das amostras de solos naturais e das misturas de solo-cal, em pó e em pasta, nos teores de 3%, 5% e 7% da cal em relação ao peso seco de solo, foram determinados de acordo com o método de ensaio ME 122/94 do antigo DNER (atual DNIT). Já os valores dos limites de plasticidade (LP), para as mesmas amostras ensaiadas para o ensaio de LL, foram determinados de acordo com o método de ensaio ME 82/94, também do antigo DNER, atual DNIT

3.4.4.3. Ensaios de Compactação

Para a determinação dos valores dos pesos específicos aparentes secos máximos e das umidades ótimas do solo natural e das misturas de solo-cal, em pó e em pasta, foram realizados ensaios de compactação no cilindro Proctor conforme o método de ensaio ME-162/94 do antigo DNER, atual DNIT. Neste estudo, prevaleceu a utilização da energia intermediária de compactação. Apesar disso, com o intuito de se verificar o efeito da energia normal no comportamento das misturas de solo-cal, selecionou-se uma das amostras de solo estudadas (Am-A) para tal finalidade.

3.4.5. Ensaios Químicos

Os ensaios químicos das amostras naturais dos solos foram realizados no Laboratório de Solos e Água, do departamento de ciências do solo, Centro de Ciências Agrária da Universidade Federal do Ceará (UFC), envolvendo os ensaios de Complexo Sortivo e pH.

3.4.6. Ensaios de Resistência

3.4.6.1. Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão

A determinação dos valores de CBR e de expansão para as amostras de solos naturais e das misturas de solo-cal, em pó e em pasta, foi realizada de acordo com o método de ensaio ME 049/94 do antigo DNER, atual DNIT. Cada amostra foi ensaiada em duplicata e os valores finais de CBR e expansão foram determinados pela média aritmética dos dois resultados obtidos após os ensaios. Todas as amostras foram ensaiadas no cilindro Proctor. A exemplo do critério adotado para o ensaio de compactação, selecionou-se também as misturas de solo-cal ensaiadas com a amostra de solo Am-A para se verificar o efeito da energia Proctor normal nos valores de ISC.

3.4.6.2. Ensaios de Resistência à Compressão Simples

O parâmetro de resistência à compressão simples é a característica mais empregada na avaliação das propriedades das misturas de solo-cal.

Neste trabalho à resistência à compressão simples, das amostras de solos naturais e das misturas de solo-cal, foi determinada conforme o regulamentado pela norma da ASTM D 5102/96. Ressalta-se que a utilização da norma americana para este ensaio, deu-se pelo fato de não se ter encontrado uma metodologia nacional para a obtenção do parâmetro em questão para misturas de solos estabilizados quimicamente pela cal. Na moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado um molde cilíndrico tripartido (Figura 3.14), com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, obedecendo-se a relação de 2:1.



Figura 3.14: Molde cilíndrico tripartido usado no ensaio de compressão simples.

A moldagem foi realizada manualmente, em três camadas, na energia intermediária sendo aplicados 33 golpes por camada. Depois de compactados, os corpos-de-prova foram retirados do molde cilíndrico, pesados e medidos com uma precisão de 0,01 gf e 0,01 cm, respectivamente. Foram aceitos os corpos-de-prova com $10 \pm 0,2$ cm de altura e $5,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro. Em seguida, as amostras compactadas foram enroladas por papel filme, identificadas e deixadas em cura, à temperatura ambiente, por 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Após o período de cura os corpos-de-prova foram submetidos a uma imersão em água potável por um período de 24 horas para, posteriormente, serem ensaiados.

As amostras foram moldadas em triplicata e o valor da resistência à compressão simples de cada mistura, para cada teor de cal especificado e para cada período de cura analisado, foi determinado através do valor da média aritmética dos 3 resultados obtidos, sendo admitidos os valores de tensão de ruptura de $\pm 10\%$ da média. No caso em que um dos valores se apresentasse fora dessa faixa, determinava-se novamente a média dos dois restantes.

Foram analisadas misturas de solos naturais e de solos estabilizados quimicamente pela cal, em teores pré-determinados de 3%, 5% e 7% da cal em relação ao peso seco de solo. Essas misturas foram moldadas com a utilização de cal pó e cal em pasta, como descrito anteriormente no item 3.3. Essas amostras foram ensaiadas utilizando-se um modo de deformação controlada, com velocidade de 1,25 mm/min.

3.4.6.3. *Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral*

A determinação dos valores de Resistência à Tração por Compressão Diametral - RTCD para as amostras de solos naturais e das misturas de solo-cal, em pó e em pasta, foi realizada de acordo com o método de ensaio ME 138/94 do antigo DNER, atual DNIT. Cada amostra foi ensaiada em duplicata na energia de compactação Proctor intermediária e os valores finais de RTCD foram determinados pela média aritmética dos dois resultados obtidos após os ensaios.

3.4.6.4. Ensaio de Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência (MR) de um solo é dado pela relação entre a tensão-desvio (σ_d) e a deformação resiliente (ϵ_r), conforme apresentado na equação 3.1.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3.1)$$

O comportamento resiliente das amostras analisadas no trabalho foi determinado através do ensaio triaxial de cargas repetidas, de acordo com o método preconizado na COPPE – UFRJ conforme apresentado em MEDINA e MOTTA (2005).

Os corpos-de-prova foram moldados em molde cilíndrico tripartido (o mesmo utilizado no ensaio de resistência à compressão simples), com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A moldagem das amostras foi realizada manualmente, utilizando-se a energia de compactação intermediária em 10 camadas, sendo aplicados 10 golpes por camada. Foram moldadas amostras de solo natural e de solo estabilizado, utilizando-se cal em pasta e cal em pó e, para cada uma destas amostras, foi moldado apenas um corpo-de-prova.

As misturas de solo-cal foram ensaiadas nos teores de 3%, 5% e 7% de cal em relação ao peso seco de solo para os períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Essas amostras permaneceram envoltas por um papel filme, assim como nos ensaios de resistência à compressão simples e compressão diametral, ao longo de todo período de cura e foram ensaiadas sem imersão prévia em água potável.

Os resultados obtidos no ensaio triaxial de cargas repetidas foram gerados a partir do uso de um sistema automatizado conhecido por SiCAEP (Sistema de Controle e Aquisição para Ensaio de Pavimentos) que foi concebido pelos engenheiros Ricardo Gil Domingues e Álvaro Augusto Dellê Vianna (ver MEDINA e MOTA, 2005). Um exemplo de registro dos resultados gráficos gerados por esse sistema e a visualização da utilização do software no momento em que uma das amostras era ensaiada encontra-se exposto nas Figuras 3.15 e 3.16.

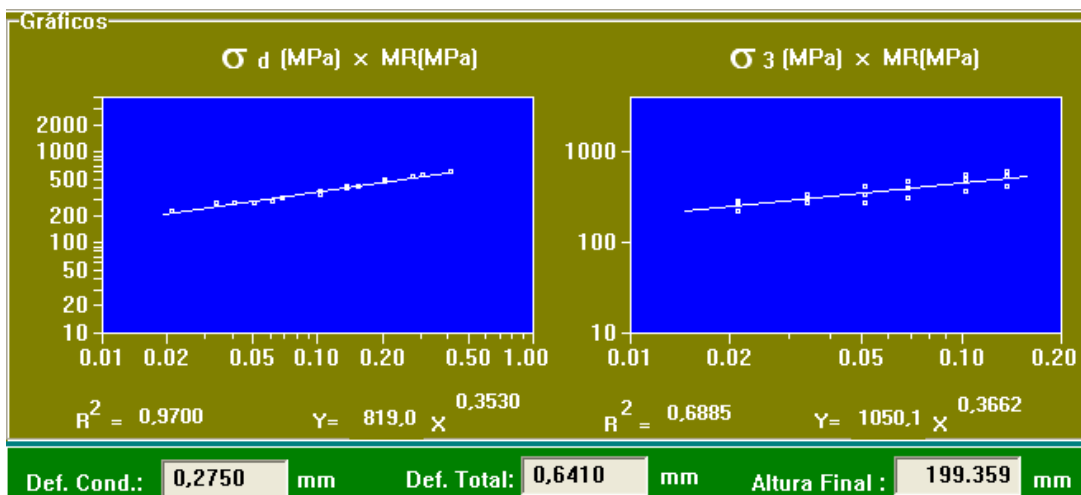


Figura 3.15: Exemplo de resultados gráficos pelo SiCAEP após o ensaio triaxial.



Figura 3.16: Tela gerada pelo SiCAEP durante a realização do ensaio triaxial.

Já a Tabela 3.5, adaptada da bibliografia MEDINA e MOTTA (2005), apresenta o procedimento adotado para a execução do ensaio. Juntamente com essa tabela são apresentados: um desenho esquemático do equipamento utilizado para a determinação do módulo de resiliência (Figura 3.17) e algumas fotos obtidas durante a realização do ensaio triaxial (Figura 3.18 a 3.23).

Tabela 3.5: Etapas do ensaio Triaxial dinâmico.

PROCEDIMENTO DETALHADO PARA EXECUÇÃO DO ENSAIO TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS	
PASSO 1	Compactação do corpo-de-prova (CP) e medição da massa específica deste após a sua retirada do molde cilíndrico.
PASSO 2	Colocação do CP sobre a pedra porosa.
PASSO 3	Colocação do cabeçote sobre o CP.
PASSO 4	Envolvimento do CP com a membrana de borracha (com o auxílio do encamisador).
PASSO 5	Colocação de ligas (elásticos) envolvendo a membrana na altura do cabeçote situado acima do CP.
PASSO 6	Colocação do CP sobre a base da célula triaxial.
PASSO 7	Colocação de ligas (elásticos) envolvendo a membrana na altura da base da célula triaxial.
PASSO 8	Fixação dos LVDTs ao cabeçote.
PASSO 9	Colocação do cilindro da célula triaxial.
PASSO 10	Colocação das hastes de fixação da tampa da célula triaxial.
PASSO 11	Assentamento da tampa da célula triaxial, prendendo esta as respectivas hastes.
PASSO 12	Colocação da conexão da haste ao pistão de carga.
PASSO 13	Encaixe dos mangotes de ar comprimido para aplicação das tensões desvio e confinante.
PASSO 14	Liberação do ar comprimido.
PASSO 15	Ligação do sistema de aquisição e reprodução dos dados.
PASSO 16	Ajuste fino dos LVDTs, com o auxílio das hastes rosqueadas, dentro do intervalo de voltagem para leitura dos deslocamentos (0,1 Volt à 0,5 Volt).
PASSO 17	Início da fase de condicionamento com o intuito de se eliminar (ou pelo menos minimizar) os efeitos da deformação plástica e da história das tensões, com a aplicação de 500 pulsos de carga em três estágios de aplicação de tensão desvio e confinante (Tabela 3.6).
PASSO 18	Após o condicionamento, os transdutores são novamente ajustados e, em seguida, dá-se início ao ensaio triaxial, com 18 ciclos de carga e 10 aplicações de carga por ciclo (Tabela 3.7).
PASSO 19	Após a aplicação do último ciclo de carga são verificados os valores e gráficos gerados pelo software e, caso todos resultados tenham sido devidamente computados sem a verificação de nenhuma anomalia, o ensaio é encerrado.
PASSO 20	O CP é retirado do equipamento e, posteriormente, seco em estufa (até a constância de peso) para obtenção da umidade do ensaio.

Tabela 3.6: Tensões de condicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de módulo de resiliência.

Ciclos	Tensão confinante (σ_3) – Mpa	Tensão desvio (σ_d) – Mpa
1	0,07	0,07
2	0,07	0,21
3	0,105	0,315

Tabela 3.7: Tensões de carregamento aplicadas no ensaio de módulo de resiliência.

Ciclos	Tensão confinante (σ_3) – Mpa	Tensão desvio (σ_d) – Mpa
1	0,021	0,021
		0,041
		0,062
2	0,034	0,034
		0,069
		0,103
3	0,051	0,051
		0,103
		0,155
4	0,069	0,069
		0,137
		0,206
5	0,103	0,103
		0,206
		0,309
6	0,137	0,137
		0,275
		0,412

- A – regulador de pressão para aplicação da tensão-desvio
 B – regulador de pressão para aplicação da tensão confinante
 C – sistema de vácuo
 D – temporizador de controle da frequência e tempo de duração do carregamento (tensão-desvio)
 E – válvula de três vias
 F – amplificador de sinal
 G – oscilógrafo ou microcomputador com monitor e impressora
 1. cilindro de pressão
 2. pistão
 3. conexão
 4. haste
 5. cabeçote (top-cap)
 6. LVDT transdutor de deslocamento
 7. amostra de solo
 8. alça de fixação dos LVDTs
 9. base
 10. suporte central
 11. célula triaxial
 12. estrutura da prensa

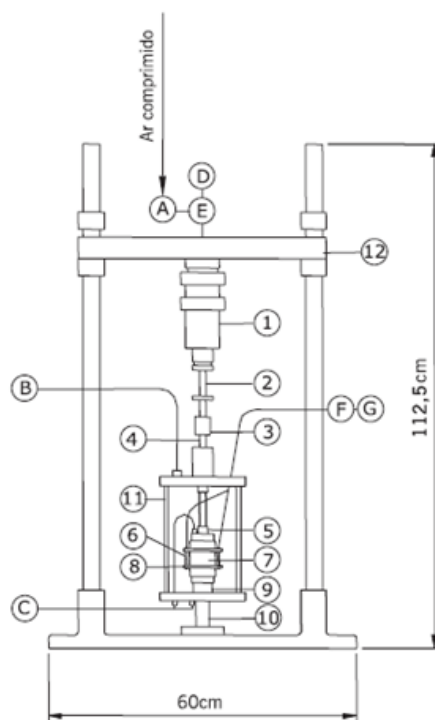
**Figura 3.17:** Figura esquemática de um equipamento utilizado no ensaio triaxial dinâmico (MEDINA e MOTTA, 2005).



Figura 3.18: Colocação do corpo-de-prova (CP) sobre a pedra porosa.



Figura 3.19: Colocação do cabeçote sobre o CP.



Figura 3.20: Fixação dos LVDTs ao cabeçote (vista superior).



Figura 3.21: Fixação dos LVDTs ao cabeçote (vista frontal).



Figura 3.22: Colocação do cilindro da célula triaxial.



Figura 3.23: Liberação do ar comprimido.

Após a realização dos ensaios e obtenção dos resultados, gerados pelo sistema SiCAEP, foi realizada uma classificação através das propriedades resilientes dos solos das misturas analisadas. Essa classificação, apresentada pelo manual de pavimentação do DNIT (2006), é dividida em duas classes de materiais: a dos solos granulares e a dos solos finos.

No caso específico desse trabalho, que analisa solos tipicamente finos, foi utilizada a classificação específica para esses solos (ver Figura 3.24). De acordo com esta classificação o solo pode enquadrar-se em três tipos distintos:

- a) tipo I: solos apresentando bom comportamento no que se refere ao módulo de resiliência como materiais de subleito, reforço do subleito e sub-base;
- b) tipo II: solos que apresentam comportamento regular quanto a resiliência como materiais de subleito e reforço de subleito;
- c) tipo III: solos de comportamento ruim quanto à resiliência. Não devem ser empregados em camadas de pavimentos e para subleito, requerendo estudos e cuidados especiais;

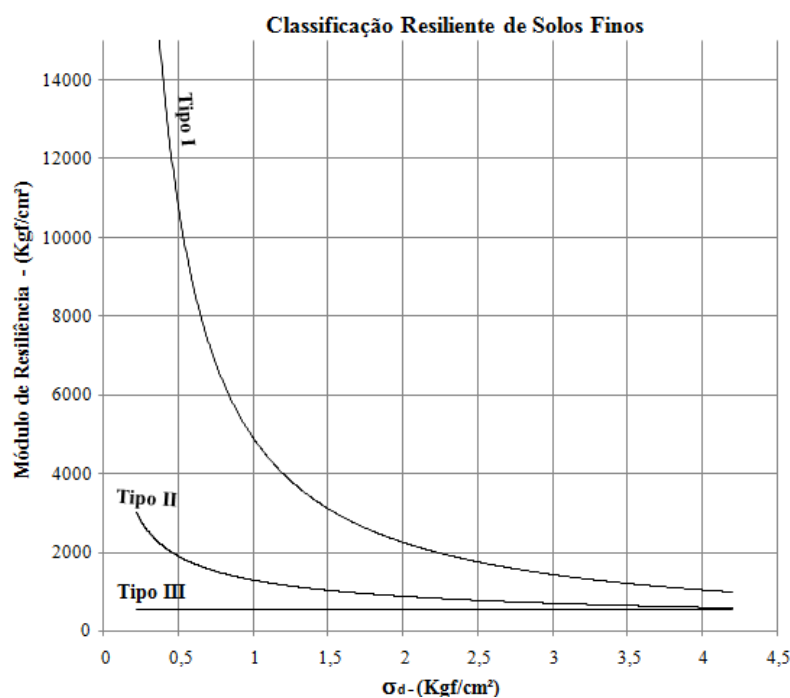


Figura 3.24: Classificação resiliente (DNIT, 2006).

Com relação aos modelos resilientes, foram analisados quatro modelos distintos: o primeiro analisando o efeito da tensão desvio (equação 3.2), o segundo analisando o efeito da tensão confinante (equação 3.3), o terceiro analisando o efeito do primeiro invariante de tensão (equação 3.4) e o quarto analisando o efeito da tensão desvio e da tensão confinante (modelo composto-ver equação 3.5).

$$\bullet \quad M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3.3)$$

$$\bullet \quad M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (3.4)$$

$$\bullet \quad M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.5)$$

Onde: MR é o Módulo de Resiliência, σ_1 e σ_3 são as tensões principais, maior e menor (respectivamente), σ_d é a tensão desvio, θ ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) é o primeiro invariante de tensão e os valores de k são constantes obtidas através da realização do ensaio triaxial dinâmico.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas características peculiares da região originária dos solos estudados, bem como os critérios adotados para seleção dos materiais utilizados nos ensaios laboratoriais. Além disso, foi apresentado o programa experimental para amostras de solos naturais e estabilizadas pela cal (em pó e em pasta). Ao longo desse programa foram mencionados os ensaios desenvolvidos durante a pesquisa e as variáveis analisadas para cada um desses ensaios, assim como a precisão adotada na obtenção dos resultados gerados a partir da execução destes. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da realização do programa experimental aplicado.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais realizados para as duas amostras de solos, coletadas na região do agropólo do Baixo Jaguaribe, e para suas misturas estabilizadas com cal, em pó e em pasta, seguindo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

Inicialmente, foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e da análise química, realizados para as amostras naturais de solos.

Em seguida, foram analisadas as amostras de solos estabilizadas por diferentes teores da cal, a fim de se obter um teor ótimo para a aplicação do aditivo durante a estabilização dos dois solos estudados. Para isso, foram empregados dois métodos de dosagem para as misturas de solo-cal: um analisando o comportamento químico das amostras, por meio da evolução dos valores de pH (método de EADES e GRIM, 1966), e o outro analisando o comportamento mecânico, por meio da evolução dos valores de resistência à compressão simples (método de THOMPSON, 1966).

Após a discussão dos resultados encontrados nos ensaios de dosagem das misturas, foram apresentados e discutidos os valores dos limites de Atterberg obtidos para as amostras estabilizadas. Posteriormente, foram discutidas as variações que os diversos teores de cal (em pó e em pasta) produziram nas propriedades mecânicas dos solos estudados, após a realização dos ensaios de compactação, ISC, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

Por fim, foi realizado o dimensionamento mecanístico para uma estrutura de pavimento típico de rodovia de baixo volume de tráfego do estado do Ceará, empregando-se a técnica solo-cal na camada de base.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A caracterização dos dois solos estudados neste trabalho teve por objetivo verificar algumas características dos materiais, tais como: textura, consistência e capacidade de troca catiônica, que possam vir a afetar o desempenho das misturas estabilizadas pela cal.

Inicialmente, foi realizada a caracterização geotécnica dos solos naturais. Essa caracterização teve por finalidade verificar se a consistência e textura das amostras analisadas indicavam ou não a necessidade de se estabilizar os solos. Algumas propriedades das amostras naturais, como: ISC e expansão, também foram investigadas nesta fase.

Em seguida, verificaram-se algumas características químicas de cada amostra de solo, procurando-se averiguar como cada uma das propriedades analisadas poderiam vir a afetar o desempenho das misturas de solo-cal.

4.2.1. Caracterização Geotécnica

4.2.1.1. Amostra Am-A

A primeira amostra de solo analisada na pesquisa, designada de Am-A, apresentou em sua composição 8,21 % de pedregulho (acima de 4,8 mm), 6,23 % de areia grossa (de 4,8 a 2,0 mm), 12,04 % de areia média (de 2,0 a 0,42 mm), 28,12 % de areia fina (de 0,42 a 0,0075 mm), 18,93% de silte (de 0,0075 a 0,005 mm) e 26,47 % de argila (abaixo de 0,005 mm), sendo que o percentual de argila coloidal (abaixo de 0,001 mm) presente nesta amostra foi da ordem de 17,85 %. A análise granulométrica do solo foi realizada com o uso do defloculante “hexametáfosfato de sódio” e o resultado obtido encontra-se representado pela curva mostrada na Figura 4.1.

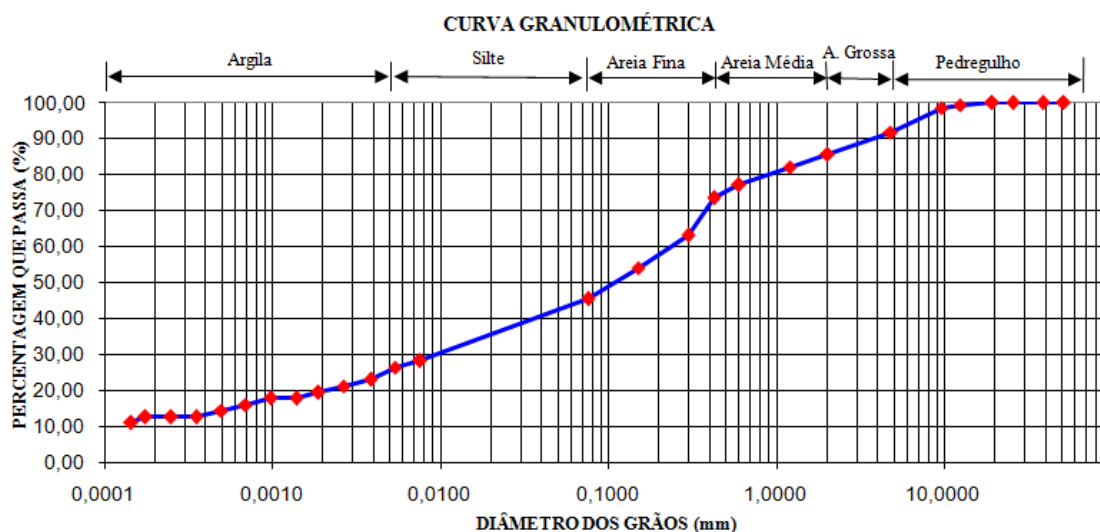


Figura 4.1: Distribuição granulométrica da amostra de solo Am-A.

A densidade real dos grãos, obtida para esse solo, foi de $2,668 \text{ g/cm}^3$ e os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg juntamente com o valor do índice de grupo e a classificação do TRB, para esse mesmo material, encontram-se expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Índice de grupo e caracterização do solo (TRB): Am-A

ÍNDICE DE GRUPO				
$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$	a =	10,40	c =	0
	b =	30,40	d =	0
CARACTERIZAÇÃO DO SOLO				
Limite de Liquidez		29,00%		
Limite de Plasticidade		18,00%		
Índice de Plasticidade		11,00%		
Índice de Grupo:		2		
% passa na # 10	85,56	Classificação TRB	A-6 (solo argiloso)	
% passa na # 40	73,51			
% passa na # 200	45,40			

Analisando-se os valores expostos na Tabela 4.1, verificou-se que a amostra de solo Am-A apresentou valores de LL e IP, respectivamente, superiores a 25% e 6%, o que, de acordo com as especificações do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT (2006), impossibilitaria o uso desse material em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

Com relação à capacidade de suporte do solo (Am-A) e à expansão do mesmo, foram encontrados, em laboratório, os valores apresentados na Tabela 4.2, ensaiados na energia Proctor intermediária.

Tabela 4.2: Valores de ISC e expansão para a amostra de solo Am-A.

AMOSTRA DE SOLO: Am-A	
CBR (%)	4,00
EXPANSÃO (%)	0,21

Assim como os valores de LL e IP encontrados, o resultado obtido para capacidade de suporte do solo (Am-A) não atendeu às especificações do DNIT (2006), para o uso em camadas de base e sub-base de rodovias. De acordo com essa autarquia federal, os valores mínimos de CBR e expansão, exigidos para os materiais utilizados nessas camadas, são os apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Especificações do DNIT (2006)

ESPECIFICAÇÕES DO DNIT		
CAMADA	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
SUB-BASE	≥ 20	$\leq 0,5$
BASE	≥ 60	$\leq 0,5$

Verificou-se que o valor de CBR (%) = 4,00, encontrado para amostra natural de solo (Am-A), ficou bem abaixo dos valores apresentados na Tabela 4.3. Já o resultado obtido para a expansão do material apresentou-se inferior a 0,5%, o que, levando-se em conta apenas esse parâmetro, permitiria o enquadramento do material para o uso nas camadas especificadas. Contudo, analisando-se todos os resultados encontrados para essa amostra de solo, percebeu-se que o mesmo não era adequado ao uso em camadas nobres de rodovias, ficando condicionado a um processo de estabilização que melhorasse suas propriedades físico-químicas a fim de possibilitar o seu enquadramento nas especificações rodoviárias em vigência.

4.2.1.2. Amostra Am-B

A segunda amostra de solo analisada na pesquisa, designada de Am-B, apresentou em sua composição 1,00 % de pedregulho, 2,00 % de areia grossa, 10,00 % de areia média, 43,00 % de areia fina, 5,00 % de silte e 39,00 % de argila, sendo que o

percentual de argila coloidal presente nesta amostra foi da ordem de 37,5 %. Assim como na análise granulométrica realizada para o solo Am-A, utilizou-se no ensaio da amostra Am-B o defloculante “hexametáfosfato de sódio” e o resultado obtido encontra-se representado pela figura 4.2.

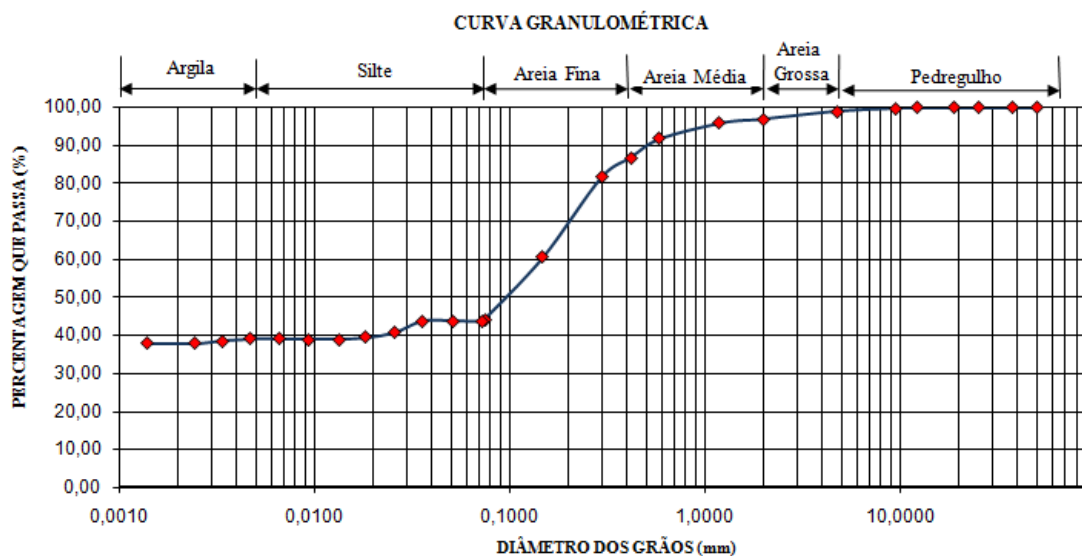


Figura 4.2: Distribuição granulométrica da amostra de solo Am-B.

A densidade real dos grãos, obtida para a amostra de solo Am-B, foi de 2,625 g/cm³ e os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg juntamente com o valor do índice de grupo e a classificação do TRB, para esse mesmo material, encontram-se expostos na Tabela 4.4. Já os valores de ISC e de expansão encontrados para esse solo, na energia de compactação intermediária, são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.4: Índice de grupo e caracterização do solo (TRB): Am-B.

ÍNDICE DE GRUPO				
$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$	a =	9,09	c =	0
	b =	29,09	d =	0
CARACTERIZAÇÃO DO SOLO				
Limite de Liquidez		22,00%		
Limite de Plasticidade		15,41%		
Índice de Plasticidade		6,59%		
Índice de Grupo:		2		
% passa na # 10	96,86	Classificação TRB	A-4 (solo siltoso)	
% passa na # 40	86,86			
% passa na # 200	44,09			

Tabela 4.5: Valores de ISC e expansão para a amostra de solo Am-B.

AMOSTRA DE SOLO: Am-B	
CBR (%)	17,62
EXPANSÃO (%)	0,03

Os valores de LL, IP, CBR e expansão, encontrados para a amostra de solo Am-B, foram melhores do que os encontrados para a amostra de solo Am-A, quando considerados os valores especificados pelo DNIT (2006). No entanto, essa amostra também não se enquadrava como um solo apto a ser usado em camadas, de bases e sub-base, de pavimentos. Dessa forma, esse solo (Am-B), assim como o outro (Am-A), deve passar por um processo de estabilização antes de ser empregado em obras rodoviárias, se utilizados os critérios convencionais.

4.2.2. Análise Química

A análise química das amostras dos solos, Am-A e Am-B, como mencionado no item 3.4.5 do capítulo 3, foi realizada no Laboratório de Solos e Água, do Departamento de Ciências do Solo, do Centro de Ciências Agrária da Universidade Federal do Ceará (UFC). Esta análise foi constituída pela avaliação da capacidade de troca catiônica, da atividade das argilas e do pH das amostras dos solos em estudo.

4.2.2.1. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Segundo JACINTHO (2005), a capacidade de troca catiônica de um solo é a capacidade que os colóides destes possuem para reter cátions, sendo diretamente dependente da quantidade de cargas negativas presente na amostra. Essa autora comenta, ainda, embasada por relatos feitos por KIEHL (1979), que a CTC de um material está relacionada à porcentagem de argila presente neste. Desta forma, para maiores porcentagens da fração argila presentes no solo, maiores os teores de minerais argílicos e, conseqüentemente, maiores os valores da CTC.

BUOL *et al.* (1997) comentam que a capacidade de troca catiônica de um solo pode propiciar algumas interpretações a respeito de algumas características do mesmo, como: grau de intemperismo, minerais argílicos constituintes e até expansividade.

De acordo com esses autores, valores de CTC elevados indicam solos pouco intemperizados, enquanto que baixos valores de CTC indicam solos mais

intemperizados. É sugerido um valor de referência de 10 cmolc/Kg para distinguir valores altos de CTC de valores baixos.

Esses autores mencionam que solos minerais com CTC maiores que 20 cmolc/Kg podem apresentar significativo teor de montmorilonita, indicando, dessa forma, solos expansivos.

Os resultados de CTC obtidos para as amostras naturais dos solos estudados encontram-se expostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Análise química das amostras de solo Am-A e Am-B.

Solo	COMPLEXO SORTIVO						
	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	S (meq/100g)	H ⁺ + Al ³⁺ (meq/100g)	CTC (meq/100g)
Am-A	4,40	1,40	0,20	0,22	6,22	0,49	6,71
Am-B	1,40	1,10	0,09	0,31	2,90	2,80	5,70

De acordo com THOMÉ (2004), os íons Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ são denominados de bases trocáveis e os íons H⁺ + Al³⁺ são conhecidos por acidez extraível. A soma das quantidades dos íons Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, em meq/100g, presentes nas amostras dos solos ensaiados, foi denominada por S. Os resultados dos valores de S encontrados para os solos Am-A e Am-B foram, respectivamente, 6,22 meq/100g e 2,90 meq/100g, como apresentado na Tabela 4.6.

A soma dos valores de S (bases trocáveis) e da acidez extraível, segundo THOMÉ (2004), fornece o valor da CTC de um solo.

Os solos, Am-A e Am-B, apresentaram valores de CTC iguais a 6,71 meq/100g e 5,70 meq/100g, respectivamente. Estes valores, de acordo com LOVATO (2004) *apud* MITCHELL (1976), são característicos das caulinitas, uma vez que estas apresentam uma capacidade de troca catiônica variando de 3 a 15 (meq/100g).

NÚÑEZ (1991) mencionou alguns relatos de EADES e GRIM (1960) a respeito das reações entre os minerais argílicos dos solos e o hidróxido de cálcio contido na cal.

De acordo com esses relatos, a caulinita reage facilmente com a cal enquanto a ilita e a montmorilonita exigem teores mais elevados deste estabilizante para poderem proporcionar o início das reações nas misturas.

Através da realização de um difratograma de raios-X em misturas caulinita-cal, EADES e GRIM (1960) mostraram a formação de silicato hidratado de cálcio em torno de um núcleo de argilomineral e percebeu que o ataque do estabilizante à caulinita teve início pelas arestas, proporcionando ganhos de resistência imediatos. Os autores verificaram, ainda, que os ganhos de resistência, para os argilominerais ilita e montmorilonita, ocorreram apenas após a saturação das camadas com íons cálcio e a destruição do argilomineral.

Analisando-se as citações de EADES e GRIM (1960), constatou-se que a presença de caulinita, nas partículas finas de um solo, é um fator positivo e desejável para a obtenção de resultados de resistência satisfatórios em misturas de solo-cal.

Baseado nas informações mencionadas, anteriormente, neste item, verificou-se que os dois solos analisados na pesquisa não apresentaram teores significantes de montmorilonita, além de serem considerados intemperizados e pouco expansíveis. Observou-se, também, que as duas amostras de solos apresentaram valores de CTC condizentes com os valores de solos constituídos por caulinitas.

4.2.2.2. Atividade das Argilas (Tr)

Para a determinação da atividade das argilas (Tr) dos solos analisados, utilizou-se a equação 4.1, citada por COUTO (2008), onde o valor de Tr foi definido em função da CTC e do percentual das argilas presentes nos solos. De acordo com COUTO (2008), solos com valores de Tr iguais ou maiores a 27 cmolc/Kg (ou meq/100g) apresentam alta atividade de argilas, enquanto que, solos com valores de Tr inferiores ao mencionado apresentam baixa atividade.

$$Tr = 100 \times \left(\frac{CTC}{\% ARGILA} \right) \quad (4.1)$$

A amostra de solo Am-A apresentou um valor de Tr de 25,35 cmolc/Kg, enquanto que a amostra de solo Am-B apresentou um valor de Tr igual a 14,62

cmolc/Kg. Com base nesses valores há a indicação de que as argilas dos dois solos analisados possuem atividade de média a baixa. Constatou-se, porém, que o valor de CTC encontrado para a amostra de solo Am-A apresentou-se bem próximo do limite de Tr, citado por COUTO (2008), acima do qual a argila desse material seria caracterizada como de alta atividade.

4.2.2.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)

De acordo com JACINTHO (2005), valores baixos de pH indicam a presença de ácidos livres, enquanto que valores maiores indicam a presença de solos salinos ou calcários. Segundo essa autora, um solo pode ser classificado, em função de seu pH, como:

- a) ácido: $\text{pH} \leq 5,5$;
- b) moderadamente ácido: $5,5 < \text{pH} < 6,4$;
- c) praticamente neutro: $6,5 < \text{pH} < 6,9$
- d) neutro: $\text{pH} = 7,0$;
- e) alcalino: $\text{pH} > 7$.

Com base nesses valores e nos resultados de pH encontrados para as amostras naturais de solos, apresentados na Tabela 4.7, verificou-se que a amostra Am-A pode ser classificada como um solo ácido e a amostra Am-B como um solo praticamente neutro.

Tabela 4.7: Valores de pH.

AMOSTRA DE SOLO	pH		ΔpH
	Água	KCl	
Am-A	6,8	5,5	-1,3
Am-B	4,5	3,7	-0,8

A Tabela 4.7 apresenta também os valores de ΔpH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{(\text{KCl})} - \text{pH}_{(\text{água})}$) encontrados para os dois solos analisados. JACINTHO (2005) menciona alguns relatos de KIEHL (1979), que afirmam que um valor de ΔpH negativo indica a predominância

de argilas silicatadas no solo, enquanto que um ΔpH positivo está relacionado com a predominância de óxidos de ferro e de alumínio.

Um valor de ΔpH negativo indica uma quantidade elevada de alumínio trocável no solo, enquanto que um ΔpH positivo indica uma quantidade baixa (JACINTHO, 2005). Para as duas amostras de solos ensaiadas, verificou-se resultados de ΔpH negativos indicando, dessa forma, solos com argilas silicatadas e com alumínio trocáveis.

Os componentes de sílica e alumina livres, como mencionado anteriormente no item 2.4.5 desse trabalho, e o citado por CARVALHO (1988), agem ativamente no processo de estabilização das misturas de solo-cal. Portanto, a presença de tais componentes nos solos estudados indica a possibilidade de melhoria nas propriedades destes após a estabilização com a cal.

4.3. DOSAGEM DAS MISTURAS DE SOLO-CAL

4.3.1. Método de Eades e Grim (1966)

A dosagem das misturas de solo-cal, analisadas neste trabalho, foi realizada, inicialmente, utilizando-se o método proposto por EADES e GRIM (1966) que é baseado no valor do pH do conjunto solo, cal e água.

LITTLE (1999) comenta que um valor elevado de pH favorece, em um primeiro momento, ao desenvolvimento das reações de troca de cátions e floculação, responsáveis pela melhoria da trabalhabilidade das misturas de solo-cal. O autor comenta, também, que a permanência de um valor elevado de pH favorece a ocorrência das reações pozolânicas, responsáveis pelo ganho de resistência dessas misturas ao longo do tempo.

De acordo com EADES e GRIM (1966), e como descrito anteriormente no subitem 3.4.3 do capítulo 3, a mais baixa porcentagem da cal que conferir a mistura solo-cal um $\text{pH} = 12,4$, após uma hora da realização da mistura, é a requerida para estabilizar o solo. Os mesmos autores comentam que se o valor de pH encontrado para as amostras estabilizadas não ultrapassar 12,3, a mais baixa porcentagem da cal que

proporcionar a mistura esse valor será a necessária para estabilizar o solo, caso seja adicionado mais 2% de aditivo (à amostra) e esta leitura permaneça inalterada.

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de pH para as amostras de solo modificadas ou estabilizadas pela cal nos teores de 1%, 3%, 5%, 7% e 9%.

Os valores de pH foram medidos após uma hora e após sete dias da preparação das misturas. A realização destes ensaios para um período de cura mais longo (7 dias), se deu ao fato de nenhuma das amostras de solo-cal analisadas ter apresentado resultados de pH superior ou igual a 12,3, quando ensaiadas após 1 hora da realização das misturas.

Decidiu-se, dessa forma, verificar a influência da cura nas amostras, observando se esta apresentava-se de forma benéfica ou não para a ocorrência das reações entre a cal e o solo. Os resultados de pH obtidos para as misturas estabilizadas encontram-se expostos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Valores de pH (método de EADES e GRIM, 1966).

TEOR DE CAL (%)	pH (Am-A)		pH (Am-B)	
	0 DIA DE CURA	7 DIAS DE CURA	0 DIA DE CURA	7 DIAS DE CURA
1%	10,70	11,17	10,36	10,58
3%	11,90	12,12	11,55	11,62
5%	12,00	12,14	11,80	11,89
7%	12,00	12,32	11,82	11,89
9%	11,93	12,47	11,86	11,96

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a evolução dos valores de pH, para as misturas de solo-cal, nos cinco teores de estabilizante testados e para os dois períodos de cura analisados.

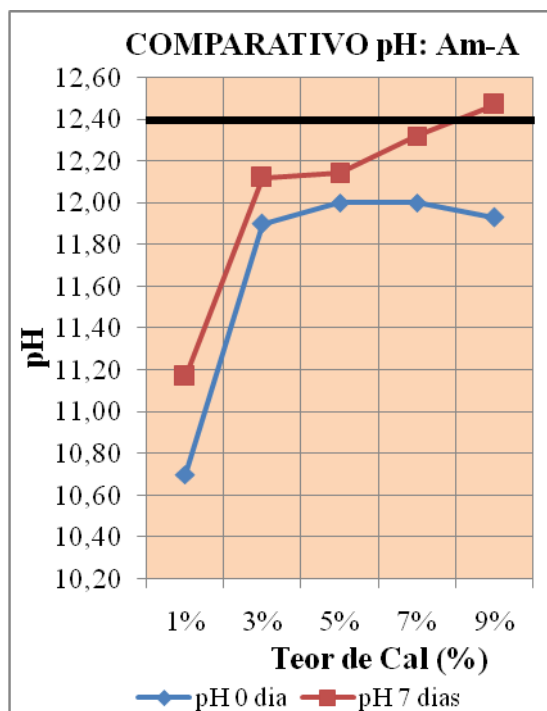


Figura 4.3: Variação do pH com o teor de cal e tempo de cura (Am-A).

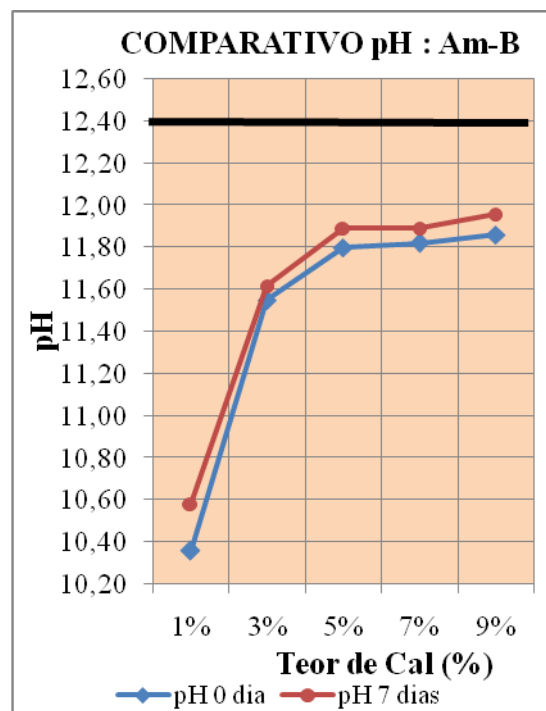


Figura 4.4: Variação do pH com o teor de cal e tempo de cura (Am-B).

Nesta pesquisa, verificou-se que todas as misturas de solo-cal analisadas apresentaram valores elevados de pH. Os resultados encontrados para os solos naturais, inicialmente em 6,8 (Am-A) e 4,5 (Am-B), passaram para 10,70 (Am-A) e 10,36 (Am-B) com apenas a adição de 1% de cal, após a realização das leituras iniciais ocorridas uma hora depois da preparação das misturas. As amostras de solos naturais saíram de uma condição de pH ácido (Am-B) e praticamente neutro (Am-A) para uma alcalina ($\text{pH} > 7$).

Observou-se, que após um período de cura de 7 dias as leituras de pH das misturas de solo-cal permaneceram elevadas e sofreram um pequeno aumento em seus valores, chegando até mesmo a atingir um valor de pH superior a 12,4 (Figura 4.3) para a mistura de solo Am-A com 9% de cal.

É importante ressaltar que à medida que o teor da cal foi aumentado nas misturas, para ambos os períodos de cura, obteve-se, de um modo geral, valores maiores de pH para amostras.

Contudo, analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.3 e 4.4, verificou-se que as leituras de pH, obtidas após uma hora da mistura da cal ao solos, não chegaram a atingir nem mesmo o valor de 12,3. Dessa forma, utilizando-se como parâmetro apenas o método de dosagem de EADES e GRIM (1966), não se pôde concluir qual o teor ótimo de cal necessário para se estabilizar os solos estudados.

Porém, como mencionado anteriormente no subitem 3.4.3, esse método de dosagem apresenta limitações quando utilizado na análise de estabilização de solos tropicais. Além disso, é importante mencionar que o valor de pH estabelecido por EADES e GRIM (1966) como uma referência para a determinação da porcentagem ideal de cal na estabilização de solos, foi determinado em função do índice de plasticidade. Buscava-se que as misturas solo-cal apresentassem plasticidade nula, ou seja, fossem caracterizadas como não-plásticas (NP). Porém, os autores também verificaram que para este mesmo valor de pH (12,4) nem sempre as misturas de solo-cal apresentavam melhores resultados nos ensaios referentes à sua capacidade de suporte.

NÚÑEZ (1991), após analisar o processo de estabilização físico-químico de um solo residual de arenito Botucatu, obteve resultados de pH superiores a 12,4 com a adição de apenas 2% de cal. Contudo, o autor verificou, durante a tentativa de realização dos ensaios de RCS, que corpos de prova de solo com 2%, 3%, 5%, 7% e 9% da cal, após 7 dias de cura, se desintegraram imediatamente ao serem imersos em água. NÚÑEZ (1991) verificou, então, a impropriedade do método de pH, proposto por EADES e GRIM (1966), na dosagem da sua amostra de solo.

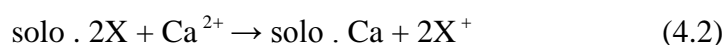
THOMÉ (1994), em sua dissertação, também observou a impropriedade do referido método para os materiais estudados, ao determinar o teor ótimo de um solo (caracterizado como Gley Húmico) tratado com a cal. O valor indicado pelo método, na ocasião, forneceu como teor ótimo de estabilizante uma porcentagem de 9% e essa amostra apresentou melhorias apenas nos índices de consistência do material, não cimentando as partículas como esperado.

Dessa forma, verificando-se estas referências bibliográficas, pressupõe-se que nem sempre se deve analisar uma mistura de solo-cal como reativa apenas quando esta apresentar um valor de pH igual 12,4, principalmente quando o solo analisado for originário de regiões com climas tropicais e/ou subtropicais. Contudo, esse valor é uma

boa referência e caso um solo tratado pela cal atinja este patamar de pH tem-se um indício, em muitas ocasiões, que aquela mistura irá reagir de maneira satisfatória.

A fim de explicar melhor a importância do valor de pH em uma mistura de solo-cal durante o processo de estabilização, CASTRO (1981) *apud* THOMÉ (1994) considerou cinco faixas distintas para esse parâmetro:

- a) $\text{pH} < 4,0$ – ocorre nessa faixa, essencialmente, a troca iônica da maior parte do íon H^+ e, também, de alguns cátions;

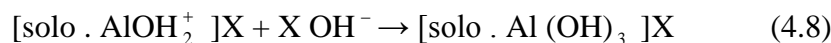
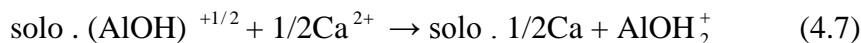
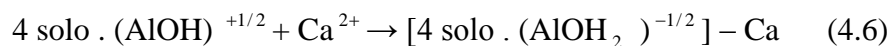
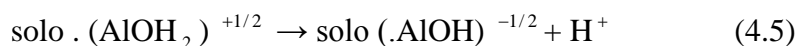


Onde: $\text{X} = \text{Na}, \text{K}, \text{H}, \text{NH}_4$ e $\text{Y} = \text{Mg}, \text{Ba}$.

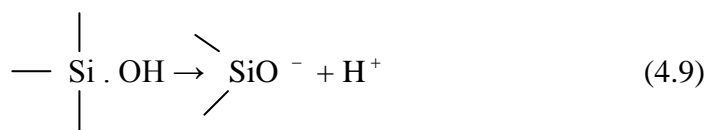
- b) $4,0 < \text{pH} < 5,6$ – nessa faixa, o Al^{3+} trocável é neutralizado e pequena parte do H^+ , dependente do pH, é deslocado;

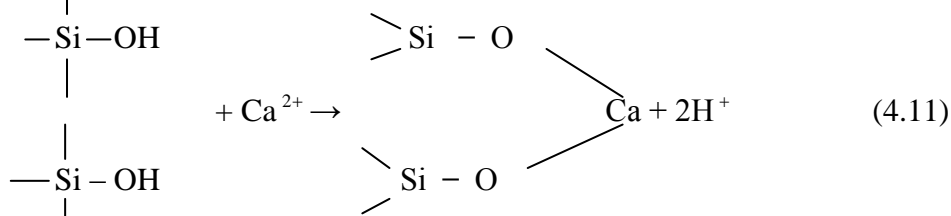
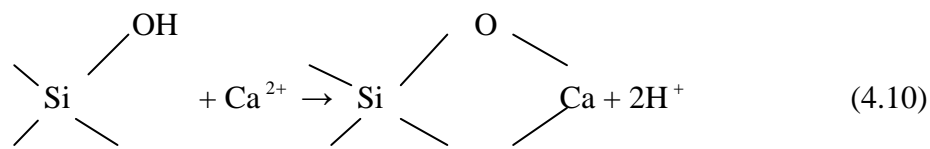


- c) $5,6 < \text{pH} < 7,6$ – nessa faixa ocorre o início da reação de polímeros terminais de hidróxi-alumina ($-\text{AlOH}_2$);

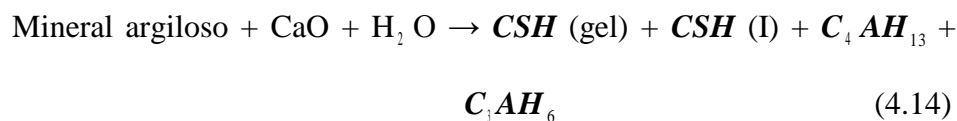
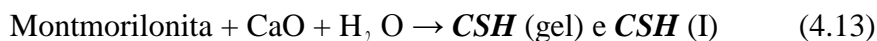
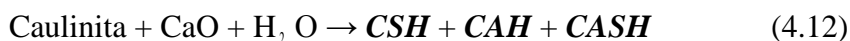


- d) $7,6 < \text{pH} < 10,0$ – nessa faixa os grupamentos silanol começam a reagir;





e) $\text{pH} > 10$ – esta faixa comporta o início das reações conhecidas por pozolânicas, mencionadas anteriormente no subitem 2.3.4 do capítulo 2;



Sendo: $C = \text{CaO}$; $S = \text{SiO}_2$; $A = \text{Al}_2\text{O}_3$; $H = \text{H}_2\text{O}$.

CSH: Silicato Hidratado de Cálcio;

CAH: Aluminato Hidratado de Cálcio;

CSAH: Sílico-Aluminato Hidratado de Cálcio.

Verificando-se as faixas de pH descritas e os valores apresentados na Tabela 4.8, constatou-se que todas as misturas de solo-cal, estudadas neste trabalho, apresentaram-se na faixa de $\text{pH} > 10$, onde dá-se início a ocorrência das reações pozolânicas. Esse fato é interessante e mostra que levando-se em conta apenas os resultados de pH para estas amostras, e as faixas deste parâmetro mencionadas por THOMÉ (1994) *apud* CASTRO (1981), pode-se concluir que ambos os solos apresentaram condições favoráveis para o desenvolvimento das reações responsáveis pela melhoria das características mecânicas das misturas, após a adição da cal.

4.3.2. Método de Thompson (1966)

O outro método de dosagem utilizado nesta pesquisa para determinação do teor ótimo da cal foi o proposto por THOMPSON (1966) e adotado por NUNEZ (1991) e LOVATO (2004). Este método, diferentemente do método do pH de EADES e GRIM (1966), considera como um solo reativo à cal aquele que apresenta um incremento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kN/m² (0,345 MPa) após 28 dias de cura (a 22,8°C) e uma imersão prévia de 24 horas em água antes da ruptura.

Foram ensaiadas amostras de solo natural (Am-A e Am-B) e amostras de solo tratadas pela cal nos teores de 3%, 5%, 7% e 9%, empregando-se processos de misturas diferentes (cal em pó e cal em pasta). Os resultados obtidos para as amostras de solo-cal encontram-se expostos na Tabela 4.9 e nas Figuras 4.5 e 4.6.

Tabela 4.9: Método de THOMPSON (1966) – RCS aos 28 dias (MPa e kNm²).

AMOSTRA	PÓ				PASTA			
	3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%
Am-A								
RCS (kN/m ²)	830,08	1240,12	1170,12	850,08	870,09	470,05	890,09	1020,10
RCS (MPa)	0,83	1,24	1,17	0,85	0,87	0,47	0,89	1,02
Am-B								
RCS (kN/m ²)	210,02	296,03	260,03	230,02	200,02	380,04	270,03	250,02
RCS (MPa)	0,21	0,29	0,26	0,23	0,20	0,38	0,27	0,25

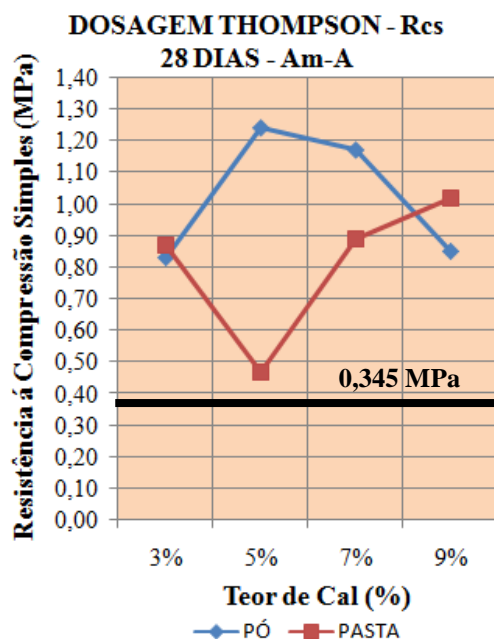


Figura 4.5: Dosagem Thompson (Solo Am-A).

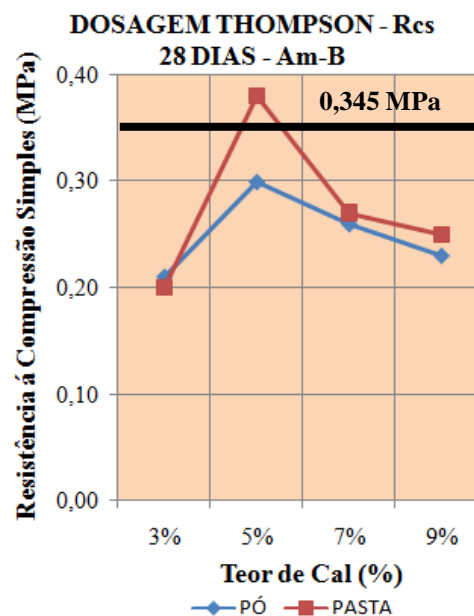


Figura 4.6: Dosagem Thompson (Solo Am-B).

A amostra de solo natural Am-A apresentou um valor de resistência à compressão simples (RCS) de 226,58 kN/m² sem imersão prévia e não resistiu à imersão em água, de 24 horas, antes da realização do ensaio. Essa mesma amostra, após ser tratada pela cal, atendeu o critério de THOMPSON (1966) com a adição de apenas 3% do estabilizante para ambas as técnicas estudadas (cal em pó e cal em pasta), apresentando um ganho de resistência superior a 345 kN/m² (ver Tabela 4.3) aos 28 dias de cura. Dessa forma, de acordo com este método o teor ótimo de cal para estabilização da amostra de solo Am-A é de 3%.

Já a amostra de solo natural Am-B apresentou um valor RCS de 164,26 kN/m² sem imersão prévia e também não resistiu à imersão em água, de 24 horas, antes da realização do ensaio. Para essa amostra de solo, o teor ótimo de cal obtido através do método de dosagem de THOMPSON (1966) foi de 5%, quando utilizada a forma de aplicação da cal em pasta. Já para as amostras ensaiadas com a cal em pó, não foi encontrado nenhum valor que apresentasse um acréscimo de RCS superior a 345 kN/m² (após 28 dias de cura) quando comparado com o obtido para o solo natural (Am-B).

No entanto, mesmo se verificando que o critério de dosagem proposto por THOMPSON (1966) não foi atendido para as misturas de solo Am-B com cal (em pó), percebeu-se que essa técnica melhorou profundamente as propriedades mecânicas deste material. O estabilizante proporcionou um aumento de 296,03 kN/m² ao referido solo (após o período de cura e de imersão mencionados anteriormente), considerando o fato da amostra natural deste não ter apresentado nenhuma resistência depois de ter sido imersa em água (por 24 horas), sendo completamente desintegrada.

Com relação ao efeito da forma de aplicação da cal nos resultados de RCS obtidos verificou-se, de um modo geral, uma melhor aplicabilidade da técnica cal em pó na estabilização da amostra de solo Am-A e uma melhor aplicabilidade da técnica cal em pasta na estabilização da amostra de solo Am-B. Constatou-se, também, que as maiores discrepâncias ocorridas nos valores de resistência, em função da forma de aplicação do estabilizante, foram verificadas para as misturas de solo com 5% de cal. Desconhece-se a razão da discrepância nos valores de RCS dessas misturas, não se podendo estabelecer parâmetros mais eficazes do comportamento dessas amostras devido a pequena quantidade de corpos de prova ensaiados.

4.4. LIMITES DE ATTERBERG PARA AS MISTURAS DE SOLO-CAL

Os resultados dos limites de Atterberg encontrados para as amostras de solo, Am-A e Am-B, em seu estado natural e após a adição da cal nos teores de 3%, 5% e 7%, em relação ao peso seco de solo, encontram-se expostos nas Tabelas 4.10 e 4.11. Foram analisados nesses ensaios os dois métodos de aplicação da cal (em pó e em pasta) estudados na pesquisa.

Tabela 4.10: Limites de Atterberg para as misturas de solo natural e solo-cal (Am-A).

LIMITES DE CONSISTÊNCIA	SOLO NATURAL (Am-A)	SOLO-CAL (PÓ)			SOLO-CAL (PASTA)		
		3%	5%	7%	3%	5%	7%
LL (%)	29,00	NL	NL	NL	NL	NL	NL
LP (%)	18,00	NP	NP	NP	NP	NP	NP
IP (%)	11,00	NP	NP	NP	NP	NP	NP

Tabela 4.11: Limites de Atterberg para as misturas de solo natural e solo-cal (Am-B).

LIMITES DE CONSISTÊNCIA	SOLO NATURAL (Am-B)	SOLO-CAL (PÓ)			SOLO-CAL (PASTA)		
		3%	5%	7%	3%	5%	7%
LL (%)	22,00	26,00	26,00	27,00	25,00	25,00	24,00
LP (%)	15,41	21,64	20,96	21,32	21,16	19,93	21,08
IP (%)	6,59	4,36	5,04	5,68	3,84	5,07	2,94

4.4.1. Amostra Am-A

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4.10, referentes ao solo Am-A e suas misturas com a cal, verifica-se que a amostra natural de solo apresentou os seguintes valores para os limites de consistência: LL = 29%, LP = 18% e IP = 11%, extrapolando os limites de LL = 25% e IP = 6% estabelecidos pelo DNIT (2006). Já as misturas de solo-cal apresentaram, em sua totalidade, uma condição de não plástica e de não líquida em todos os teores de cal aplicados.

Com relação à forma de aplicação da cal, para essa amostra de solo, constatou-se que não houve diferença nos resultados dos limites de consistência para as misturas estabilizadas.

4.4.2. Amostra Am-B

Os resultados apresentados na Tabela 4.11, referentes ao solo Am-B e suas misturas com a cal, indicam que os IPs das misturas de solo-cal, para ambas as formas de aplicação do estabilizante, forneceram valores um pouco inferiores ao encontrado

para a amostra de solo natural. Verificou-se que todos os valores de IP obtidos para essas misturas apresentaram-se inferiores a 6%, ou seja, todos atenderam ao limite máximo de IP, estabelecido pelas especificações do DNIT (2006), para serem qualificados como materiais aptos ao uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Contudo, apenas uma das misturas (cal em pasta, no teor de 7%) apresentou um valor de $LL < 25\%$. Entretanto, esses valores são levemente superiores aos estabelecidos nas normas e sabe-se, também, que pode haver problemas relacionados à repetibilidade e reprodutibilidade desses ensaios.

Com relação à forma de aplicação da cal nas misturas ensaiadas com o solo Am-B, constatou-se que os resultados dos limites de consistência das amostras tratadas com cal em pó apresentaram valores bem parecidos com os encontrados para as misturas tratadas com cal em pasta.

4.4.3. Efeitos da Cal nos Limites de Consistência dos Solos Estudados

NÚÑEZ (1991), ao analisar os limites de consistência para um solo arenoso pouco plástico, observou um ligeiro aumento no valor de LL desse material. O autor creditou esse fato à baixa atividade físico-química do solo e a baixa quantidade de argila coloidal. Valem destacar ainda alguns relatos de THOMÉ (1994), que mencionam que solos com baixa plasticidade e pouco expansivos, apresentam um aumento nos valores de LL e IP quando misturados com a cal. Percebeu-se que as características do material citado pelo referido autor podem ser encontradas na amostra de solo Am-B.

Acredita-se que o aumento nos valores dos LL encontrados para as misturas do solo Am-B com cal deve-se, dentre outros fatores, à baixa atividade das argilas constituintes desse material e à composição dos cátions trocáveis presentes no mesmo. Além disso, ressalta-se que este solo é pouco expansivo.

Com relação à forma de aplicação da cal, verificou-se que ambas as técnicas proporcionaram resultados de LL, LP e IP bastante similares, para quase todas as misturas analisadas.

Notou-se, porém, que a adição da cal à amostra de solo Am-A reduziu por completo a plasticidade desse material. Enquanto isso, percebeu-se que a adição desse

estabilizante a amostra de solo Am-B aumentou os valores de LL e LP do mesmo e pouco reduziu os valores de IP.

Por fim, pôde-se concluir, de um modo geral, que a adição da cal aos solos estudados reduziu, ou anulou, os IPs das misturas estabilizadas, melhorando a trabalhabilidade destas quando comparadas as amostras dos solos naturais.

4.5. CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO

As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam o resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compactação, na energia intermediária, para as amostras de solo Am-A e Am-B, em seu estado natural e tratadas pela cal nos teores de 3%, 5% e 7% . Enquanto que as Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam as curvas de compactação para essas amostras.

Tabela 4.12: Resultados da compactação na energia intermediária (amostra Am-A).

RESULTADOS	AMOSTRA Am-A						
	Solo Natural	Pó (3%)	Pó (5%)	Pó (7%)	Pasta (3%)	Pasta (5%)	Pasta (7%)
Umidade Ótima (%)	14,00	15,52	15,60	16,40	15,40	15,80	16,80
Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	1,93	1,92	1,86	1,85	1,85	1,84	1,81

Tabela 4.13: Resultados da compactação na energia intermediária (amostra Am-B).

RESULTADOS	AMOSTRA Am-B						
	Solo Natural	Pó (3%)	Pó (5%)	Pó (7%)	Pasta (3%)	Pasta (5%)	Pasta (7%)
Umidade Ótima (%)	10,50	13,40	13,60	14,00	13,30	13,60	13,80
Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	1,98	1,87	1,83	1,82	1,94	1,89	1,87

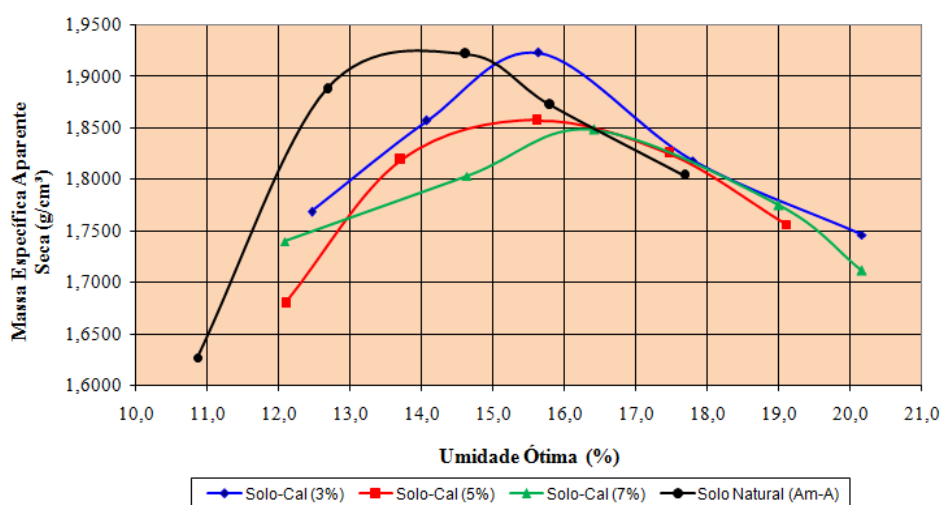


Figura 4.7: Curvas de compactação (solo Am-A e misturas de solo mais cal em pó).

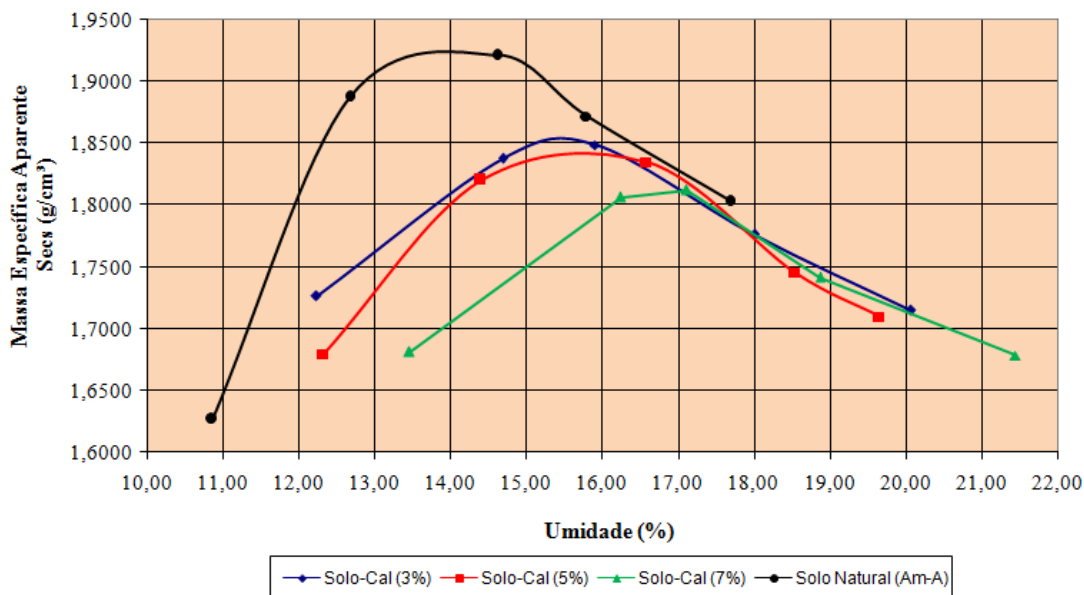


Figura 4.8: Curvas de compactação (solo Am-A e misturas de solo mais cal em pasta).

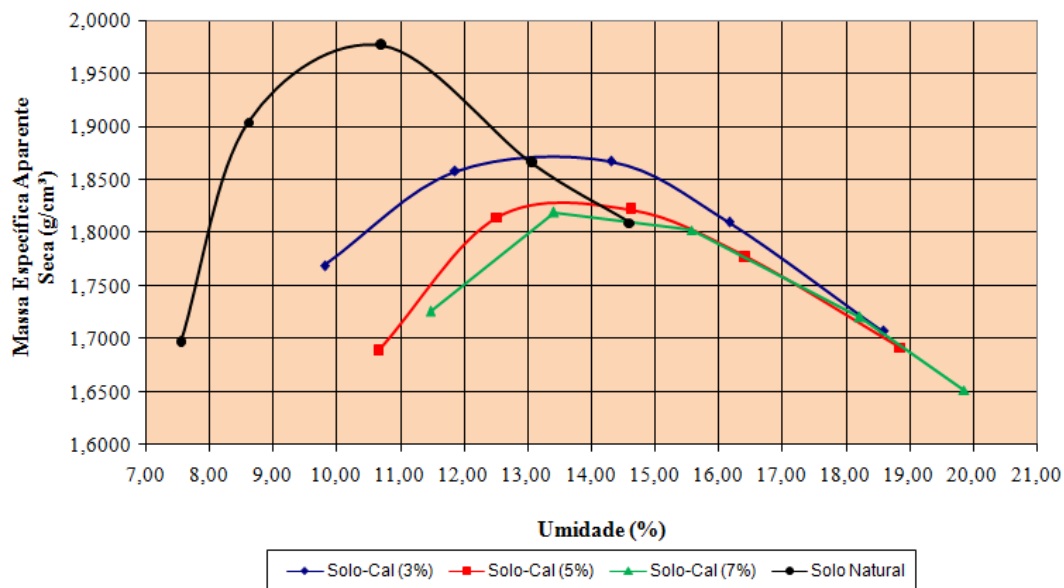


Figura 4.9: Curvas de compactação (solo Am-B e misturas de solo mais cal em pó).

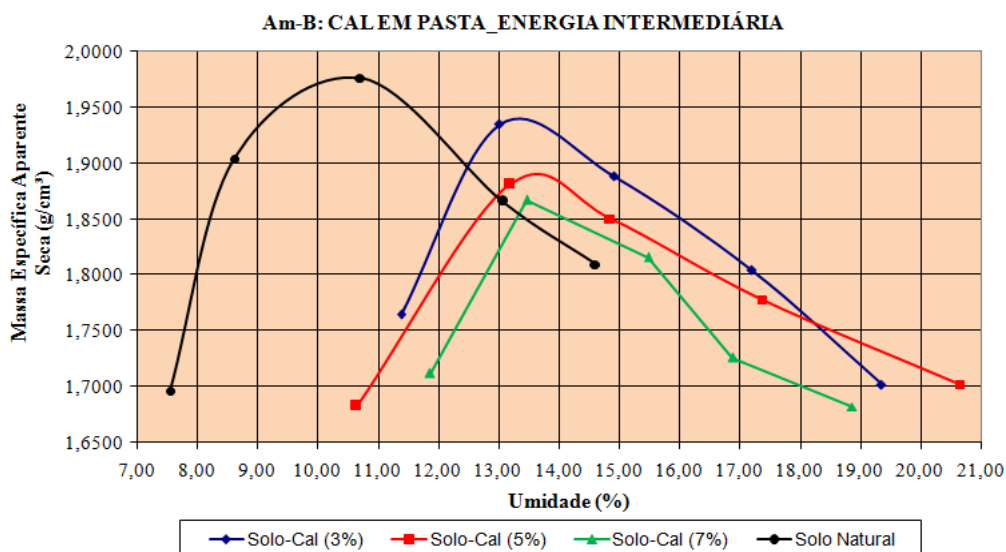


Figura 4.10: Curvas de compactação (solo Am-B e misturas de solo mais cal em pasta).

Analisando-se os resultados obtidos para as amostras de solo natural e de solo-cal, para ambos os solos ensaiados (Am-A e Am-B) e técnicas investigadas (pó e pasta), percebeu-se, de forma geral, que os valores encontrados da massa específica seca máxima para as amostras de solo tratado com cal foram inferiores ao da massa específica seca máxima obtida com o solo natural (sem estabilizante). Enquanto que os valores da umidade ótima das amostras de solo-cal cresceram em relação à umidade ótima da amostra de solo natural, à medida que o teor da cal adicionado na mistura foi aumentado.

LOVATO (2004) obteve resultados similares aos apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13, quando analisou os efeitos da cal na estabilização de um solo laterítico do Rio Grande do Sul. Na ocasião, o autor explicou, após consultar a bibliografia de SIVAPULLAIAH *et. al.* (1998), que a massa específica seca máxima das misturas de solo cal eram inferiores ao da massa específica do solo natural e que as umidades ótimas das misturas de solo-cal eram mais elevadas que a umidade ótima da amostra de solo natural, pelo fato das partículas de solo se tornarem mais floculadas quando da adição desse estabilizante.

LOVATO (2004) comentou, ainda, que à medida que uma mistura tornava-se mais floclada, aumentava-se o índice de vazios no interior desta e, dessa forma, seria necessária uma maior quantidade de água para preenchê-los, resultando em uma umidade ótima maior e em uma massa específica seca máxima menor. O autor

mencionou que esse fato só era possível devido à estrutura floculada (formada pelo solo, pela cal e pela água) ser forte o suficiente para resistir à compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim a massa específica seca máxima do solo.

ANGELIM (2005), assim como LOVATO (2004), também obteve resultados de compactação parecidos com os encontrados nesta pesquisa. Contudo, esse autor, diferentemente do outro, analisou os efeitos para dois tipos de técnicas de estabilização de solo com a cal, assim como feito neste trabalho. A primeira delas utilizando-se a cal em pó e a outra utilizando-se a cal diluída na água de compactação (cal em pasta).

ANGELIM (2005), à época, mencionou que a cal hidratada é ávida por água e que esta possui uma propriedade de retenção de água bastante elevada. Na discussão dos resultados dos ensaios de compactação obtidos para as amostras de solo-cal, o autor comentou que os valores de umidade ótima obtidas para estas eram maiores que os da amostra de solo natural devido às partículas de cal (que substituíam uma parte das partículas de solo) apresentarem uma massa específica inferior aos das partículas de solo.

Os valores encontrados por ANGELIM (2005), referentes aos ensaios de granulometria e compactação (na energia intermediária) das amostras de solo natural e tratadas pela cal encontram-se expostos nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14: Distribuição Granulométrica

AMOSTRA	SOLO NATURAL	SOLO-CAL 3%	SOLO-CAL 6%	SOLO-CAL 3%	SOLO-CAL 6%
Modo de adição da cal	Sem adição	Em pó	Em pó	Diluída	Diluída
Abertura (mm)	Peneiramento (% que passa)				
4,76 (n° 4)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,00 (n° 10)	99,10	99,30	99,00	99,90	99,90
0,42 (n° 40)	92,90	91,60	92,10	93,50	92,70
0,15 (n° 100)	77,20	74,00	71,40	76,30	75,90
0,075 (n° 200)	62,60	57,10	52,70	59,40	58,90
Dimensão (mm)	Sedimentação (% que passa)				
0,037	49,50	46,60	38,40	50,20	45,10
0,019	46,70	41,80	34,50	46,90	38,70
0,009	45,50	37,60	29,00	44,40	33,90
0,005	41,50	31,40	23,50	37,50	28,10
0,002	37,00	26,30	18,60	29,30	20,50

Fonte: ANGELIM (2005)

Tabela 4.15: Ensaio de Compactação (energia intermediária).

AMOSTRA	Solo Natural	Solo-Cal 3%	Solo-Cal 6%	Solo-Cal 3%	Solo-Cal 6%
Modo de adição da cal	Sem adição	Em pó	Em pó	Diluída	Diluída
Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	1,750	1,680	1,616	1,716	1,656
Umidade Ótima (%)	18,60	20,80	21,70	20,20	20,90

Fonte: ANGELIM (2005)

É importante notar, ao se analisar os valores encontrados por este autor no ensaio de granulometria das amostras, que as misturas de solo-cal (pó) apresentaram uma quantidade de finos inferior aos obtidos para as misturas de solo-cal (pasta). Este fato é interessante, uma vez que as misturas de solo-cal (pasta) apresentaram valores de massa específica aparente seca máxima superiores aos obtidos para as amostras de solo-cal (pó) e valores de umidade ótima inferiores. Isso mostra que as misturas tratadas pela cal em pasta possuíam uma menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, exigiram uma menor quantidade de água para preenchê-los.

Assim como nos resultados obtidos por ANGELIM (2005), a amostra Am-B apresentou, de um modo geral, valores de massa específica aparente seca máxima maiores e de umidade ótima menores para as misturas de solo-cal (pasta) quando comparadas com as misturas de solo com cal em pó (Figura 4.12). Já para as misturas de solo Am-A com cal, percebeu-se que os valores de massa específica seca máxima obtidos para as amostras ensaiadas com cal em pó foram maiores do que os encontrados para as misturas ensaiadas com cal em pasta, enquanto que os de umidade ótima foram menores (Figura 4.11).

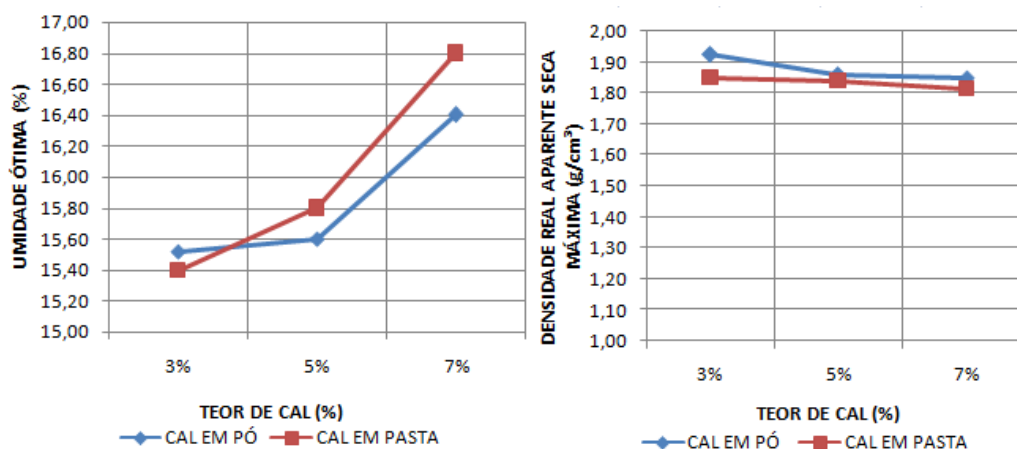


Figura 4.11: Resultados do ensaio de compactação em função do teor de cal (amostra Am-A).

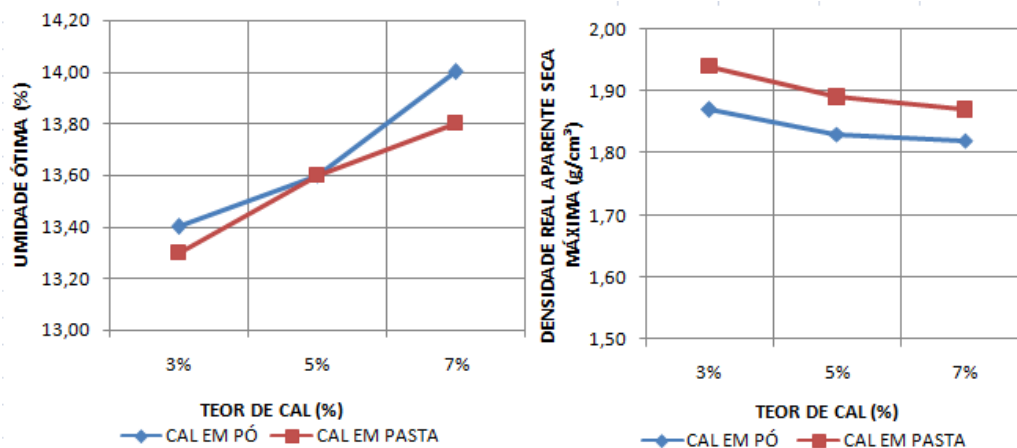


Figura 4.12: Resultados do ensaio de compactação em função do teor de cal (amostra Am-B).

Esse fato pode ter ocorrido pela própria distribuição granulométrica apresentada pela amostra Am-A, de tal modo que as misturas com cal em pó tenham apresentado um índice de vazios inferior ao encontrado para as misturas com cal em pasta, após o processo de homogeneização. Vale ressaltar que, durante a preparação das misturas de solo-cal (pasta), ensaiadas com a amostra de solo (Am-A), verificou-se a formação elevada de grumos, não constatada durante a aplicação da outra técnica investigada (cal em pó).

Com relação aos efeitos na variação da energia de compactação, foram realizados para as misturas de solo Am-A com cal (pó e pasta), ensaios na energia Proctor normal a fim de averiguar os efeitos desta nos resultados gerados (Tabela 4.16) e, posteriormente, comparar com os obtidos na energia Proctor intermediária.

As Figuras 4.13 e 4.14 fazem um comparativo entre os resultados, de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, respectivamente, para as misturas de solo Am-A estabilizadas, ensaiadas nas duas energias de compactação (normal e intermediária) analisadas.

Tabela 4.16: Resultados do ensaio de compactação na energia normal: amostra Am-A.

RESULTADOS	AMOSTRA Am-A						
	Solo Natural	Pó (3%)	Pó (5%)	Pó (7%)	Pasta (3%)	Pasta (5%)	Pasta (7%)
Umidade Ótima (%)	16,40	16,60	17,15	17,80	17,00	17,50	18,60
Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm³)	1,84	1,83	1,79	1,74	1,79	1,77	1,73

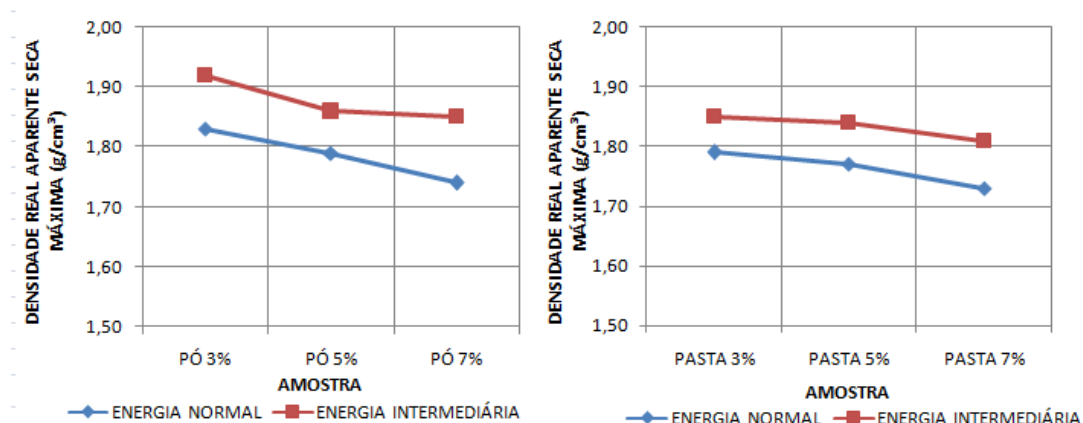


Figura 4.13: Comparativo entre os resultados de massa específica aparente seca máxima para as misturas estabilizadas (amostra Am-A).

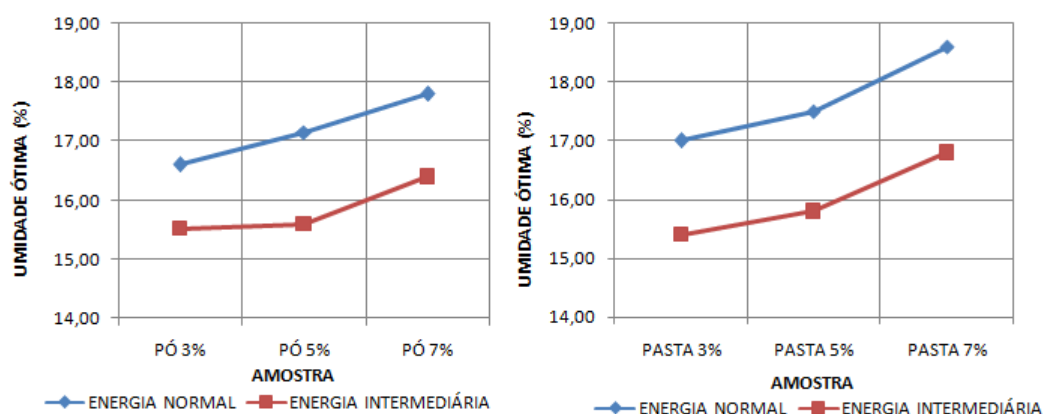


Figura 4.14: Comparativo entre os resultados de umidade ótima para as misturas estabilizadas (amostra Am-A).

Analisando-se as curvas apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14 percebe-se que os resultados de massa específica aparente seca máxima são mais altos para as misturas compactadas na energia intermediária. Enquanto que os valores da umidade ótima encontrada para misturas compactadas na energia normal, são superiores aos encontrados para as misturas compactadas na energia intermediária, como esperado.

Esse fato pode ser explicado levando-se em conta o índice de vazios presentes em cada mistura. Quando uma amostra qualquer é compactada na energia intermediária esta irá apresentar um índice de vazios inferior a de uma amostra semelhante compactada na energia normal. Dessa forma, a amostra que apresentou um índice de vazios mais alto necessitaria de uma maior quantidade de água para preenchê-los,

resultando em uma umidade ótima maior e em uma massa específica seca máxima menor.

4.6. ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Na análise de materiais estabilizados, os valores de resistência à compressão simples são utilizados no método de dimensionamento empírico de camadas de pavimentos. Decidiu-se realizar os ensaios de Índice de Suporte Califórnia - ISC, para as amostras de solo estabilizadas, com o intuito apenas de verificar os incrementos nos valores da capacidade de suporte ocorridos após a realização das misturas do aditivo aos solos.

A Tabela 4.17 apresenta os valores do ISC obtidos para as amostras naturais de solo, Am-A e Am-B, e para as amostras estabilizadas ou modificadas quimicamente pela cal nos teores de 3%, 5% e 7%, compactadas na energia Proctor intermediária.

Já as Figuras 4.15 e 4.16, apresentam as curvas de ISC *versus* teor de cal para as misturas dos solos Am-A e Am-B estabilizadas, respectivamente, referentes aos valores expostos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Valores de ISC das amostras analisadas (energia intermediária).

AMOSTRA	TEOR DE CAL (%)	ÍNDICE DE SUPORTE	
		Cal em Pó	Cal em Pasta
Am-A	0%	4,00	4,00
	3%	34,72	32,94
	5%	65,29	76,96
	7%	60,41	76,38
Am-B	0%	17,62	17,62
	3%	39,58	19,08
	5%	32,33	34,55
	7%	32,20	21,97

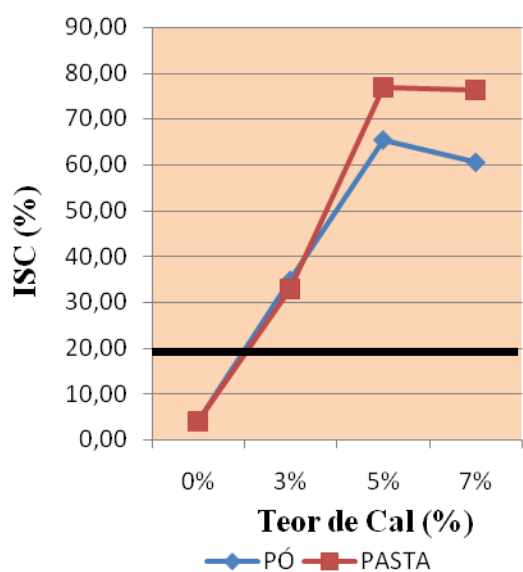


Figura 4.15: Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-A.

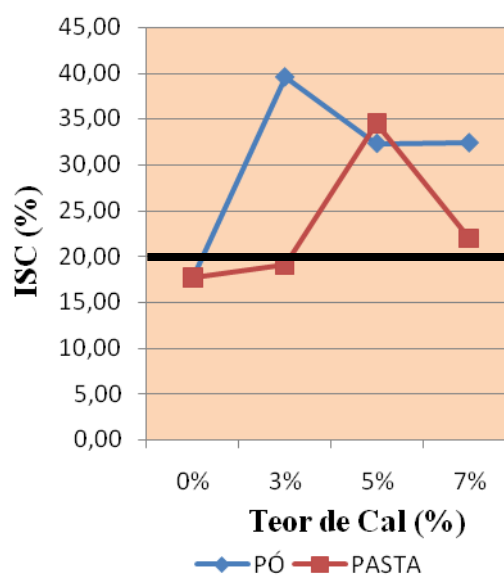


Figura 4.16: Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-B.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16, verifica-se uma discrepância nos valores de ISC entre as misturas de solo Am-B mais 3% cal em pó e de solo Am-B mais 3% cal em pasta. Desconhece-se a razão da diferença entre esses valores. Tem-se, porém, o conhecimento, de acordo com algumas bibliografias, como a de BERNUCCI (1995) e a de BARROSO (2002), que o ensaio de CBR pode resultar em grandes dispersões de resultados, principalmente quando realizados por operadores diferentes e em laboratórios distintos.

Com relação à influência do teor de estabilizante nas misturas, observou-se que teores maiores que 5% de cal não provocaram acréscimos adicionais na capacidade de suporte destas. Esse fato foi verificado para as duas amostras de solo estabilizadas e para as duas formas de aplicação da cal investigadas (cal em pó e cal em pasta).

De acordo com NÚÑEZ (1991), a explicação para esse comportamento é o fato da melhoria do CBR das amostras de solos, estabilizados quimicamente pela cal e não curadas, ocorrer devido à troca catiônica e à floculação. Esse autor comenta que a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) faz com que pequenos teores (como de 3% a 5%) satisfaçam apenas a afinidade da cal pelo solo, enquanto que a cal em excesso (acima de 5%, por exemplo) é consumida em reações pozolânicas, que não ocorrem de imediato e

não se iniciam durante o período de 96 horas de imersão, a que são submetidos os corpos de prova durante o ensaio de ISC.

É importante destacar ainda que a técnica de estabilização utilizando-se cal em pasta apresentou resultados melhores do que os obtidos com a adição da cal em pó, quando misturadas a amostra de solo Am-A. O mesmo não aconteceu nos resultados obtidos para as amostras de solo Am-B estabilizadas com cal.

Acredita-se, porém, que a adição de cal em pasta ao solo acelere mais a ocorrência das reações de troca de cátions e floculação quando comparado com a aplicação da cal em pó, devido às reações químicas entre um fluido (pasta) e um sólido (solo) se processarem de maneira mais rápida do que as reações entre um sólido (solo) e outro sólido (cal em pó). No entanto, isto é apenas uma hipótese e seria interessante que este fato fosse melhor analisado em pesquisas futuras, mesmo por não ter sido observado resultados de ISC mais elevados para a amostra de solo Am-B tratada pela cal em pasta.

Vale destacar, o trabalho realizado por ANGELIM (2005), onde foi estudado o processo de estabilização de um solo fino laterítico com a adição da cal em pó e cal em pasta. O autor observou a influência positiva da adição da cal diluída na água de compactação, no que diz respeito ao aumento do valor de ISC. Os resultados de CBR encontrados por ANGELIM (2005) encontram-se expostos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Resultados de ISC obtidos por ANGELIM (2005).

RESULTADO	AMOSTRA				
	Solo Natural	Cal em Pó (3%)	Cal em Pó (6%)	Cal em Pasta (3%)	Cal em Pasta (6%)
CBR (%)	16,00	31,00	37,00	49,00	92,00

Analisando-se os valores contidos nessa Tabela, percebeu-se que, assim como para a amostra de solo Am-A, analisada nesta pesquisa, os resultados obtidos por ANGELIM (2005) apresentaram resultados de ISC mais elevados para as misturas estabilizadas pela cal em pasta.

Quanto ao tipo de energia de compactação aplicada às misturas estabilizadas, verificou-se que os valores de ISC obtidos após a ruptura das misturas de solo Am-A com cal (em pó e pasta), ensaiadas na energia Proctor normal (Tabela 4.19),

apresentaram valores bem inferiores aos encontrados para as misturas de solo Am-A com cal, compactadas na energia Proctor intermediária. A Figura 4.17 apresenta um comparativo entre esses resultados.

Tabela 4.19: Valores de ISC para a amostra Am-A (energia normal).

AMOSTRA	TEOR DE CAL (%)	ÍNDICE DE SUPORTE	
		Cal em Pó	Cal em Pasta
Am-A	0%	3,00	3,00
	3%	13,45	14,40
	5%	19,73	22,73
	7%	18,59	29,59

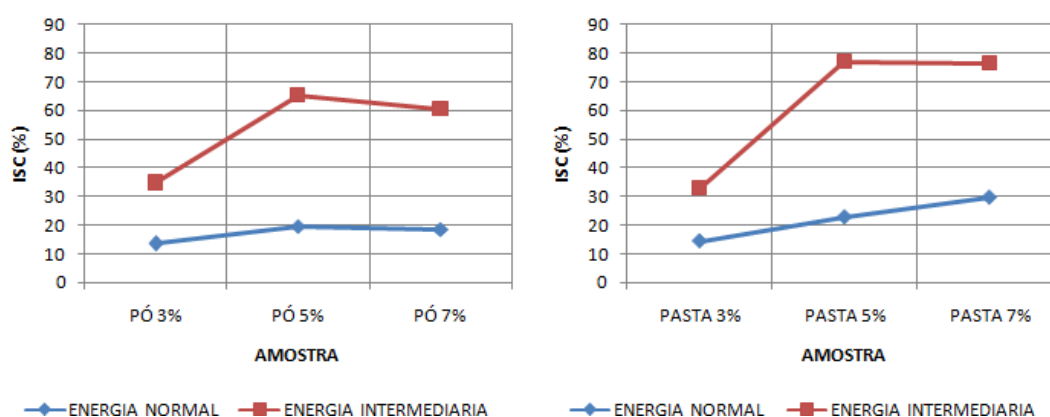


Figura 4.17: Comparativo entre os valores de ISC quanto ao tipo de energia de compactação aplicada (amostra Am-A).

Com base nos resultados apresentados nestas figuras, observou-se a influência do tipo de energia de compactação nos valores de ISC das misturas de solo-cal. Contudo, é sabido que uma maior energia de compactação representa, na prática, maiores custos com equipamentos e pessoal.

Pode-se concluir que as duas amostras de solo analisadas apresentaram, de um modo geral, uma melhoria em suas capacidades de suporte após serem tratadas pela cal. A amostra Am-A, no entanto, apresentou melhores resultados que os obtidos para a amostra Am-B após o processo de estabilização.

4.7. EXPANSÃO

Os valores da expansão obtidos para as amostras naturais dos solos analisados não foram elevados, sendo encontrados resultados inferiores aos citados na Tabela 4.3, exposta no item 4.1 desse trabalho. Mesmo assim, verificou-se que, após a adição da cal

(em pasta e em pó) aos solos estudados, as misturas estabilizadas apresentaram uma redução da expansão à medida que uma maior quantidade de estabilizante foi adicionada a amostra ensaiada.

A Tabela 4.20 mostra os resultados de expansão obtidos para todas as misturas estabilizadas analisadas neste trabalho.

Tabela 4.20: Valores de expansão encontrados para as misturas de solo-cal.

AMOSTRA	TEOR DE CAL (%)	EXPANSÃO (%)	
		Cal em Pó	Cal em Pasta
Am-A	0%	0,21	0,21
	3%	0,03	0,04
	5%	0,02	0,01
	7%	0,00	0,00
Am-B	0%	0,03	0,03
	3%	0,00	0,00
	5%	0,00	0,00
	7%	0,00	0,00

Para a amostra de solo Am-A verificou-se uma redução na expansão de 0,21% para 0,03% com a adição de apenas 3% de cal (em pó), após esta mistura ser compactada na energia Proctor intermediária. Esses valores continuaram a cair com o aumento da porcentagem de cal adicionada ao solo até atingir um valor nulo, ou seja, até a mistura estabilizada não expandir mais.

Foram encontrados para as amostras ensaiadas com 5% e 7% de cal em pó valores de expansão iguais a 0,02% e 0,00%. Para as misturas ensaiadas com cal em pasta foram obtidos valores bem parecidos, sendo encontrados resultados de expansão de 0,04% para a amostra ensaiada com 3% de cal, de 0,01% para a amostra ensaiada com 5% e de 0,00% para a amostra ensaiada com 7% de cal.

Já a amostra de solo Am-B, apresentou uma redução de expansão de 0,03% para 0,00% após a adição da cal nos três teores analisados (3%, 5% e 7%), para as duas formas de aplicação desse estabilizante estudadas (cal em pó e cal em pasta).

Com relação à variação da energia de compactação, verificou-se que as amostras de solo Am-A ensaiadas com cal (em pó e em pasta) e compactadas na energia Proctor normal apresentaram, de um modo geral, valores de expansão um pouco mais elevados que os das misturas ensaiadas na energia de compactação Proctor intermediária. Os

valores de expansão encontrados para as misturas de solo-cal, ensaiadas na energia normal, foram de: 0,04% para as amostras ensaiadas com 3% e 5% de cal em pó, 0,00% para a amostra ensaiada com 7% de cal em pó, 0,05% para a amostra ensaiada com 3% de cal em pasta, 0,02% para a amostra ensaiada com 5% de cal em pasta e 0,00% para a amostra ensaiada com 7% de cal em pasta. Esse resultado já era esperado.

4.8. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples (RCS) é uma característica muito importante na análise da estabilização de um solo pela cal. Os valores de RCS são utilizados na análise de materiais estabilizados, quando da aplicação do método de dimensionamento empírico de camadas de pavimentos.

Nesse trabalho, foram realizados ensaios de RCS para misturas de solo-cal compactadas uma hora após a mistura/homogeneização dos materiais (ensaios convencionais) e compactadas após períodos de espera pré-determinados de 2, 4, 6 e 8 horas depois da realização da mistura/homogeneização (ensaios não convencionais).

Assim como nos resultados obtidos por LOVATO (2004), percebeu-se que a maioria dos corpos de prova apresentaram uma ruptura frágil durante a realização desses ensaios. Segundo esse autor, isto é uma característica marcante dos materiais cimentados.

A Figura 4.18 apresenta a forma como a maioria das amostras, que apresentaram resultados válidos, sofreu sua ruptura. Observou-se que a superfície de ruptura apresentou tendência diagonal em relação ao eixo axial dos CPs, cortando-os na extremidade de sua base superior à extremidade de sua base inferior.



Figura 4.18: Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de RCS.

No cálculo dos valores de resistência à compressão simples foi utilizada a fórmula da equação 4.15, retirada da norma ASTM D5102.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.15)$$

Onde:

σ - resistência à compressão simples (kPa);

P – Força axial aplicada ao corpo de prova (kN);

A – área da seção transversal correspondente.

A Figura 4.19 apresenta as formas de ruptura possíveis de ocorrer durante o ensaio de RCS, de acordo com a norma ASTM D5102, e apresenta a correlação dos valores da área da seção transversal (A_o), obtida após a moldagem dos corpos de prova, com o valor da área da seção transversal correspondente (A), obtida após a ruptura dos corpos de prova e em função das formas de ruptura da amostra ensaiada. Para todos os corpos de prova analisados neste trabalho utilizou-se a correlação $A = A_o$.

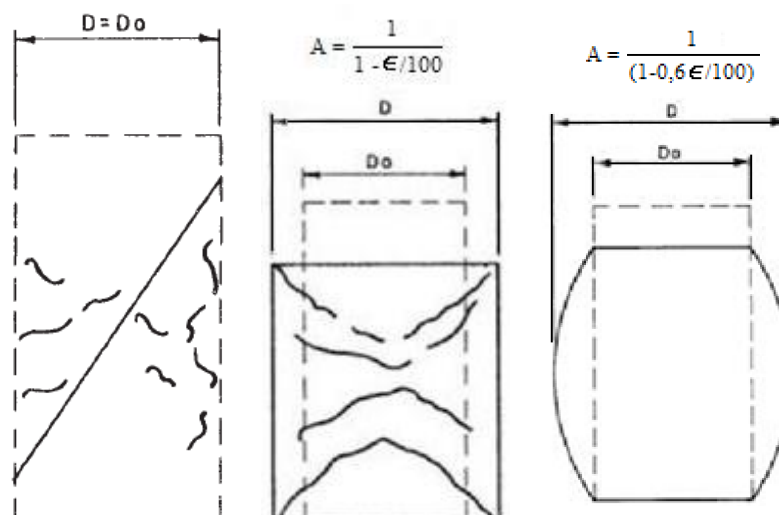


Figura 4.19: Formas de ruptura para as amostras submetidas ao ensaio de RCS (ASTM D5102).

4.8.1. Resultados da RCS em Função do Tempo de Cura em Dias e do Teor de Cal (Ensaio Convencionais)

As Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam os resultados de RCS encontrados para as misturas de solo Am-A mais cal e solo Am-B mais cal, respectivamente. Essas misturas

foram submetidas a períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias, compactadas na energia Proctor intermediária e ensaiadas com a adição do estabilizante nos teores de 3%, 5% e 7%.

Tabela 4.21: Resistência à Compressão Simples (MPa): Am-A.

TÉCNICA UTILIZADA		CAL EM PÓ			CAL EM PASTA		
TEOR DE CAL		3%	5%	7%	3%	5%	7%
TEMPO DE CURA	0 DIA	0	0	0	0	0	0
	7 DIAS	0,38	0,31	0,32	0,39	0,25	0,34
	14 DIAS	0,75	0,73	0,62	0,60	0,43	0,67
	28 DIAS	0,83	1,24	1,17	0,87	0,47	0,89
	90 DIAS	0,56	1,52	1,18	0,55	1,20	1,37

Tabela 4.22: Resistência à Compressão Simples (MPa): Am-B.

TÉCNICA UTILIZADA		CAL EM PÓ			CAL EM PASTA		
TEOR DE CAL		3%	5%	7%	3%	5%	7%
TEMPO DE CURA	0 DIA	0	0	0	0	0	0
	7 DIAS	0,20	0,19	0,20	0,21	0,20	0,15
	14 DIAS	0,28	0,21	0,22	0,23	0,36	0,35
	28 DIAS	0,21	0,30	0,26	0,20	0,38	0,27
	90 DIAS	0,18	0,33	0,30	0,15	0,41	0,30

Com relação aos resultados de RCS encontrados para as misturas de solo-cal, verificou-se a influência de alguns fatores preponderantes para a melhoria da resistência mecânica dos solos analisados, tais como: porcentagem de cal adicionada à amostra de solo, período de cura aos quais os corpos de prova foram submetidos, tipo de técnica de estabilização aplicada (cal em pó e cal em pasta) e tipo de solo utilizado. A influência de cada um desses fatores é abordada nos itens 4.8.1.1, 4.8.1.2 e 4.8.1.3.

4.8.1.1. Amostra Am-A

A Figura 4.20 apresenta a evolução dos valores de RCS, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-A tratadas com a cal, em pó e em pasta. As linhas vermelhas dessa figura indicam os valores de RCS mínimos, citados por LITTLE (1995), exigidos pelo Illinois Highway Department para o uso de misturas de solo-cal em camadas de subbase (0,689 MPa) e base (1,034 MPa) de pavimentos rodoviários.

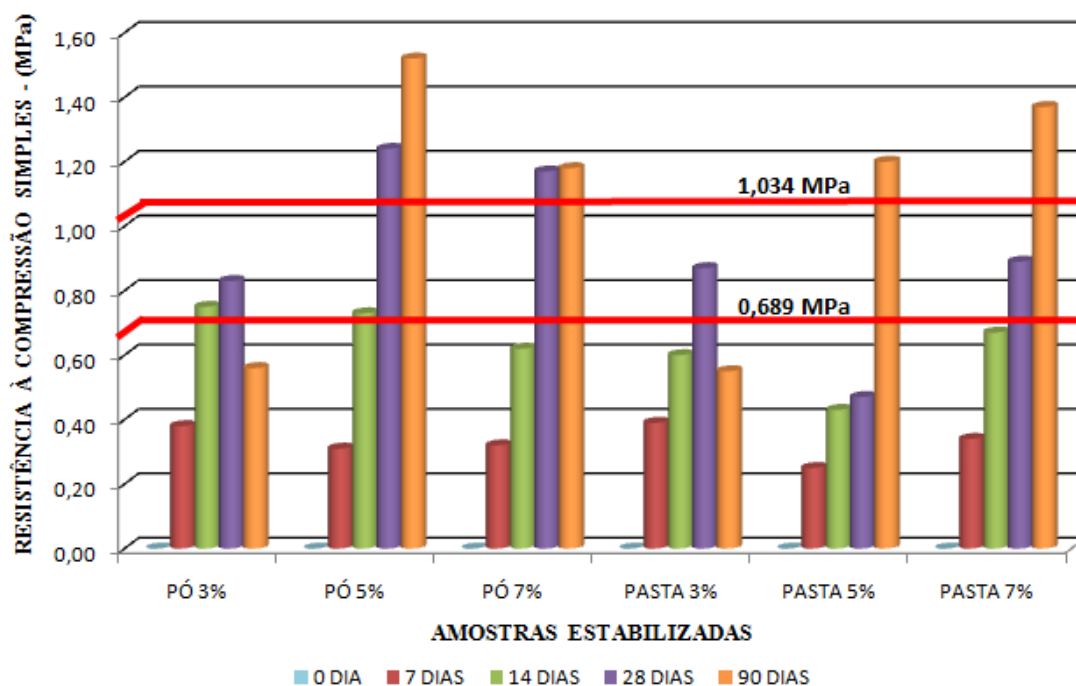


Figura 4.20: Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-A mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos resultados de RCS apresentados na Figura 4.20, observou-se que as amostras de solo Am-A tratadas com a cal, para ambas as formas de aplicação do estabilizante investigadas, apresentaram, de um modo geral, ganhos de resistência com o aumento dos períodos de cura.

Contudo, verifica-se que as misturas de solo Am-A + 3% de cal (em pó e em pasta) alcançaram sua resistência máxima aos 28 dias de cura (0,83 MPa e 0,87 MPa), apresentando uma redução nesses valores para um tempo de cura de 90 dias. O comportamento apresentado por essas misturas permitiu supor que as reações pozolânicas foram cessadas para as mesmas entre o período de 28 a 90 dias. Um dos motivos para a ocorrência desse fato seria o de não haver mais cal disponível para combinar-se a sílica e a alumina dos argilominerais presentes no solo.

NÚÑEZ (1991), ao investigar os efeitos do período de cura na evolução dos valores de RCS em misturas de solo-cal, também verificou, para as amostras tratadas com teores mais baixos da cal (3%), que a resistência dos solos estabilizados caía após estes serem submetidos a tempos de cura mais longos (90 dias). O autor observou que

isso ocorria devido o valor do pH de suas amostras apresentar uma redução para períodos de cura mais altos, o que, provavelmente inibiu as reações pozolânicas.

NÚÑEZ (1991), verificou ainda, que para as misturas ensaiadas com maiores teores de cal, o valor do pH aumentava, à medida que as amostras eram submetidas a períodos de cura mais longos, criando, dessa forma, condições satisfatórias para o desenvolvimento das reações cimentantes nas misturas estabilizadas.

É importante mencionar algumas ressalvas feitas por esse autor, ao comentar citações de INGLES (1970), que afirmavam que a degradação do argilomineral por meio de um pH elevado é condição necessária, porém não suficiente para que haja ganhos significativos de resistência.

Com relação à influência dos teores de estabilizante nos valores de RCS das misturas de solo Am-A com cal, pode-se verificar, através dos resultados apresentados na Figura 4.20, que as amostras ensaiadas com cal em pó apresentaram melhores resultados de resistência após serem tratadas com 5% desse aditivo. Já as misturas de solo Am-A ensaiadas com cal em pasta apresentaram melhores resultados de RCS (ver Tabela 4.20) para as misturas tratadas com 7% do estabilizante.

Analisando-se o gráfico da Figura 4.20 percebeu-se que, para períodos de cura mais baixos (0 – 14 dias), a adição da cal em pó na percentagem de 3% apresentou valores de RCS mais elevados do que as misturas com 5% e 7% de cal. Contudo, para períodos de cura mais elevados (28 – 90 dias) verificou-se a ocorrência expressiva das reações pozolânicas nas misturas mais ricas (com 5% e 7% de cal).

Esse fato ocorreu, possivelmente, devido às misturas com 3% de cal possuírem uma quantidade de estabilizante suficiente apenas para satisfazer a capacidade de troca catiônica (CTC), responsável pela melhoria na trabalhabilidade da amostra e pelo ganho inicial de resistência. Enquanto isso, as misturas com 5% e 7% de cal, além de apresentarem cal suficiente para satisfazerem a CTC, apresentaram uma quantidade excedente de estabilizante que proporcionaram a ocorrência das reações cimentantes, responsáveis pelo aumento da resistência do solo com o passar do tempo.

Já para as misturas de solo Am-A tratadas com cal em pasta verificou-se que a adição de 3% do estabilizante apresentou valores de RCS mais elevados do que os obtidos para as misturas ensaiadas com 5% e 7% de cal, submetidas a períodos de cura mais baixos (0 – 7 dias), como observado para as amostras ensaiadas com cal em pó. Para períodos de cura mais longos (14 – 90 dias) observou-se que a mistura ensaiada com 7% de cal em pasta apresentou os maiores valores de RCS.

Vale ressaltar, porém, que a mistura de solo Am-A mais 5% de cal em pasta apresentou valores de RCS inferiores aos encontrados para as misturas ensaiadas com 3% e 7%, após um período de cura de 14 e 28 dias. Dessa forma, constatou-se que a mistura estabilizada com 5% de cal em pasta teve uma ocorrência menos expressiva das reações pozolânicas do que a mistura estabilizada com 5% de cal em pó, para os dois períodos de cura mencionados.

Com relação aos valores de RCS mínimos exigidos pelo Illinois Highway Department, para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base e subbase de rodovias, pode-se verificar, através da Figura 4.20, que todas as amostras estabilizadas apresentaram valores de resistência superiores a 0,689 MPa em pelo menos um dos períodos de cura analisados. Além disso, observou-se que as misturas tratadas com 5% e 7% de cal, em pó e em pasta, apresentaram valores de RCS superiores a 1,034 MPa, para períodos de cura específicos.

Vale ressaltar o trabalho de LOIOLA e BARROSO (2007), onde foi discutido o caso de uma rodovia cearense (conhecida localmente por rodovia do Melão - CE 377), executada com uma camada de base em solo-cal, apresentar-se em boas condições estruturais depois de decorridos 7 anos de sua execução. Esse fato, segundo os autores, ocorreu devido ao bom desempenho apresentado pela camada de base estabilizada. A mistura utilizada nessa camada apresentou um valor de RCS, em laboratório, de aproximadamente 0,7 MPa (após 60 dias de cura e uma imersão em água de 4 horas antes da ruptura).

Dessa forma, recomenda-se o uso de 5% de cal para ser adicionado a amostra de solo Am-A. Este teor se justifica para as duas formas de aplicação da cal, uma vez que as misturas atingiram valores superiores a 0,7 MPa. Acredita-se que esse valor seja recomendável para ser aceito como resistência mínima em projetos de rodovias de baixo

volume de tráfego. Observou-se que no trabalho de LOYOLA e BARROSO (2007) existem comprovações práticas para aceitação desse resultado.

Com o intuito de observar a correlação entre os valores de RCS e os períodos de cura analisados, para cada teor de cal ensaiado, bem como a influência da forma de aplicação da cal nas misturas, elaboraram-se os gráficos das Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, onde foram apresentadas equações polinomiais do 2º e seus respectivos R², relacionando os valores de RCS obtidos (eixo y) com os tempos de cura aos quais as misturas estabilizadas foram submetidas antes da ruptura.

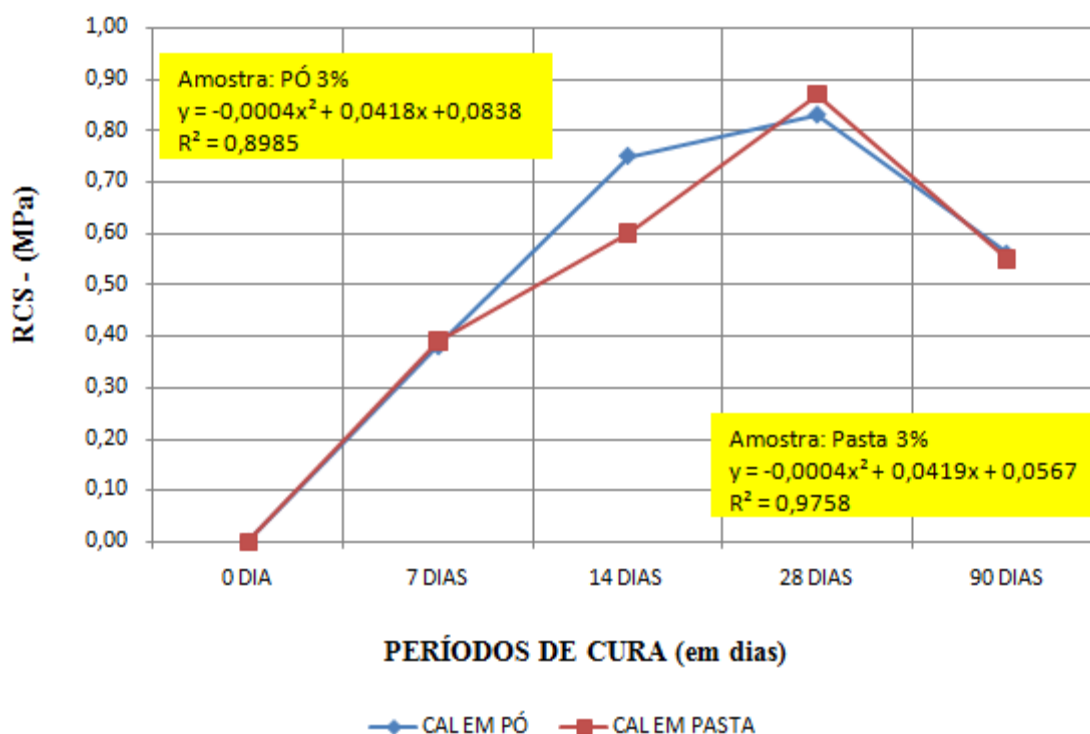


Figura 4.21: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A, mais 3% de cal (em pó e em pasta).

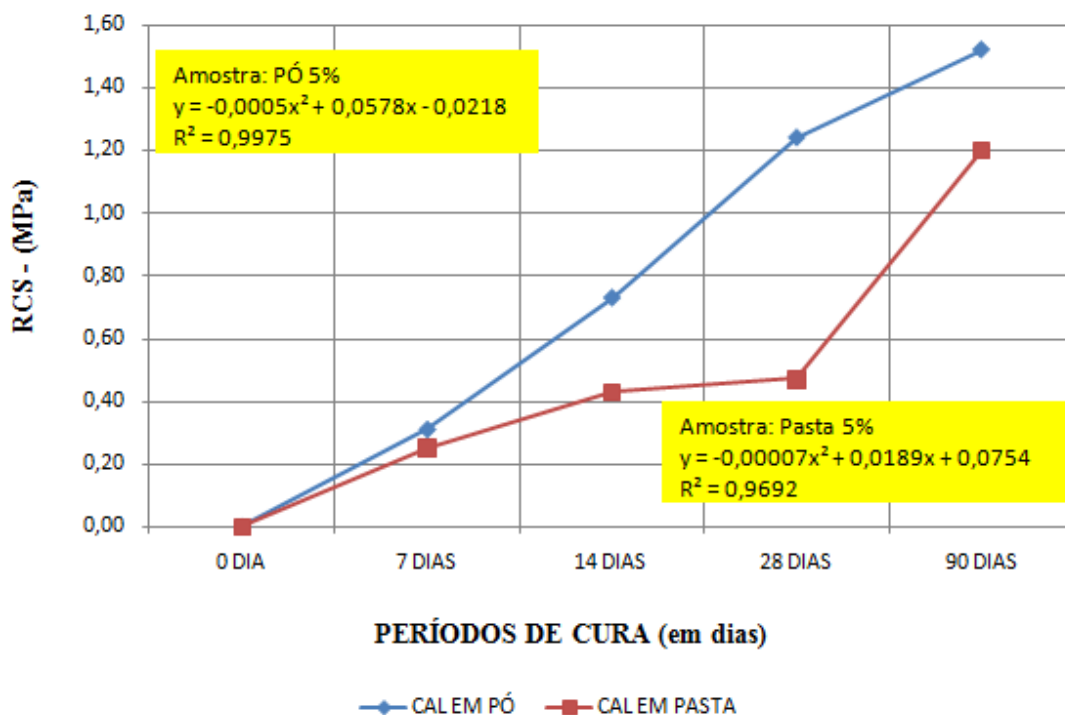


Figura 4.22: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A mais 5% de cal (em pó e em pasta).

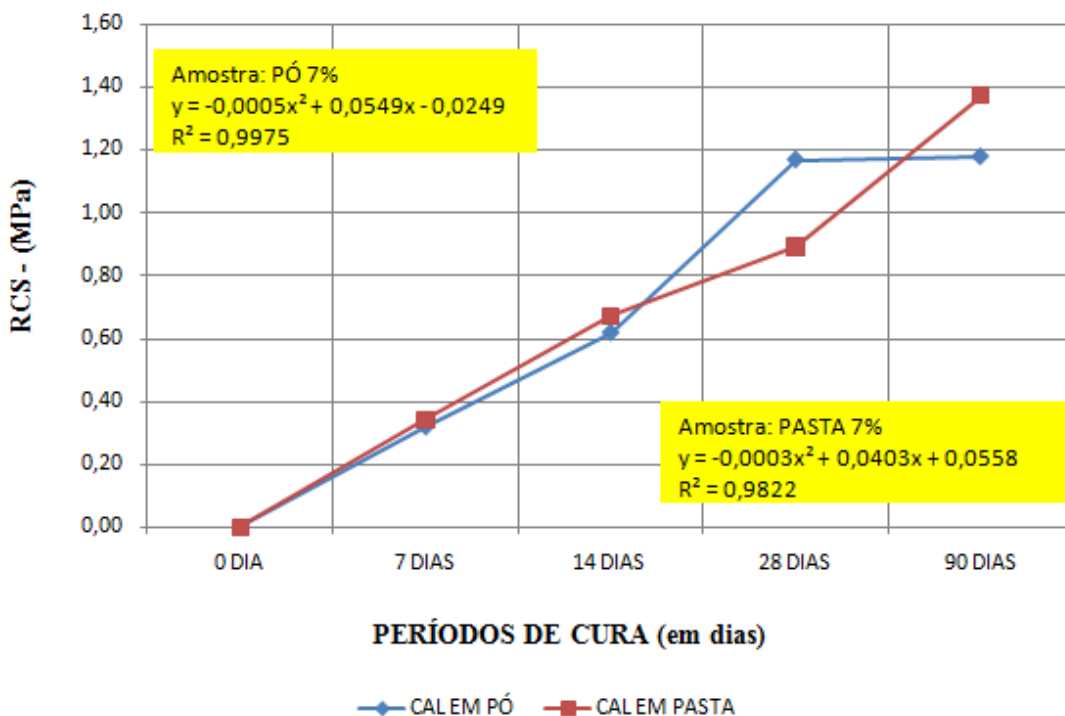


Figura 4.23: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-A mais 7% de cal (em pó e em pasta).

Analisando-se as Figuras 4.21 a 4.23, percebeu-se que as equações apresentadas nas mesmas tiveram uma boa correlação entre as variáveis investigadas, uma vez que os valores de R^2 foram superiores a 0,89.

Com relação à forma de aplicação da cal nas amostras, observou-se que, de uma forma geral, os resultados RCS foram bem parecidos para misturas tratadas pela cal em pó e em pasta. Contudo, verificaram-se algumas diferenças nos resultados de resistência encontrados para as misturas ensaiadas com 5% de estabilizante (após um período de cura de 14, 28 e 90 dias) e para as misturas ensaiadas com 7% de estabilizante (após um período de cura de 28 e 90 dias). Em função dos resultados apresentados por essas amostras, pode-se verificar que as mesmas apresentaram melhores incrementos de resistência quando aplicada a forma de aplicação da cal convencionalmente utilizada, ou seja, em pó.

4.8.1.2. Amostra Am-B

A Figura 4.24 apresenta a evolução dos valores de RCS, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-B tratadas com a cal, em pó e em pasta.

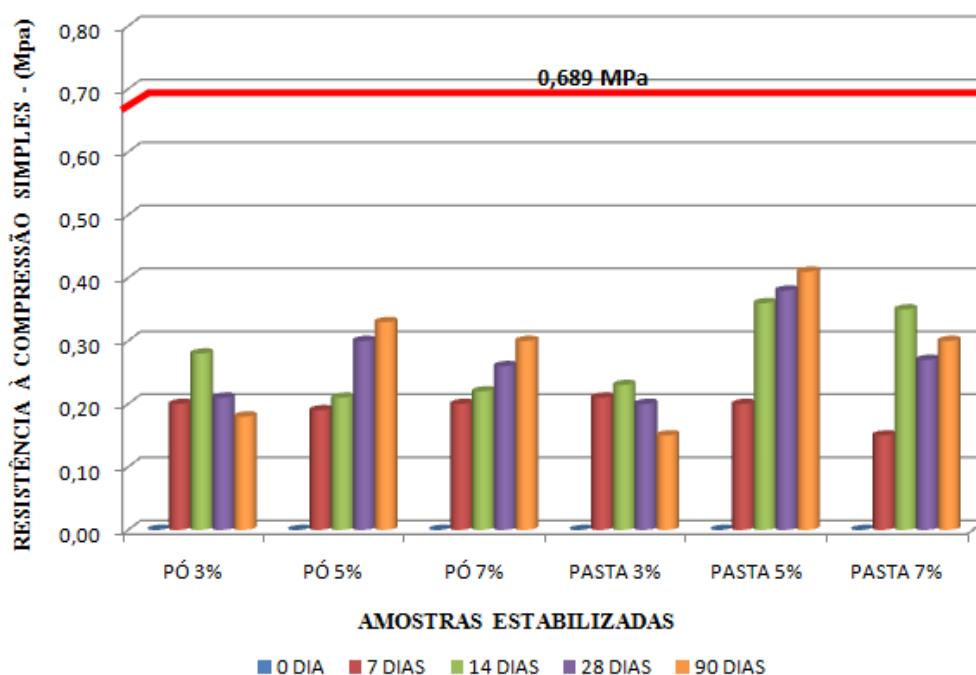


Figura 4.24: Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-B mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.24, verificou-se que as misturas de solo Am-B mais cal em pó apresentaram maiores incrementos de resistência em seus valores quando ensaiadas com teores mais elevados de cal (5% e 7%), em função do aumento dos períodos de cura aos quais estas amostras foram submetidas antes da ruptura. Já a mistura de solo Am-B mais cal em pó (3%) apresentou uma redução no valor de RCS para períodos de cura mais longos (28 – 90 dias), como verificado para a mistura de solo Am-A mais cal em pó (3%). Porém, essa mistura, diferentemente da outra, alcançou sua resistência máxima aos 14 dias (0,28 MPa).

Acredita-se que a evolução dos valores de RCS para essas amostras, assim como observado para as misturas de solo Am-A mais cal, ocorreu dessa maneira, possivelmente, devido às misturas com 3% de cal possuírem uma quantidade de estabilizante suficiente apenas para satisfazer a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Enquanto isso, as misturas com 5% e 7% de cal (pó) apresentaram estabilizante suficiente para satisfazerem tanto a CTC como a ocorrência das reações pozolânicas.

Com relação aos resultados de RCS encontrados para as amostras de solo Am-B mais cal em pasta, percebeu-se que estas apresentaram incrementos de resistência em seus valores, em função do aumento do tempo de cura, para as misturas ensaiadas com 5% de estabilizante. Porém, para as amostras ensaiadas com 3% e 7% de cal verificou-se uma redução nos valores de RCS após 14 dias de cura.

Os resultados de RCS encontrados para as misturas de solo Am-B mais cal em pasta (7%), apresentaram um comportamento diferente dos obtidos para as misturas de solo Am-B mais cal em pó (7%). Não foi suposta nenhuma explicação para ocorrência desse fato. Constatou-se, porém, que as reações pozolânicas foram menos expressivas, entre os períodos de cura de 14 a 28 dias, para amostra de solo Am-B mais 7% de cal (em pasta).

Observou-se, ainda, que as misturas estabilizadas com maiores quantidades de cal (5% e 7%) exigiram maiores períodos de cura para o desenvolvimento das reações cimentantes nas amostras e, conseqüentemente, apresentaram ganhos de resistência mais expressivos para períodos mais longos (28 – 90 dias). Para as duas formas de aplicação da cal investigadas, observou-se que a inserção de 5% do estabilizante proporcionou os maiores incrementos de resistência as amostras naturais.

Com relação aos valores de RCS mínimos exigidos pelo Illinois Highway Department, para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base e subbase de rodovias, pode-se verificar, através da Figura 4.24, que nenhuma das amostras de solo Am-B tratada pela cal atingiu o valor de 0,689 MPa. O acréscimo de RCS para essa amostra não se mostrou muito satisfatório. Acredita-se que esse solo esteja mais apto a ser estabilizado por outro processo químico, como o da inserção de betume. GONDIM (2008) estabilizou esse mesmo material com 5% de emulsão RL-1C obtendo valores de RCS superiores a 1,5 MPa (para cura seca).

A fim de compreender melhor a relação entre os valores de RCS apresentados pelas misturas de solo Am-B estabilizadas e os períodos de cura ensaiados, para cada teor de cal testado, bem como a influência da forma de aplicação da cal nas misturas, foram elaborados os gráficos das Figuras 4.25, 4.26 e 4.27. Nesses gráficos foram apresentadas equações polinomiais do 3º com seus respectivos R^2 , relacionando os valores de RCS obtidos (eixo y) com os tempos de cura aos quais as misturas estabilizadas foram submetidas antes da ruptura.

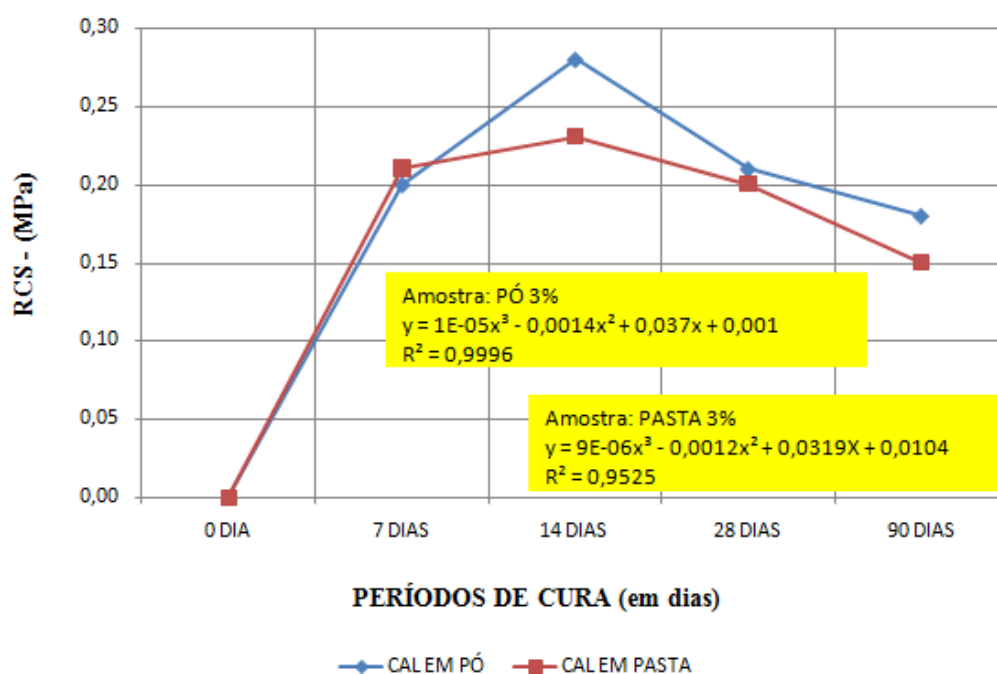


Figura 4.25: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 3% de cal (em pó e em pasta).

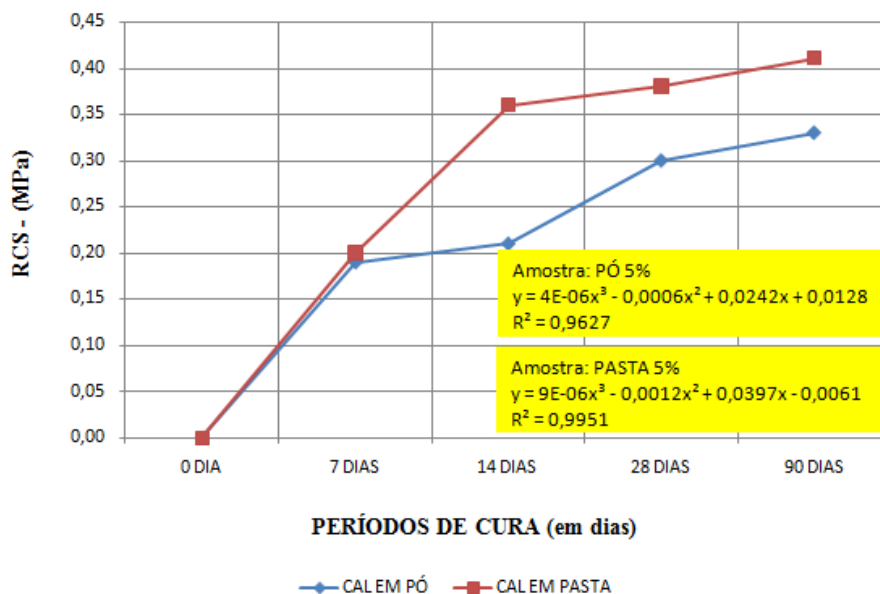


Figura 4.26: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 5% de cal (em pó e em pasta).

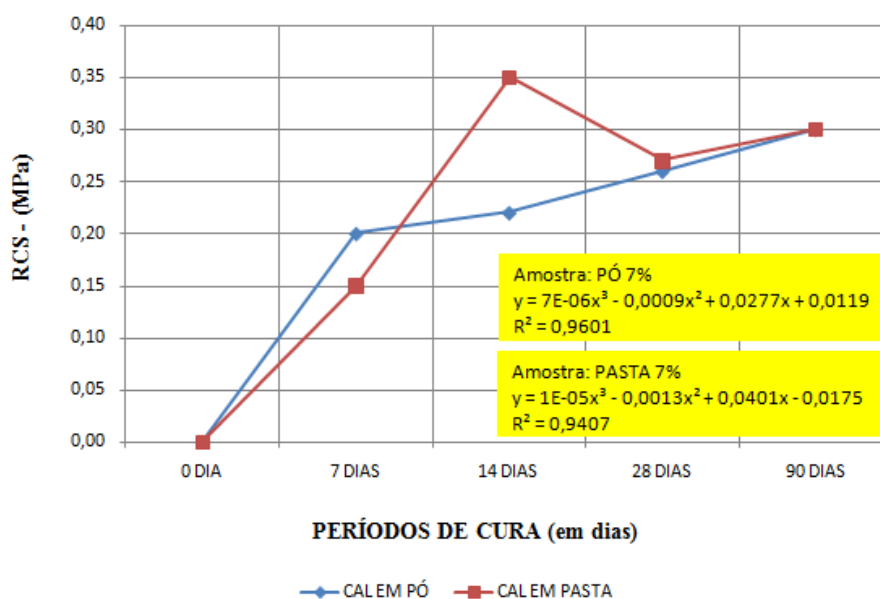


Figura 4.27: Evolução da RCS com o tempo de cura para as amostras de solo Am-B mais 7% de cal (em pó e em pasta).

A relação entre os valores de RCS das misturas de solo Am-B mais cal e os períodos de cura investigados, diferentemente do obtido para a outra amostra de solo, não apresentou valores elevados de R^2 quando utilizadas equações polinomiais do 2º. Devido a isso, decidiu-se utilizar equações polinomiais do 3º grau. Estas equações apresentaram valores de R^2 superiores a 0,9, indicando uma boa correlação entre as variáveis analisadas.

Com relação ao modo de aplicação da cal à amostra de solo Am-B, verifica-se que os valores de RCS, para ambas as técnicas utilizadas (cal em pó e cal em pasta), apresentaram resultados semelhantes. Foram constatadas apenas algumas diferenças nos valores de resistências obtidos para as misturas tratadas com 5% do estabilizante (submetidas aos períodos de cura de 14, 28 e 90 dias) e para as misturas tratadas por 3% do estabilizante (submetidas a um período de cura de 14 dias). Para essas misturas a forma de aplicação da cal em pasta mostrou-se mais eficiente.

4.8.1.3. Influência do Tipo de Solo Utilizado

Com relação ao tipo de solo utilizado, observou-se que os resultados de RCS obtidos para as misturas de solo Am-A mais cal foram melhores que os obtidos para as misturas de solo Am-B mais cal. Supõe-se que isso ocorreu devido a amostra de solo Am-A, possivelmente, apresentar uma quantidade de pozolana superior a encontrada no solo Am-B. De acordo com HERRIN E MITCHELL (1968), quando um solo disponibiliza a pozolana desejada, ela reage prontamente com a cal para melhorar a resistência da mistura solo-cal. Contudo, se o solo possuir uma pequena quantidade, ou nenhuma pozolana, pouca melhora se obtém pela adição da cal.

Dessa forma, pode-se constatar, de um modo geral, à luz dos resultados de RCS obtidos, que a aplicação da cal pode ser utilizada satisfatoriamente apenas na estabilização do solo Am-A, permitindo inclusive o uso dessa amostra em camadas nobres de rodovias de baixo volume de tráfego.

4.8.2. Resultados da RCS em Função do Tempo de Espera da Mistura Solo-Cal (Ensaio Não Convencionais)

Nestes ensaios, verificou-se a influência do tempo de espera entre a mistura (do solo, da cal e da água) e a compactação das amostras analisadas. Assim como na pesquisa desenvolvida por LOVATO (2004), foram pré-determinados alguns períodos de espera, após a mistura/homogeneização das amostras, antes da realização do ensaio de RCS. Os períodos de espera adotados foram de 2, 4, 6 e 8 horas. As misturas de solo-cal foram submetidas a um período de cura de 28 dias e foram modificadas/estabilizadas com a adição de apenas 3% de estabilizante, sendo submetidas a uma imersão prévia de 24 horas, em água potável, antes da realização do ensaio.

A norma da ASTM D5102/96 recomenda um período de espera de 1 hora, entre a mistura e a compactação das amostras de solo-cal. Contudo, durante a execução de uma obra rodoviária, o tempo transcorrido entre a mistura e compactação dessas amostras dificilmente é inferior ao estabelecido por essa norma. Dessa maneira, assim como NÚÑEZ (1991) e LOVATO (2004), decidiu-se investigar, neste trabalho, o efeito do tempo de espera entre a mistura e a compactação para amostras de solo-cal, correlacionando os resultados obtidos com outros resultados citados na literatura.

NÚÑEZ (1991) observou, para as misturas de solo-cal analisadas por ele, uma redução nos valores da RCS com o aumento do período de espera entre a mistura e compactação das amostras, após essas serem submetidas aos períodos de espera de 0, 1, 2, 3 e 4 horas. O autor mencionou, à época, citações de MITCHELL e HOOPER (1961) que afirmavam que esse fato ocorria em virtude do aumento da floculação com a demora na compactação, ocasionando uma redução no peso específico das misturas.

Já LOVATO (2004) verificou para amostras de solo-cal compactadas 1, 2, 4 e 8 horas após a mistura, que o período de espera de 2 horas proporcionou maior ganho no valor da RCS do solo analisado. Este autor, não soube justificar o motivo da ocorrência desse fato e ressaltou que não haviam sido encontrados resultados similares aos seus nas referências bibliográficas consultadas por ele. Vale ressaltar que a amostra de solo utilizada por este autor foi classificada como um solo A-6, de acordo com AASHTO, e apresentou valores de LL e IP iguais a 39% e 16%, respectivamente. Ou seja, apresentava características físicas semelhantes à amostra de solo Am-A.

As Tabelas 4.23 e 4.24, apresentam os valores encontrados para os ensaios intitulos de não convencionais, compactados na energia Proctor intermediária. Esses ensaios foram realizados para as duas formas de aplicação da cal analisadas.

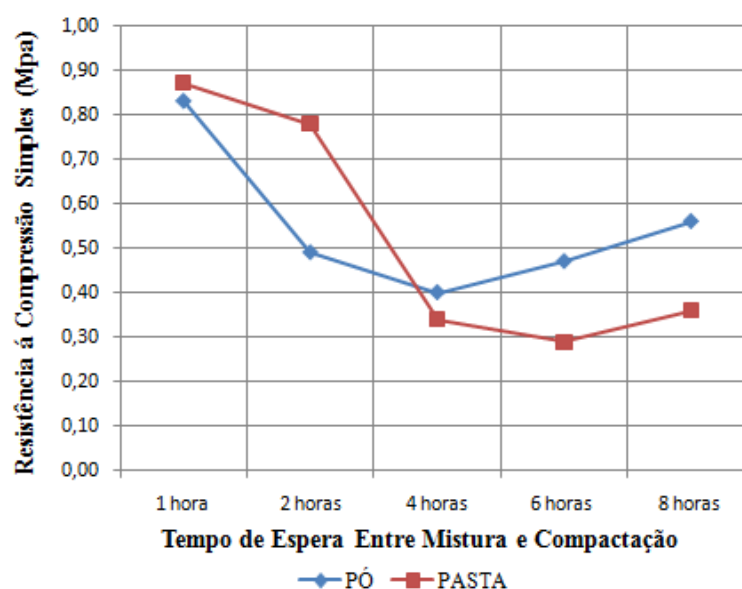
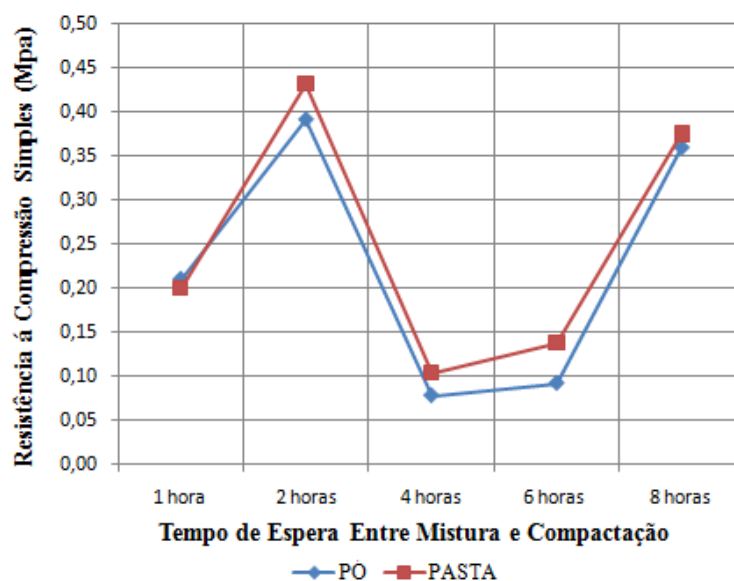
Tabela 4.23: Ensaios não convencionais: Am-A.

TEMPO DE ESPERA ENTRE MISTURA E COMPACTAÇÃO	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO SIMPLES	
	PÓ - (MPa)	PASTA - (MPa)
1 hora	0,83	0,87
2 horas	0,49	0,78
4 horas	0,40	0,34
6 horas	0,47	0,29
8 horas	0,56	0,36

Tabela 4.24: Ensaio não convencionais: Am-B.

TEMPO DE ESPERA ENTRE MISTURA E COMPACTAÇÃO	RESISTÊNCIA Á COMPRESSÃO SIMPLES	
	PÓ - (MPa)	PASTA -(MPa)
1 hora	0,21	0,20
2 horas	0,39	0,43
4 horas	0,08	0,10
6 horas	0,09	0,14
8 horas	0,36	0,38

As Figuras, 4.28 e 4.29, apresentam a evolução dos valores de RCS das misturas de solo-cal, referentes aos resultados apresentados nas Tabelas 4.23 e 4.24.

**Figura 4.28:** Ensaio não convencionais: Am-A.**Figura 4.29:** Ensaio não convencionais: Am-B.

Os resultados encontrados para as misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-A (Tabela 4.22), apresentaram valores mais elevados de RCS com a adoção de um tempo de espera, entre a mistura e a compactação, de 1 hora. Observou-se que a demora no tempo de espera proporcionou uma acentuada redução nos valores de RCS. Contudo, percebeu-se que ocorreu um ganho na resistência das misturas (de 19,15% para a amostra com cal em pó e de 24,14% para a amostra com cal em pasta) quando o tempo de espera até a compactação aumentou de 6 para 8 horas. Esse fato foi inesperado e apresentou um comportamento atípico, quando relacionado aos outros mencionados na literatura pesquisada.

Já os resultados encontrados para as misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-B (Tabela 4.23), apresentaram um maior incremento no valor de RCS após um período de espera, até a compactação, de 2 horas, sendo similar aos resultados encontrados por LOVATO (2004). Esta amostra de solo, assim como a outra analisada, também apresentou um ganho na resistência das misturas de solo-cal quando o tempo de espera, até a compactação, aumentou de 6 para 8 horas. Do mesmo modo como mencionado nos resultados encontrados para a amostra de solo Am-A, não se chegou a uma explicação razoável para o aumento dessa resistência.

Com relação à forma de aplicação do estabilizante percebeu-se, de um modo geral, que as misturas modificadas/estabilizadas com a cal em pasta apresentaram resultados de RCS superiores aos encontrados para as misturas modificadas/estabilizadas com a cal em pó. Contudo, os resultados obtidos para as duas técnicas foram bem parecidos. Já com relação ao tipo de solo tratado, observou-se, assim como nos ensaios convencionais, que os valores de RCS foram bem superiores para as misturas de solo Am-A estabilizadas.

Por fim, vale ressaltar a importância da análise realizada nesse subitem, uma vez que esta aponta a demora mínima, entre a mistura e compactação, para cada amostra investigada, necessária para se evitar perdas de resistência desnecessárias. NÚÑEZ (1991) comenta, porém, que em alguns casos, a demora na compactação das misturas de solo-cal pode proporcionar ganhos de trabalhabilidade de tal magnitude (especialmente em solos argilosos muito plásticos), que compensem uma eventual redução da RCS.

4.9. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

NÚÑEZ (1991) comenta algumas citações de SEDDOM e BHINDI (1983), que afirmam que o surgimento da resistência à tração, em misturas de solo-cal, indica a ocorrência da cimentação pozolânica nas mesmas. Ainda com base nos relatos desses autores, NÚÑEZ (1991) menciona que o valor de 80 kN/m², para resistência à tração direta (RTD), indica a fronteira entre as fases cimentada e modificada para as misturas de solos tratadas pela cal.

Tem-se o conhecimento, porém, através de algumas bibliografias, como a do NATIONAL INSTITUTE FOR TRANSPORT AND ROAD RESEARCH (1986), que o valor da resistência à compressão diametral de um solo é em torno de 1,5 vezes o valor da tração direta do mesmo. Dessa forma, um valor de RTD de 80 kN/m² corresponde a um valor de RTCD de 120 kN/m².

Os ensaios de RTCD, desenvolvidos nesta pesquisa, foram realizados para as amostras de solo naturais (Am-A e Am-B) e para as misturas de solo-cal, tratadas pelas duas formas de aplicação do estabilizante investigadas (cal em pó e cal em pasta). Todas as amostras foram moldadas na energia de compactação intermediária, em um molde cilíndrico do tipo Marshall (com 10 cm de diâmetro e uma altura de 7,5 cm), para umidade ótima de cada mistura.

Nas Tabelas 4.25 e 4.26 são apresentados os resultados RTCD para as duas amostras de solo estabilizadas pela inserção da cal nos teores de 3%, 5% e 7%, submetidas a períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Nenhuma das amostras foi submetida à imersão prévia, em água potável, antes da ruptura, seguindo as especificações da norma adotada.

Tabela 4.25: Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa): Am-A.

TÉCNICA UTILIZADA		CAL EM PÓ			CAL EM PASTA		
TEOR DE CAL		3%	5%	7%	3%	5%	7%
TEMPO DE CURA	0 DIA	0,016	0,014	0,008	0,012	0,010	0,004
	7 DIAS	0,067	0,062	0,070	0,029	0,075	0,088
	14 DIAS	0,287	0,340	0,220	0,191	0,225	0,167
	28 DIAS	0,436	0,550	0,390	0,362	0,436	0,393
	90 DIAS	0,212	0,310	0,400	0,150	0,352	0,371

Tabela 4.26: Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa): Am-B.

TÉCNICA UTILIZADA		CAL EM PÓ			CAL EM PASTA		
TEOR DE CAL		3%	5%	7%	3%	5%	7%
TEMPO DE CURA	0 DIA	0,041	0,028	0,042	0,048	0,055	0,044
	7 DIAS	0,128	0,111	0,075	0,090	0,047	0,044
	14 DIAS	0,156	0,125	0,199	0,098	0,077	0,057
	28 DIAS	0,203	0,236	0,236	0,195	0,186	0,146
	90 DIAS	0,184	0,234	0,244	0,194	0,192	0,176

As duas amostras de solo naturais, Am-A e Am-B, apresentaram valores de RTCD muito baixos, de maneira que a célula de carga foi incapaz de registrar os valores máximos suportados por esses materiais. Em virtude desse fato, decidiu-se utilizar valores de RTCD tendendo a zero, para os dois solos.

Já para as misturas de solo-cal, constatou-se a influência de alguns fatores preponderantes, assim como verificado nos resultados de RCS, para a melhoria da RTCD das amostras analisados, tais como: porcentagem de cal adicionada à amostra de solo, período de cura aos quais os corpos de prova foram submetidos, tipo de técnica de estabilização aplicada (cal em pó e cal em pasta) e tipo de solo utilizado. A influência de cada um desses fatores será discutida nos itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3.

4.9.1. Amostra Am-A

A Figura 4.30 apresenta a evolução dos valores de RTCD, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-A tratadas com a cal, em pó e em pasta. A linha vermelha dessa figura indica o valor de RTCD (0,12 MPa), citados por NÚÑEZ (1991) *apud* SEDDOM e BHINDI (1983), como mencionado anteriormente, que indica a fronteira entre as fases cimentadas e modificadas das misturas de solo-cal.

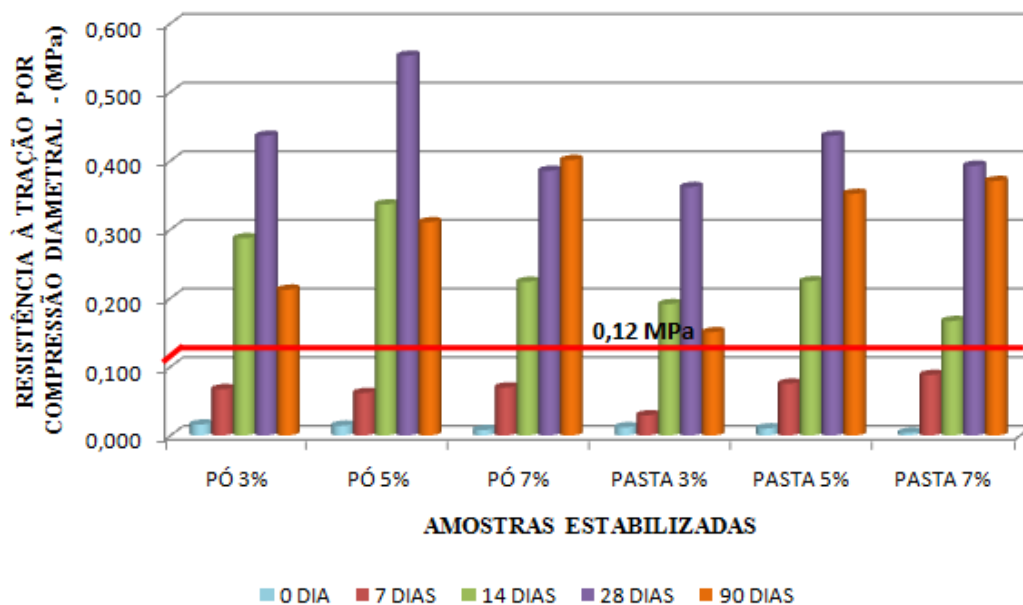


Figura 4.30: Evolução dos valores da RTCD para as misturas de solo Am-A mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.30, verificou-se que as misturas de solo Am-A mais cal (em pó e em pasta), apresentaram valores de RTCD crescentes, com o aumento do período de cura. Contudo, constatou-se que o valor da RTCD tendeu a diminuir em períodos de cura mais elevados (90 dias), para a maioria das misturas ensaiadas (exceto, a de cal em pó 7%).

Além disso, observou-se que para períodos de cura mais baixos (0 - 28 dias), a adição da cal na percentagem de 3% e 5% resultou, muitas vezes, em valores de RTCD mais elevados do que obtidos para as misturas de solo + 7% de cal. Enquanto que para períodos de cura mais elevados (90 dias), foi constatada a ocorrência mais expressiva das reações pozolânicas nas misturas com 7% de cal (em pó e em pasta). Um comportamento similar foi verificado nos resultados de RCS encontrados para essas amostras.

Percebeu-se, contudo, que as amostras ensaiadas com 5% da cal apresentaram incrementos nos valores de RCS, quando submetidas a um período de cura mais longo (90 dias), enquanto que, nos valores de RTCD, encontrados para essas mesmas amostras, foi observada uma redução após os 28 dias de cura. Desconhece-se a razão para ocorrência desse fato, constatando-se apenas a ocorrência menos expressivas das

reações pozolânicas nas amostras de solo-cal (5%) submetidas ao ensaio de RTCD, após um período de cura de 90 dias.

Com relação à forma de aplicação do estabilizante ao solo, verificou-se, de um modo geral, uma melhor aplicabilidade da técnica da cal em pó. Já com relação ao teor da cal adicionado às misturas, verificou-se melhores incrementos de resistência para as amostras ensaiadas com 5% do estabilizante.

Por fim, é importante ressaltar que todas as misturas de solo Am-A estabilizadas apresentaram valores de RTCD superiores a 0,12 MPa (quando ensaiadas após períodos de cura de 14, 28 e 90 dias), indicando, dessa forma, a ocorrência das reações cimentantes nessas amostras.

4.9.2. Amostra Am-B

A Figura 4.31 apresenta a evolução dos valores de RTCD, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-B tratadas com a cal, em pó e em pasta.

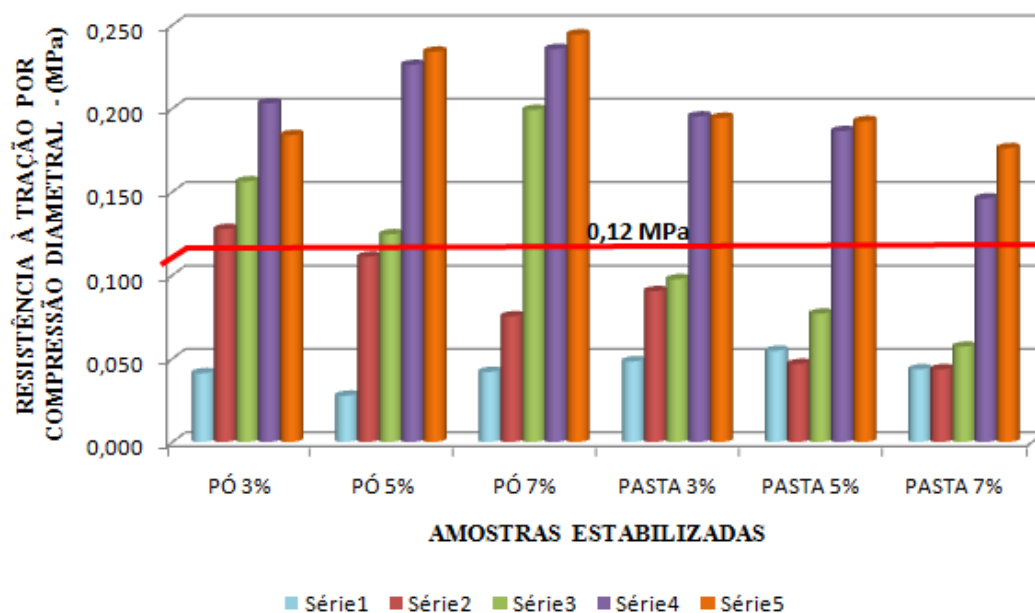


Figura 4.31: Evolução dos valores da RTCD para as misturas de solo Am-B mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos valores apresentados na Figura 4.31, verificou-se que as misturas de solo Am-B mais cal apresentaram, de um modo geral, um crescimento nos valores de

RTCD com o aumento do período de cura. Esse fato foi constatado para as duas técnicas de aplicação da cal analisadas (em pó e em pasta) e para todos os teores de cal testados (3%, 5% e 7%).

Contudo, constatou-se que para períodos cura mais baixos (0 – 28 dias), a adição da cal (em pó e em pasta) em menor porcentagem (3%), proporcionou maiores valores de RTCD quando comparados aos encontrados para as misturas de solo ensaiadas com maiores porcentagens do estabilizante (5% e 7%), enquanto que, para períodos de cura mais altos (90 dias), a adição de cal em porcentagem maior (5% e 7%) proporcionou resultados similares ou melhores de RTCD quando comparados com os obtidos para as misturas ensaiadas com 3% desse aditivo.

Com relação à forma de aplicação do estabilizante ao solo, verificou-se, de um modo geral, uma melhor aplicabilidade da técnica da cal em pó. Observou-se ainda, que as misturas ensaiadas com essa técnica apresentaram melhores incrementos de resistência quando foram tratadas com 7% do estabilizante. Já as misturas de solo-cal (pasta) apresentaram melhores resultados de RTCD quando ensaiadas com 5% de cal.

Por fim, vale ressaltar que, assim como verificado para as misturas de solo Am-A estabilizadas, todas as amostras de solo Am-B mais cal (em pó e em pasta) alcançaram um valor de RTCD superior a 0,12 MPa em pelo menos um dos períodos de cura analisado. Esse fato mostra a ocorrência das reações pozolânicas (cimentantes) nesse material após a inserção da cal. Contudo, nota-se que estas ocorrem de maneira bem menos expressiva do que o verificado para as misturas de solo Am-A mais cal.

Deve ser levado em consideração, porém, o fato das amostras de solo Am-B mais cal (em pó e em pasta) não ter apresentado um bom comportamento à luz dos resultados de RCS. Acredita-se que se estas amostras fossem submetidas a uma imersão prévia de 24 horas em água, antes da ruptura, nos ensaios de RTCD teriam sido observados valores de resistência bem inferiores aos expostos na Tabela 4.26.

4.9.3. Influência do Tipo de Solo Utilizado

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 4.30 e 4.31, verificou-se que as amostras de solo Am-A mais cal tiveram ganhos de resistência bem mais acentuados

que os verificados para as amostras de solo Am-B mais cal. Esse fato ocorreu, possivelmente, devido a quantidade de pozolana encontrada em uma das amostras (Am-A) ser superior a quantidade presente na outra (Am-B), assim como citado anteriormente no subitem 4.8.1.3.

4.9.4. Influência entre RCS e RTCD para as Misturas de Solo-Cal Analisadas

As Figuras 4.32 e 4.33 apresentam a relação entre a RTCD e a RCS das misturas de solo Am-A mais cal (em pó e em pasta) e das misturas de solo Am-B mais cal (em pó e em pasta), respectivamente. Como se pode notar, a correlação encontrada entre as variáveis investigadas, após a adoção do modelo linear, não gerou valores elevados de R^2 . Pelo contrário, apresentou valores considerados baixos, principalmente para as amostras de solo Am-B estabilizadas. Esse fato indica que o modelo adotado não tem uma boa representabilidade para explicar a relação entre os valores de RTCD e RCS das amostras. Contudo, o mesmo foi utilizado a fim de comparar os resultados dessa pesquisa com os apresentados em outras bibliografias.

Vale destacar os trabalhos desenvolvidos por LOVATO (2004) e THOMPSON (1965). O primeiro autor encontrou uma relação RTCD/RCS igual a 0,128 (para um R^2 igual a 0,8852), após a adoção do modelo linear. Já segundo autor, citado por NÚÑEZ (1991), encontrou uma relação de RTCD/RCS de aproximadamente 0,1. Com base nessas bibliografias e em outras encontradas na literatura, verificou-se uma tendência dos valores de RTCD apresentarem, em média, 10 a 15 % dos valores de RCS para as misturas de solo-cal.

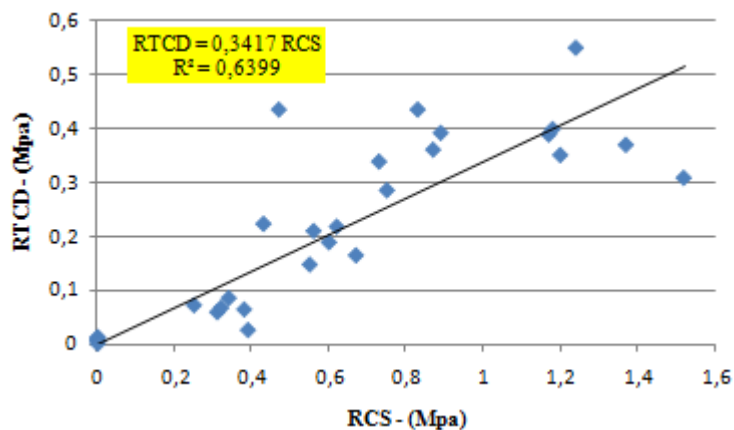


Figura 4.32: Relação entre RTCD e RCS para as amostras de solo Am-A mais cal.

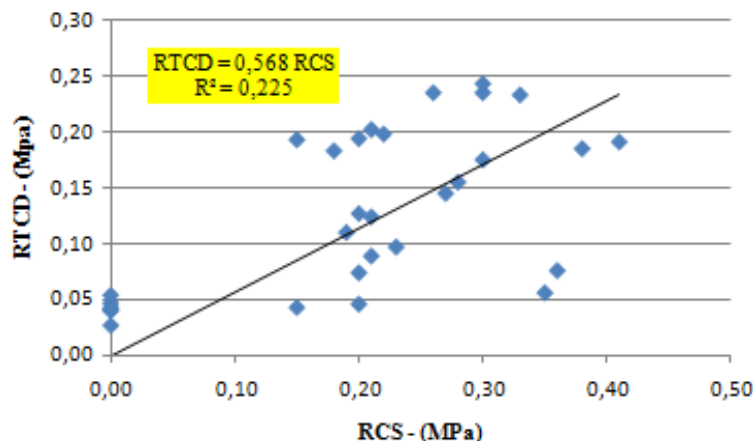


Figura 4.33: Relação entre RTCD e RCS para as amostras de solo Am-B mais cal.

Verificou-se, com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33, que a correlação entre os valores de RTCD e RCS, obtidos nesta pesquisa, apresentou-se bem diferente das encontradas na literatura. Contudo, deve-se ressaltar que as amostras submetidas ao ensaio de RTCD não foram imersas antes da ruptura, diferentemente do ocorrido para as amostras submetidas aos ensaios de RCS. Acredita-se que se os mesmos critérios tivessem sido adotados, para ambos os ensaios, a relação entre os resultados encontrados nestes seria mais próxima dos valores encontrados nas bibliografias citadas anteriormente (LOVATO, 2004 e THOMPSON, 1965).

Decidiu-se, porém, realizar os ensaios de RTCD e RCS em condições de ruptura distintas, devido os critérios estabelecidos nas normas adotadas. Além disso, verificou-se que uma possível imersão durante os ensaios de RTCD iriam proporcionar resultados de resistência muito baixos, principalmente para as amostras de solo Am-B mais cal (em pó e em pasta).

Com relação à forma de aplicação da cal, constatou-se uma melhor correlação (R^2 em torno de 0,6 a 0,7), entre os valores de RTCD e RCS, para as amostras ensaiadas com cal em pó. Já para as misturas ensaiadas com cal em pasta encontrou-se resultados de R^2 tendendo a zero. Dessa forma, decidiu-se fazer uma única análise para ambas as técnicas.

4.10. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O conhecimento do comportamento resiliente dos solos empregados em camadas de pavimentos rodoviários é muito importante para a realização de uma análise

estrutural eficaz, feita, muitas vezes, através de métodos de dimensionamento mecânicos de sistemas de múltiplas camadas. Dessa maneira, torna-se essencial, no estudo do processo de estabilização de um solo, uma análise criteriosa do comportamento resiliente das amostras de solo natural e das amostras de solo estabilizado.

A análise da deformação elástica ou recuperável dos solos deve ser realizada de tal forma que possibilite a obtenção de resultados similares aos encontrados no campo. Para que isso ocorra, deve-se adotar um modelo que descreva com fidelidade o comportamento do solo analisado.

Neste trabalho, como mencionado no subitem 3.4.10, foram utilizados quatro modelos distintos na análise resiliente dos solos naturais, Am-A e Am-B, e das misturas estabilizadas quimicamente pela cal. Inicialmente, foram testados três modelos clássicos que representam os valores dos módulos de resiliência em função das tensões aplicadas aos materiais, ou seja, em função da tensão desvio (σ_d), da tensão confinante (σ_3) e da soma das três tensão principais ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), conforme apresentado nas equações 4.16, 4.17 e 4.18 (descritas anteriormente no subitem 3.4.10).

$$M_R = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (4.16)$$

$$M_R = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (4.17)$$

$$M_R = k_1 \times \theta^{k_2} \quad (4.18)$$

Onde:

M_R - Módulo de Resiliência (MPa);

σ_d - tensão desvio (MPa);

σ_3 - tensão confinante (MPa);

θ - primeiro invariante de tensão (MPa);

k_1, k_2 - parâmetros de modelagem determinados experimentalmente.

Segundo SOUZA JUNIOR (2005), o modelo que relaciona o valor de M_R ao σ_d é mais utilizado para descrever o comportamento de solos coesivos, enquanto que, o modelo que utiliza σ_3 na correlação com os valores de M_R , é mais utilizado no comportamento de solos granulares. O autor faz menção ainda, a alguns relatos de HAU

(2003), que afirmam que o modelo utilizando o primeiro invariante de tensão (θ) é o mais utilizado na análise das deformações permanentes de materiais granulares.

Os resultados encontrados para as constantes determinadas experimentalmente (valores de k) e para os coeficientes de correlação (R^2), entre os valores de MR e os modelos clássicos adotados para as amostras de solos naturais (Am-A e Am-B) e suas misturas modificadas/estabilizadas pela cal, são apresentados nas Tabelas 4.27 e 4.28.

Tabela 4.27: Resultados obtidos com a aplicação dos modelos resilientes clássicos para a amostra de solo Am-A.

Amostra	Cura	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$		
		K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²
Solo Natural (Am-A)	0	136,3	-0,13	0,3480	159,80	-0,040	0,030	162,3	-0,09	0,13
Solo-Cal Pó 3% (Am-A)	0	424,1	0,248	0,552	769,4	0,405	0,966	385,2	0,369	0,859
	7	1071,0	0,487	0,798	2181,0	0,634	0,892	786,8	0,628	0,937
	14	1258,0	0,342	0,709	2227,0	0,470	0,883	1032,0	0,455	0,889
	28	1094,0	0,247	0,487	1853,0	0,379	0,758	978,4	0,353	0,705
	90	1014,0	0,467	0,833	2025,0	0,611	0,940	756,5	0,604	0,984
Solo-Cal Pó 5% (Am-A)	0	337,0	0,181	0,362	570,1	0,327	0,776	321,8	0,288	0,646
	7	1005,0	0,286	0,524	1863,0	0,442	0,826	884,3	0,410	0,764
	14	1488,0	0,414	0,749	3065,0	0,580	0,970	1180,0	0,558	0,962
	28	583,9	0,147	0,118	951,3	0,287	0,297	572,5	0,247	0,237
	90	967,0	0,549	0,839	2107,0	0,707	0,917	678,9	0,703	0,972
Solo-Cal Pó 7% (Am-A)	0	480,7	0,293	0,580	941,1	0,467	0,969	425,5	0,429	0,876
	7	819,1	0,186	0,385	1299,0	0,308	0,698	765,1	0,279	0,613
	14	1397,0	0,378	0,740	2515,0	0,505	0,868	1109,0	0,495	0,894
	28	1474,0	0,436	0,719	3171,0	0,613	0,937	1156,0	0,589	0,926
	90	1208,0	0,529	0,734	2957,0	0,731	0,926	893,0	0,707	0,928
Solo-Cal Pasta 3% (Am-A)	0	465,5	0,273	0,552	894,9	0,444	0,966	418,8	0,405	0,86
	7	819,0	0,353	0,97	1050,0	0,366	0,688	610,2	0,399	0,876
	14	737,2	0,348	0,809	1075,0	0,407	0,730	571,3	0,422	0,838
	28	697,4	0,172	0,116	1180,0	0,320	0,266	672,7	0,280	0,217
	90	1138,0	0,383	0,839	1910,0	0,484	0,883	1,67	0,785	0,872
Solo-Cal Pasta 5% (Am-A)	0	276,8	0,155	0,665	365,5	0,219	0,883	254,2	0,210	0,865
	7	1123,0	0,493	0,791	2059,0	0,602	0,778	797,3	0,612	0,861
	14	1699,0	0,547	0,822	3793,0	0,713	0,922	1202,0	0,705	0,967
	28	1661,0	0,687	0,800	4770,0	0,912	0,931	1090,0	0,897	0,963
	90	1563,0	0,524	0,942	2610,0	0,594	0,798	1048,0	0,622	0,939
Solo-Cal Pasta 7% (Am-A)	0	258,7	0,145	0,277	450,2	0,308	0,675	258,3	0,259	0,510
	7	729,9	0,313	0,877	874,5	0,311	0,570	556,7	0,346	0,758
	14	1677,0	0,626	0,822	4232,0	0,819	0,927	1131,0	0,809	0,970
	28	1281,0	0,363	0,535	2738,0	0,553	0,818	1081,0	0,516	0,763
	90	1213,0	0,446	0,736	2583,0	0,617	0,928	939,8	0,597	0,931

Tabela 4.28: Resultados obtidos com a aplicação dos modelos resilientes clássicos para a amostra de solo Am-B.

Amostra	Cura (dias)	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$		
		K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²
Solo Natural (Am-B)	0	179,8	-0,100	0,1790	247,6	0,032	0,012	216,6	-0,030	0,013
Solo-Cal Pó 3% (Am-B)	0	480,3	0,175	0,576	708,6	0,274	0,934	445,1	0,253	0,852
	7	886,8	0,350	0,685	1666,0	0,498	0,911	732,7	0,477	0,895
	14	357,8	0,223	0,471	634,2	0,376	0,887	331,7	0,339	0,772
	28	1242,0	0,568	0,765	3214,0	0,781	0,956	895,0	0,757	0,961
	90	690,0	0,453	0,749	1435,0	0,614	0,910	527,7	0,599	0,926
Solo-Cal Pó 5% (Am-B)	0	504,8	0,197	0,496	845,4	0,336	0,953	473,2	0,301	0,821
	7	927,3	0,396	0,757	1829,0	0,551	0,966	740,8	0,531	0,964
	14	1001,0	0,419	0,762	2052,0	0,582	0,970	788,9	0,562	0,968
	28	973,9	0,432	0,667	2300,0	0,643	0,971	786,4	0,605	0,923
	90	1140,0	0,631	0,823	3623,0	0,822	0,921	965,9	0,813	0,967
Solo-Cal Pó 7% (Am-B)	0	425,8	0,190	0,507	675,0	0,311	0,895	395,8	0,283	0,791
	7	954,1	0,426	0,817	1813,0	0,561	0,936	732,1	0,553	0,973
	14	1077,0	0,450	0,726	2377,0	0,633	0,947	838,8	0,608	0,937
	28	1283,0	0,481	0,679	3310,0	0,712	0,980	1008,0	0,672	0,934
	90	1574,0	0,608	0,774	4373,0	0,838	0,969	1108,0	0,812	0,974
Solo-Cal Pasta 3% (Am-B)	0	408,9	0,228	0,585	675,4	0,356	0,937	369,6	0,329	0,859
	7	378,5	0,263	0,556	698,7	0,422	0,947	418,8	0,405	0,860
	14	830,0	0,421	0,745	1744,0	0,593	0,974	657,4	0,569	0,963
	28	1071,0	0,557	0,758	2632,0	0,755	0,918	769,8	0,736	0,934
	90	1177,0	0,490	0,776	2498,0	0,651	0,902	1,670	0,785	0,872
Solo-Cal Pasta 5% (Am-B)	0	286,4	0,162	0,494	438,6	0,277	0,952	271,5	0,249	0,819
	7	454,8	0,313	0,696	823,9	0,456	0,969	386,3	0,432	0,934
	14	930,2	0,417	0,689	2093,0	0,613	0,983	753,4	0,580	0,941
	28	1035,0	0,370	0,648	2180,0	0,553	0,953	863,9	0,520	0,902
	90	1056,0	0,545	0,762	2690,0	0,758	0,972	775,4	0,732	0,971
Solo-Cal Pasta 7% (Am-B)	0	299,4	0,152	0,515	430,6	0,247	0,896	282,0	0,225	0,796
	7	459,1	0,264	0,613	806,8	0,406	0,957	407,1	0,377	0,887
	14	863,8	0,410	0,772	1723,0	0,566	0,970	862,1	0,548	0,973
	28	1068,0	0,505	0,804	2310,0	0,669	0,931	782,5	0,657	0,964
	90	1118,0	0,455	0,705	2501,0	0,641	0,924	870,0	0,616	0,913

Observando-se os resultados apresentados nessas Tabelas, percebeu-se que as amostras de solo naturais, Am-A e Am-B, apresentaram valores muito baixos de R² para os 3 modelos testados inicialmente.

Já as misturas de solo-cal, ensaiadas com as duas amostras de solo (Am-A e Am-B), apresentaram melhores valores de R² quando foram utilizados os modelos em função da tensão confinante e do primeiro invariante de tensão. Esses modelos são utilizados para solos tipicamente granulares. Dessa forma, pôde-se observar que a

adição da cal aos solos modificou a granulometria destes, de tal modo, a torná-los mais graúdos e friáveis. De acordo com HERRIN e MITCHELL (1968), esse fenômeno ocorre nas misturas de solo-cal devido à mudança física nos grãos finos do solo, em virtude da aglomeração/floculação das partículas de argila.

Por fim, notou-se uma grande variação entre os coeficientes de correlação de um modelo para outro, além de se constatar que nenhum dos 3 modelos clássicos utilizados, inicialmente, representou de forma adequada o comportamento resiliente de todas as amostras investigadas. Devido a isso, decidiu-se analisar o comportamento resiliente dessas amostras a partir da utilização do modelo composto, que relaciona os valores de MR em função de duas tensões aplicadas ao corpo-de-prova, como apresentado mais a frente.

4.10.1. Modelo Composto

SOUZA JUNIOR (2005) fez menção a alguns relatos de FERREIRA (2002), comentando que muitas vezes não é recomendável, na análise do comportamento resiliente de um solo, que se determine o valor de MR apenas em função de uma das tensões aplicadas ao corpo-de-prova. O modelo composto, segundo esse autor, foi estabelecido por MACEDO (1996) e considera a influência conjunta das tensões confinante e desvio no valor do módulo para qualquer tipo de material. A equação 4.19, citada anteriormente no subitem 3.4.10, apresenta a correlação entre o valor de MR de um material em função das tensões confinante e desvio, aplicados no mesmo durante a realização dos ensaios triaxiais dinâmicos, conforme adotado nesse modelo.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (4.19)$$

Os resultados obtidos com a aplicação do modelo composto, para as amostras dos solos naturais e das misturas de solo-cal, analisadas nessa pesquisa, foram gerados a partir da utilização do programa Lab Fit Ajuste de Curvas, desenvolvido para o tratamento e análise de dados experimentais. Esses resultados encontram-se expostos nas Tabelas 4.29 e 4.30.

Tabela 4.29: Resultados obtidos com a aplicação do modelo resiliente composto para a amostra de solo Am-A.

AMOSTRA	MODELO COMPOSTO	CURA (EM DIAS)				
		0	7	14	28	90
Solo Natural (Am-A)	K1	179,0	-	-	-	-
	K2	0,229	-	-	-	-
	K3	-0,300	-	-	-	-
	R ²	0,6923	-	-	-	-
Solo-Cal Pó (3%)	K1	817,0	2420,0	2410,0	2000,0	1830,0
	K2	0,467	0,463	0,394	0,384	0,397
	K3	-0,0516	0,273	0,133	0,0283	0,227
	R ²	0,9774	0,9658	0,9206	0,793	0,9854
Solo-Cal Pó (5%)	K1	617,0	2060,0	3130,0	1190,0	2100,0
	K2	0,399	0,434	0,5056	0,366	0,465
	K3	-0,0569	0,0555	0,107	-0,0128	0,315
	R ²	0,8161	0,8256	0,9847	0,3423	0,9829
Solo-Cal Pó (7%)	K1	1040,0	1590,0	2830,0	3630,0	3400,0
	K2	0,538	0,395	0,406	0,591	0,589
	K3	-0,0452	-0,0181	0,184	0,0945	0,256
	R ²	0,9770	0,7700	0,9356	0,9659	0,9670
Solo-Cal Pasta (3%)	K1	934,0	903,0	1080,0	1700,0	1900,0
	K2	0,507	0,0364	0,148	0,410	0,341
	K3	-0,0608	0,3519	0,335	0,0334	0,181
	R ²	0,9800	0,9824	0,9078	0,3192	0,9616
Solo-Cal Pasta (5%)	K1	354,0	2230,0	4240,0	1690,0	2540,0
	K2	0,198	0,337	0,563	0,00259	0,269
	K3	0,0118	0,382	0,252	0,673	0,406
	R ²	0,9034	0,9463	0,9826	0,8289	0,9776
Solo-Cal Pasta (7%)	K1	509,0	791,0	4650,0	3520,0	2840,0
	K2	0,459	-0,0229	0,605	0,547	0,512
	K3	-0,138	0,381	0,328	0,128	0,183
	R ²	0,7771	0,9267	0,9889	0,8720	0,9564

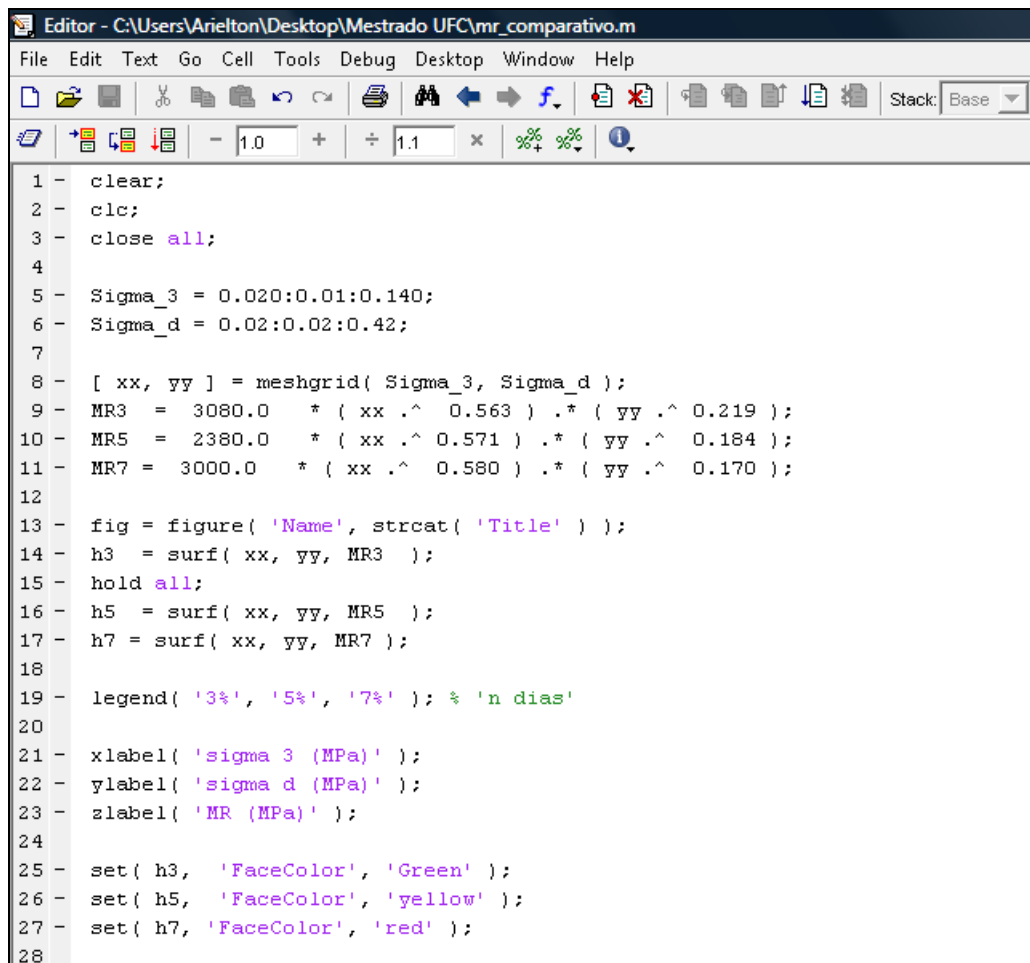
Tabela 4.30: Resultados obtidos com a aplicação do modelo resiliente composto para a amostra de solo Am-B.

AMOSTRA	MODELO COMPOSTO	CURA (EM DIAS)				
		0	7	14	28	90
Solo Natural (Am-A)	K1	309,0	-	-	-	-
	K2	0,395	-	-	-	-
	K3	-0,362	-	-	-	-
	R ²	0,8035	-	-	-	-
Solo-Cal Pó (3%)	K1	732,0	1780,0	725,0	3510,0	1760,0
	K2	0,316	0,423	0,479	0,670	0,539
	K3	-0,0378	0,128	-0,0686	0,190	0,197
	R ²	0,9372	0,9386	0,9218	0,9856	0,9584
Solo-Cal Pó (5%)	K1	926,0	1840,0	2070,0	2470,0	4030,0
	K2	0,446	0,471	0,509	0,623	0,607
	K3	-0,0985	0,105	0,0998	0,0615	0,335
	R ²	0,9818	0,9844	0,9866	0,9787	0,9835
Solo-Cal Pó (7%)	K1	699,0	1820,0	2610,0	3600,0	4750,0
	K2	0,395	0,417	0,533	0,715	0,701
	K3	-0,0910	0,189	0,176	-0,0375	0,223
	R ²	0,9079	0,9792	0,9738	0,9904	0,9890
Solo-Cal Pasta (3%)	K1	700,0	745,0	1770,0	3360,0	3080,0
	K2	0,408	0,504	0,506	0,648	0,563
	K3	-0,050	-0,0741	0,119	0,265	0,219
	R ²	0,9384	0,9591	0,9871	0,9703	0,9552

Solo-Cal	K1	471,0	862,0	2190,0	2280,0	2380,0
	K2	0,365	0,456	0,601	0,508	0,571
Pasta (5%)	K3	-0,0789	0,0211	0,0389	0,0804	0,184
	R ²	0,9799	0,9785	0,9874	0,9635	0,9866
Solo-Cal	K1	440,0	851,0	1750,0	2490,0	3000,0
	K2	0,304	0,433	0,494	0,552	0,580
Pasta (7%)	K3	-0,0627	-0,0107	0,102	0,188	0,170
	R ²	0,9076	0,9639	0,9902	0,9844	0,9647

Analisando-se os valores de R² apresentados nas Tabelas 4.29 e 4.30, referentes ao modelo composto, e comparando estes com os valores de R² obtidos com a utilização dos três modelos clássicos, citados anteriormente, percebeu-se a grande melhoria nas correlações entre as variáveis investigadas (MR, σ_3 , σ_d), em todas as situações verificadas. Devido a isso, decidiu-se analisar o comportamento resiliente das amostras de solo naturais (Am-A e Am-B) e das misturas de solo-cal, a partir da aplicação do modelo composto, verificando-se a influência da adição crescente da cal, em 3 teores pré-determinados (3%, 5% e 7%), e o efeito nos valores de MR, dessas misturas, com a variação do período de cura (0, 7, 14, 28 e 90 dias).

Para isto, utilizou-se o programa MatLab, que possibilitou a geração de gráficos em 3D das superfícies referentes ao comportamento resiliente das amostras analisadas. A visualização dessas superfícies foi feita a partir da elaboração de um algoritmo, apresentado na Figura 4.34, que foi executado nesse programa para cada mistura realizada.



```

1 - clear;
2 - clc;
3 - close all;
4
5 - Sigma_3 = 0.020:0.01:0.140;
6 - Sigma_d = 0.02:0.02:0.42;
7
8 - [ xx, yy ] = meshgrid( Sigma_3, Sigma_d );
9 - MR3 = 3080.0 * ( xx .^ 0.563 ) .* ( yy .^ 0.219 );
10 - MR5 = 2380.0 * ( xx .^ 0.571 ) .* ( yy .^ 0.184 );
11 - MR7 = 3000.0 * ( xx .^ 0.580 ) .* ( yy .^ 0.170 );
12
13 - fig = figure( 'Name', strcat( 'Title' ) );
14 - h3 = surf( xx, yy, MR3 );
15 - hold all;
16 - h5 = surf( xx, yy, MR5 );
17 - h7 = surf( xx, yy, MR7 );
18
19 - legend( '3%', '5%', '7%' ); % 'n dias'
20
21 - xlabel( 'sigma 3 (MPa)' );
22 - ylabel( 'sigma d (MPa)' );
23 - zlabel( 'MR (MPa)' );
24
25 - set( h3, 'FaceColor', 'Green' );
26 - set( h5, 'FaceColor', 'yellow' );
27 - set( h7, 'FaceColor', 'red' );
28

```

Figura 4.34: Algoritmo executado no programa MatLab para geração de gráficos em 3D do comportamento resiliente das amostras naturais de solo e misturas de solo-cal, analisadas neste trabalho.

Os gráficos gerados pelo software MatLab apresentaram 3 eixos principais, sendo o primeiro deles referente aos valores de MR das amostras (eixo z), o segundo referente a tensão confinante aplicada durante os ensaios triaxiais dinâmicos (eixo x) e o terceiro referente a tensão desvio (eixo y), também aplicada durante a realização dos ensaios citados anteriormente. Esses gráficos foram elaborados, inicialmente, a fim de se verificar a influência do teor da cal, para um dado tempo de cura, no comportamento resiliente das misturas estabilizadas. Em seguida, foram elaborados gráficos onde se variou o tempo de cura e manteve-se constante o teor da cal adicionado à mistura.

4.10.1.1. Solo Am-A

A superfície referente ao comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-A, gerada a partir da utilização do modelo composto, encontra-se exposta na Figura 4.35. Analisando-se o comportamento dessa superfície, observou-se que o comportamento resiliente da amostra de solo Am-A foi bastante susceptível às variações da tensão desvio e sofreu pouca influência da tensão de confinamento.

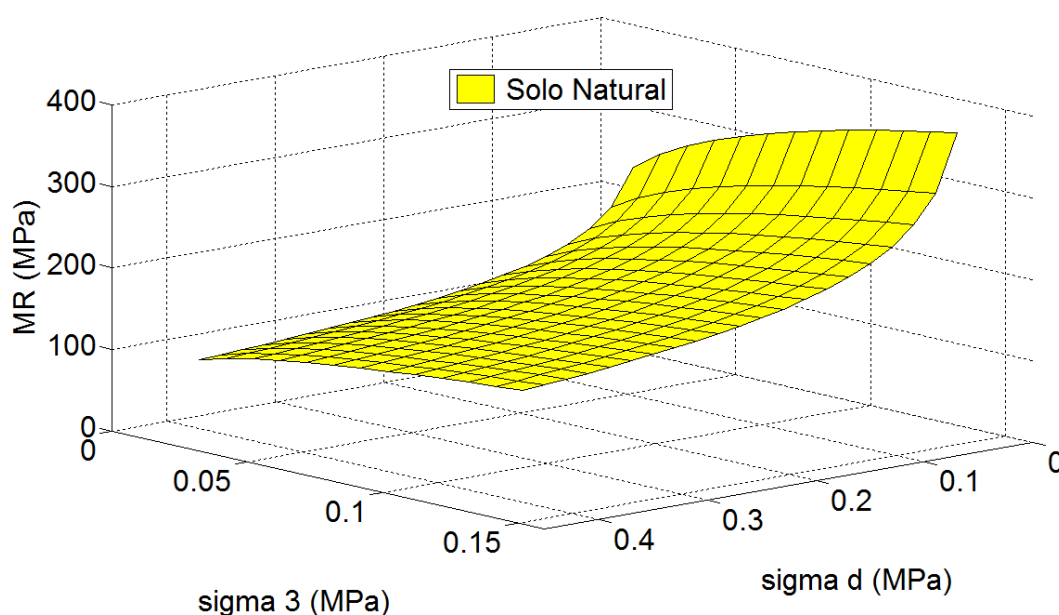


Figura 4.35: Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-A (modelo composto).

Com relação à classificação resiliente de solos do DNIT (2006), mencionada anteriormente, no subitem 3.4.10, verificou-se que a amostra de solo Am-A, após ser analisada como um solo tipicamente argiloso, apresentou um comportamento de um material regular a bom em relação às suas características resilientes, conforme apresentado na Figura 4.36.

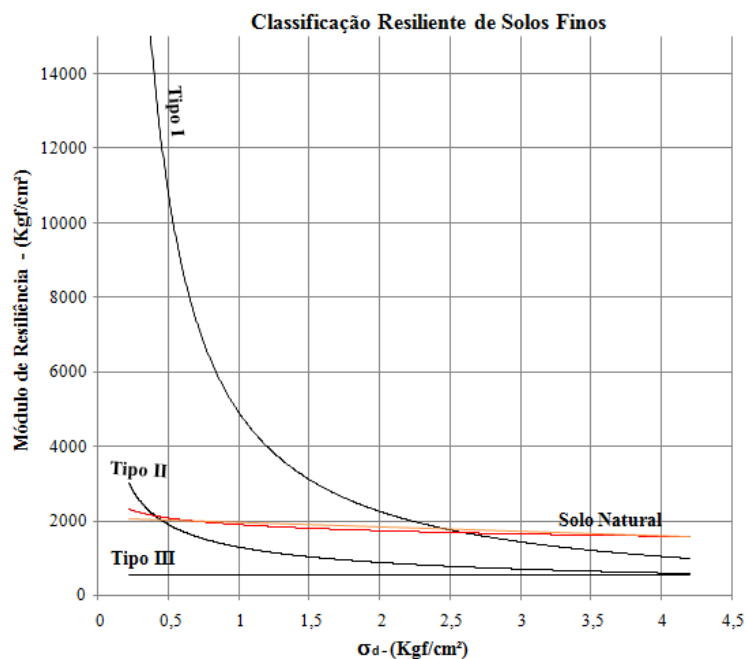


Figura 4.36: Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-A (classificação do DNIT, 2006).

De acordo com a classificação resiliente, a curva tipo II representa os solos que apresentam um comportamento regular quanto à resiliência e que podem ser utilizados como materiais de subleito e reforço de subleito. Já a curva tipo I representa os materiais que apresentam comportamento bom, no que se refere ao módulo de resiliência, e que podem ser utilizados em camadas de subleito, reforço de subleito e subbase.

Foram gerados, em seguida, utilizando-se os resultados encontrados após aplicação do modelo composto, gráficos comparativos entre o comportamento resiliente da amostra natural do solo Am-A e de suas misturas estabilizadas com cal, ensaiadas logo após a moldagem dos corpos-de-prova.

As figuras, 4.37 e 4.38, apresentam, respectivamente, os gráficos gerados com as misturas ensaiadas com cal pó e cal em pasta.

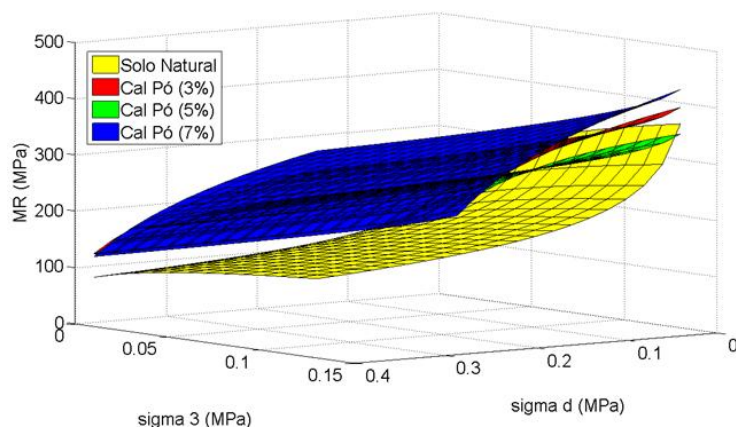


Figura 4.37: Comportamento resiliente do solo Am-A e das misturas de solo Am-A mais cal em pó, ensaiadas após a moldagem dos CPs.

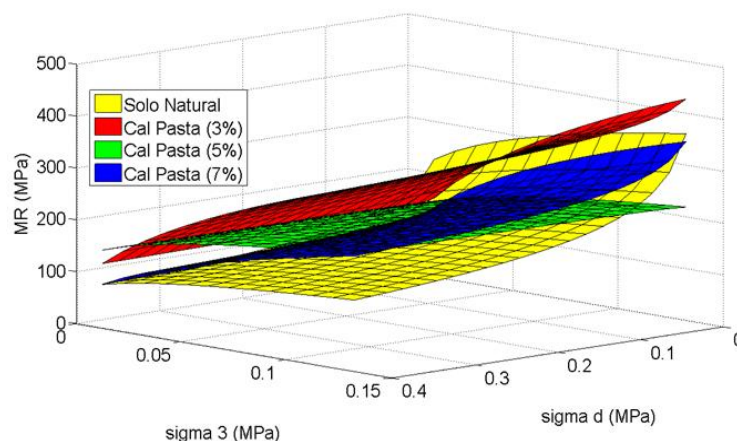
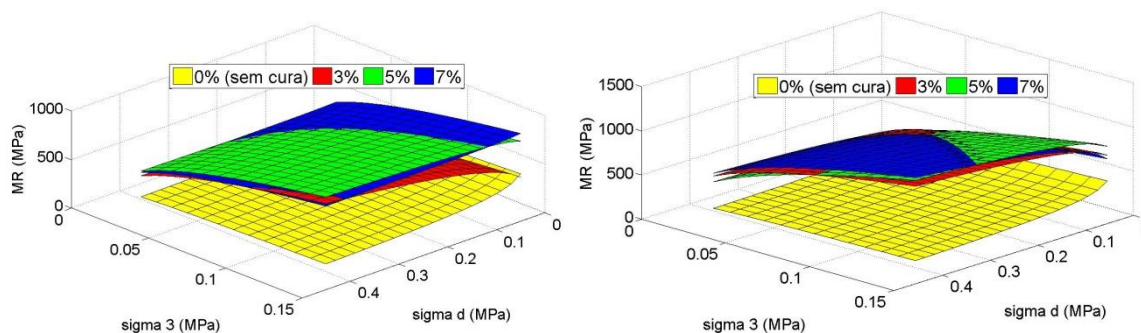


Figura 4.38: Comportamento resiliente do solo Am-A e das misturas de solo Am-A mais cal em pasta, ensaiadas após a moldagem dos CPs.

Percebeu-se, analisando essas figuras, que as reações da fase rápida, ocorridas logo após a adição da cal ao solo, possibilitaram uma melhoria no comportamento resiliente das misturas estabilizadas.

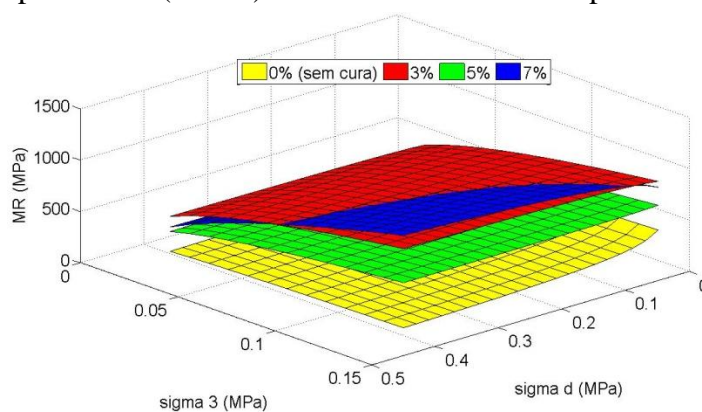
Para as misturas de solo Am-A mais cal, submetidas a um período de cura após a moldagem dos CPs, foram gerados, inicialmente, os gráficos apresentados nas Figuras 4.39 e 4.40, onde foi avaliado o comportamento das misturas em função da variação do teor da cal, para um dado período de cura. Em cada uma dessas figuras foram apresentados quatro gráficos: dois referentes aos CPs submetidos a uma cura de 7 dias (Figuras 4.39a e 4.40a), dois referentes aos CPs submetidos a uma cura de 14 dias (Figuras 4.39b e 4.40b), dois referentes aos CPs submetidos a uma cura de 28 dias

(Figuras 4.39c e 4.40c) e dois referentes aos CPs submetidos a uma cura de 90 dias (Figuras 4.39d e 4.40d). Os gráficos apresentados na Figura 4.39 expõem os resultados obtidos com as amostras ensaiadas com cal em pó, enquanto os gráficos apresentados na Figura 4.40 expõem os resultados obtidos com as amostras ensaiadas com cal em pasta.

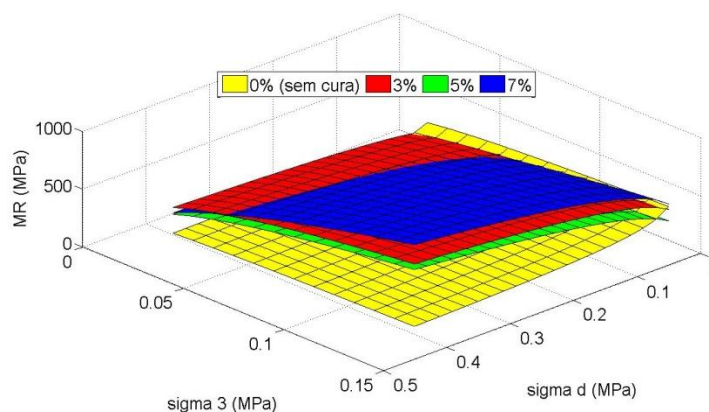


a. Cal em pó - 7 dias (Am-A).

b. Cal em pó - 14 dias (Am-A).

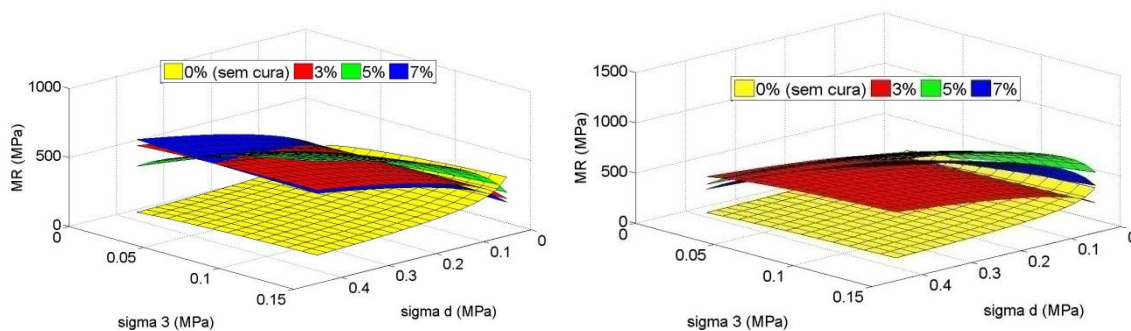


c. Cal em pó - 28 dias (Am-A).



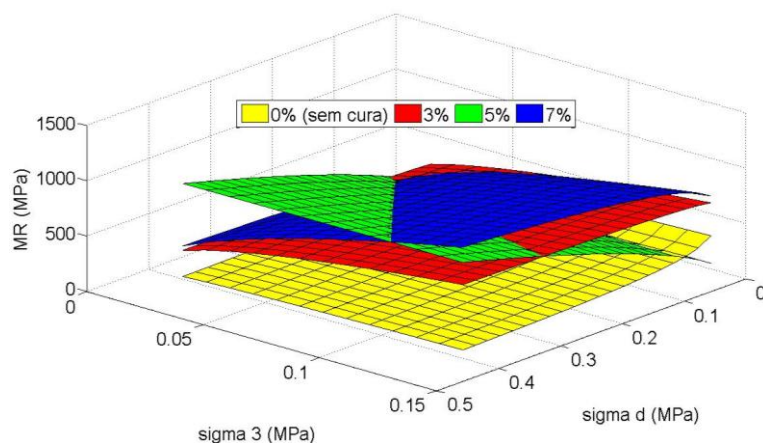
d. Cal em pó - 90 dias (Am-A).

Figura 4.39: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pó após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.

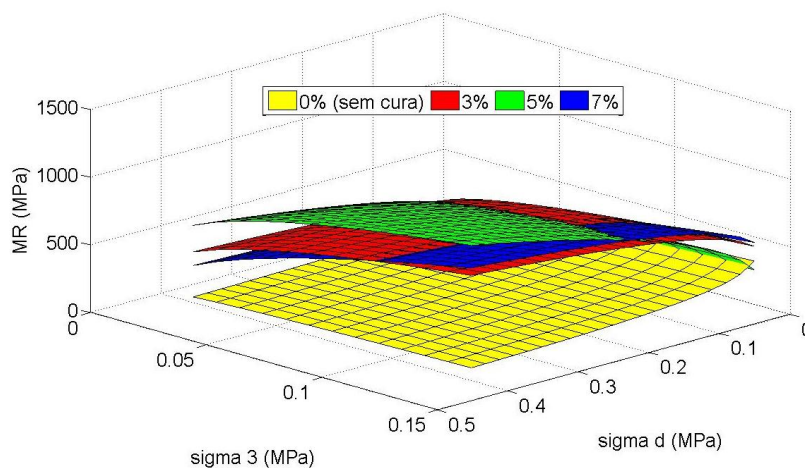


a. Cal em pasta - 7 dias (Am-A).

b. Cal em pasta - 14 dias (Am-A).



c. Cal em pasta - 28 dias (Am-A).



d. Cal em pasta - 90 dias (Am-A).

Figura 4.40: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pasta após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.

Analisando-se os gráficos das Figuras 4.39 e 4.40 e comparando-os com gráfico apresentado na Figura 4.35, percebeu-se que, após a adição da cal ao solo

(Am-A), houve um aumento significativo nos valores de MR das misturas estabilizadas. Verificou-se ainda que, de um modo geral, as misturas de solo-cal, diferentemente da amostra natural de solo Am-A, apresentaram seus valores de MR susceptíveis tanto a variação da tensão confinante como da tensão desvio. Esse fato só não foi observado para as misturas de solo-cal ensaiadas imediatamente após a moldagem, onde foi constatada uma maior influência nos valores de MR em função da variação da tensão desvio. Isso ocorreu, possivelmente, devido às reações pozolânicas não terem se processado ainda devido ao curto período entre a moldagem e execução dos ensaios.

Com relação à variação do teor da cal nas amostras, verificou-se que as misturas de solo Am-A mais 3% de cal (em pó e em pasta) apresentaram maiores valores de MR que as misturas com 5% e 7% de cal (em pó e em pasta), quando ensaiadas após a moldagem (sem cura) dos CPs. Contudo, para períodos de cura mais elevados (7 – 90 dias) as misturas estabilizadas com 5% e 7% de cal apresentaram, de um modo geral, um comportamento resiliente melhor que as misturas com 3% de cal, para pares de tensões mais elevados. Isso mostra que as misturas mais ricas (com 5% e 7% de cal), apresentaram uma quantidade de estabilizante tal, que permitiram a ocorrência das reações pozolânicas, com o passar do tempo, de maneira mais eficaz que as ocorridas nas misturas mais pobres (com 3% de cal).

É importante citar, também, que as amostras de solos estabilizadas apresentaram valores de módulo resiliente tais, em pares de tensões mais altos ($\sigma_3 \times \sigma_d$), que permitiriam a utilização das mesmas em camadas de subbase e base de pavimentos rodoviários, quando consideradas algumas citações de COSTA e MOTTA (2006).

Estes autores comentam que para pares de tensões de 0,137 MPa (confinante) e 0,412 MPa (desvio), valores médios de MR = 290 MPa e de MR = 251MPa indicam o uso de um material em camadas rodoviárias de base e subbase, respectivamente. A partir dessas informações e após uma análise qualitativa dos gráficos apresentados verificou-se que as misturas de solo Am-A estabilizadas apresentaram valores de MR, para os três teores de cal ensaiados, condizentes com os valores citados por tais autores.

Os outros gráficos gerados para as misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-A, foram elaborados com as superfícies referentes às diferentes condições de cura, para cada teor de cal analisado (3%, 5% e 7%). As Figuras 4.41a, 4.41b e 4.41c

apresentam o comportamento resiliente dessas misturas, estabilizadas com cal em pó, ensaiadas 0, 7, 14, 28 e 90 dias após a moldagem dos CPs.

Enquanto isso, as Figuras 4.42a, 4.42b e 4.42c apresentam o comportamento resiliente (para cada teor de cal analisado) das misturas de solo-cal ensaiadas com a amostra de solo Am-A e estabilizadas com cal em pasta. Essas misturas também foram ensaiadas para períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 após a moldagem dos CPs.

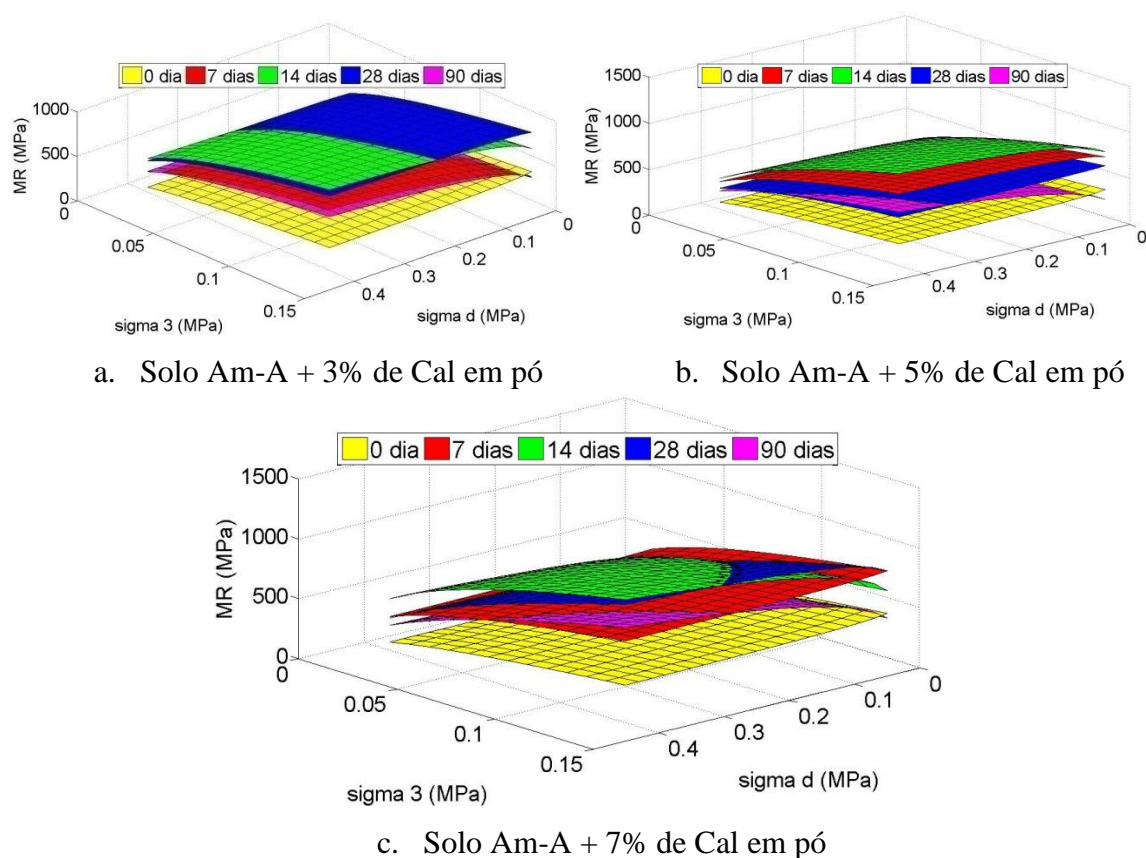
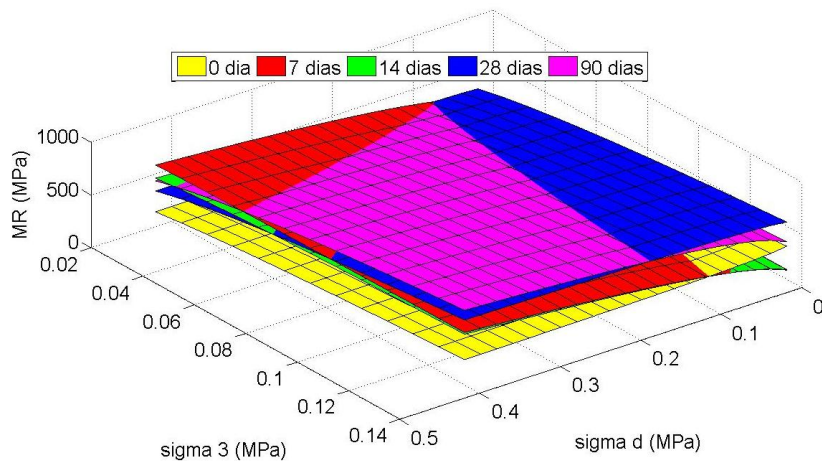
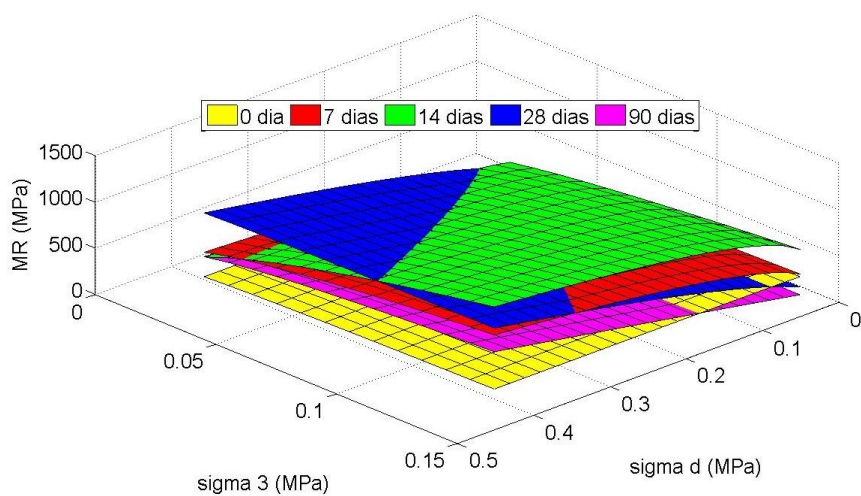


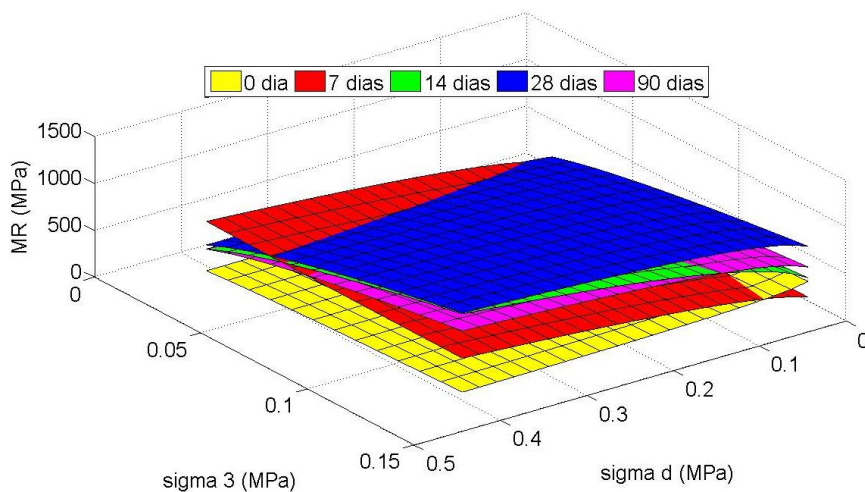
Figura 4.41: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pó impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.



a. Solo Am-A + 3% de cal em pasta



b. Solo Am-A + 5% de cal em pasta



c. Solo Am-A + 7% de cal em pasta

Figura 4.42: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-A com cal em pasta impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.

Observando-se os gráficos da Figura 4.41, percebeu-se que os valores de MR das misturas de solo Am-A mais cal, ensaiadas com a cal em pó, apresentaram melhorias no comportamento resiliente das amostras com a variação do tempo de cura. Contudo, verificou-se que, após um período de cura de 28 e de 90 dias, os valores de MR, dessas misturas, apresentaram redução. Esse fato é intrigante, uma vez que as misturas de solo-cal com 5% e 7% de cal em pó, submetidas ao ensaio de RCS, apresentaram incrementos em sua resistência com o passar do tempo.

De um modo geral, o comportamento resiliente das misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-A, apresentou melhores resultados para as misturas ensaiadas com 7% de cal em pó e com 5% de cal em pasta. Porém, em alguns casos, como para as amostras ensaiadas logo após a moldagem, um aumento no teor de cal não ocasionou melhorias adicionais nos valores de MR.

Com relação à forma de aplicação da cal nas misturas, constatou-se que as duas técnicas analisadas (cal em pó e cal em pasta) proporcionaram incrementos nos resultados de MR. Verificou-se, porém, que as misturas estabilizadas com cal em pó apresentaram resultados de MR levemente melhores que os obtidos para as misturas com cal em pasta. Deve-se ressaltar, contudo, que foram moldados apenas um corpo de prova para cada amostra analisada, o que não permitiu a realização de uma análise estatística dos dados obtidos.

Por fim, verificou-se a supremacia do modelo composto, frente aos modelos clássicos, na análise da amostra de solo natural Am-A e de suas misturas modificadas/estabilizadas pela cal.

4.10.1.2. Solo Am-B

Assim como observado para a amostra de solo Am-A, verificou-se que a superfície referente ao comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-B, gerada a partir da utilização do modelo composto e exposta na Figura 4.43, foi bastante susceptível às variações da tensão desvio, sofrendo pouca influência da tensão de confinamento.

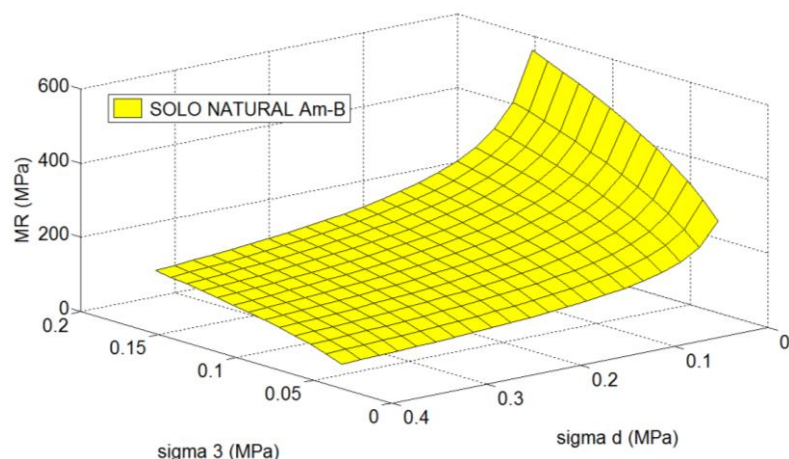


Figura 4.43: Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-B (modelo composto).

Com relação à classificação resiliente de solos do DNIT (2006), verificou-se que a amostra de solo Am-B, após ser analisada como um solo tipicamente argiloso, apresentou, assim como a amostra de solo Am-A, um comportamento de um material regular a bom em relação às suas características resilientes, conforme apresentado na Figura 4.44.

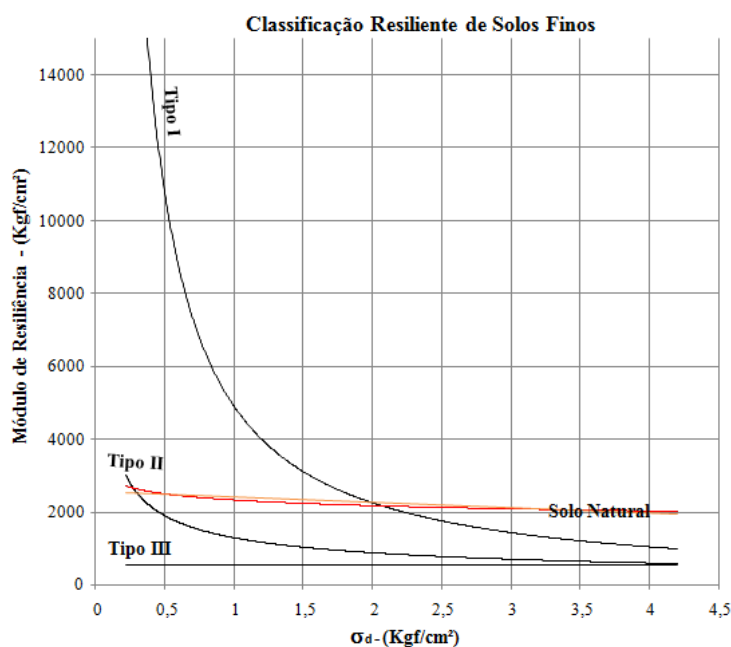


Figura 4.44: Comportamento resiliente da amostra de solo natural Am-B (classificação do DNIT, 2006).

Vale ressaltar, porém, que, assim como observado para a amostra de solo Am-A, verificou-se que o modelo resiliente em função da tensão desvio não é adequado para representar o comportamento resiliente da amostra de solo Am-B, uma vez que o valor de R^2 , encontrado para o modelo de MR versus σ_d desse material, foi de 0,1790 (ver Tabela 4.10).

Assim como realizado para a amostra de solo estudada (Am-A), foram gerados gráficos comparativos entre o comportamento resiliente da amostra natural do solo Am-B e das misturas de solo Am-B mais cal, ensaiadas logo após a moldagem dos corpos-de-prova. As figuras 4.45 e 4.46 apresentam, respectivamente, os gráficos gerados com as misturas ensaiadas com cal pó e cal em pasta.

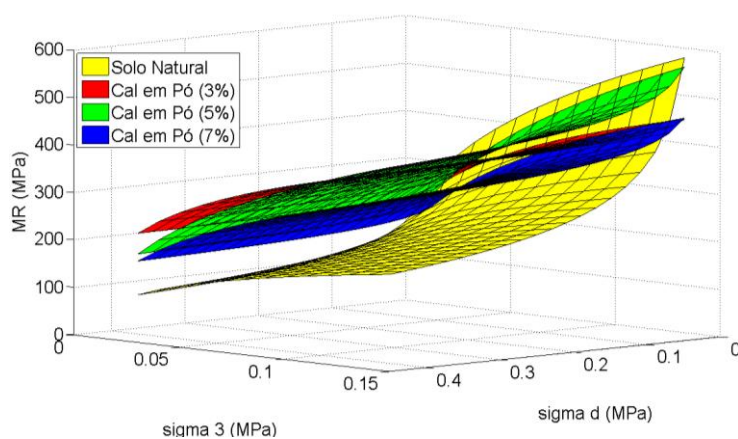


Figura 4.45: Comportamento resiliente do solo Am-B e das misturas de solo Am-B mais cal em pó, ensaiadas após a moldagem dos CPs.

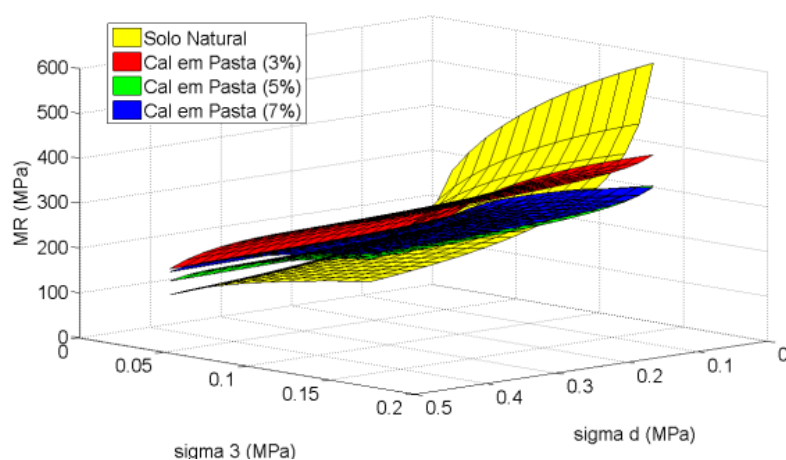


Figura 4.46: Comportamento resiliente do solo Am-B e das misturas de solo Am-B mais cal em pasta, ensaiadas após a moldagem dos CPs.

Percebeu-se, analisando estas figuras, que a adição da cal proporcionou uma melhoria no comportamento das misturas estabilizadas, exceto para tensões desvios baixas. Observou-se, também, que a introdução da cal ao solo resulta em superfícies que apresentam maior estabilidade com mudanças menos bruscas de MR em função dos pares de tensão atuante. Esse mesmo comportamento foi observado para as misturas ensaiadas com o solo Am-A.

Para as misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-B e submetidas a um período de cura após a mistura, foram gerados, inicialmente, assim como feito para misturas ensaiadas com a amostra de solo Am-A, os gráficos apresentados nas Figuras 4.47 e 4.48, onde foi avaliado o comportamento das misturas em função da variação do teor da cal, para um dado tempo de cura. Em cada uma dessas figuras foram apresentados quatro gráficos referentes a cada período de cura analisado. Os gráficos apresentados na Figura 4.47 expõem os resultados obtidos com as amostras ensaiadas com cal em pó, enquanto os gráficos apresentados na Figura 4.48 expõem os resultados obtidos com as amostras ensaiadas com cal em pasta.

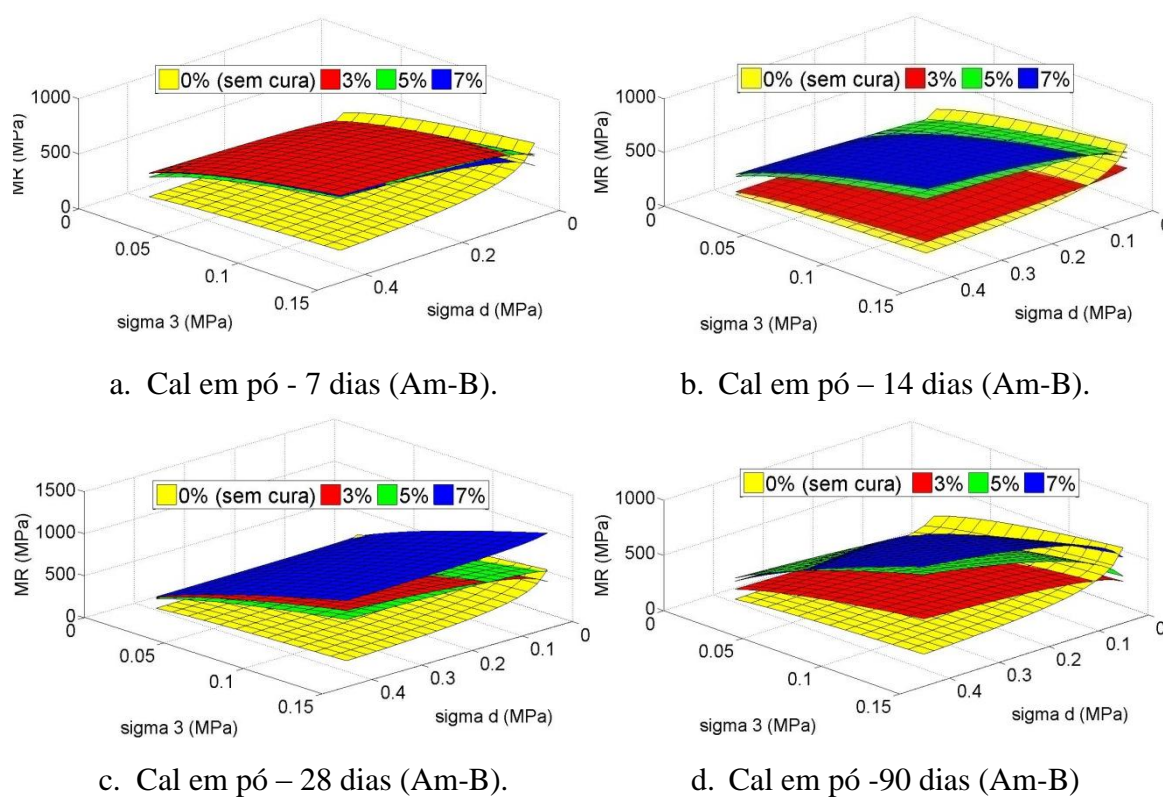
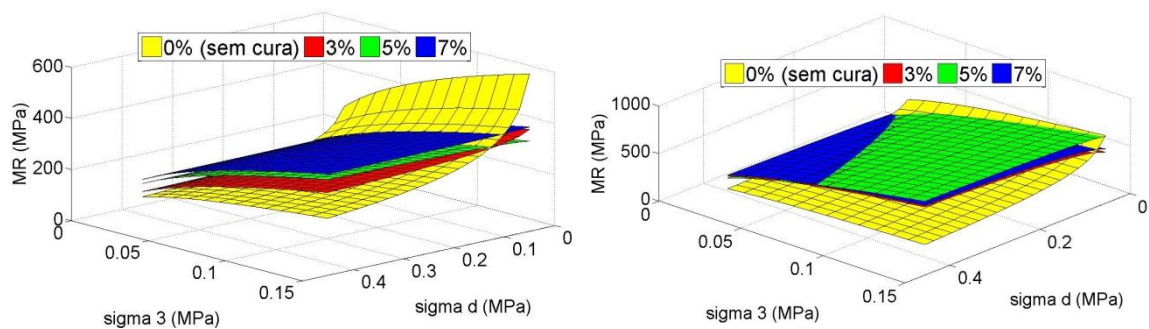
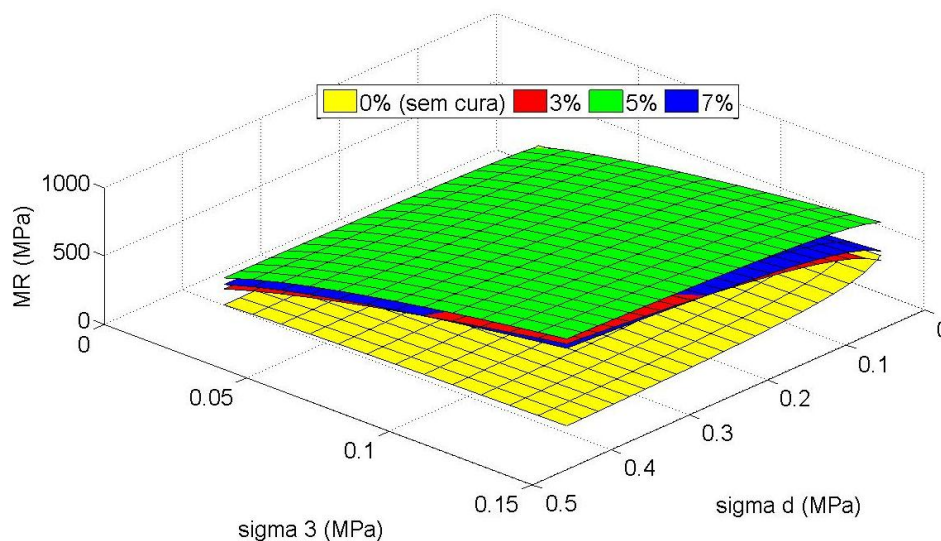


Figura 4.47: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pó após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.

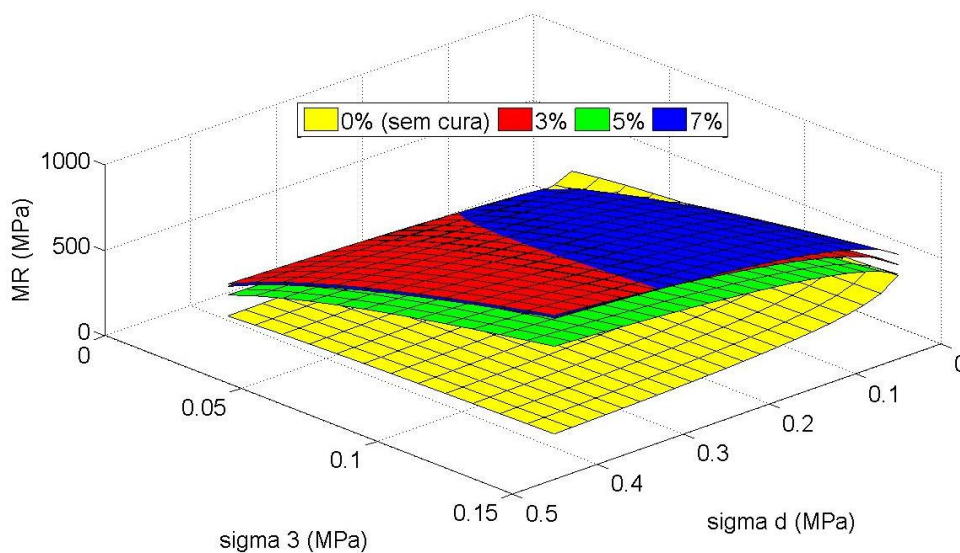


a. Cal em pasta - 7 dias (Am-B).

b. Cal em pasta - 14 dias (Am-B).



c. Cal em pasta - 28 dias (Am-B).



d. Cal em pasta - 90 dias (Am-B).

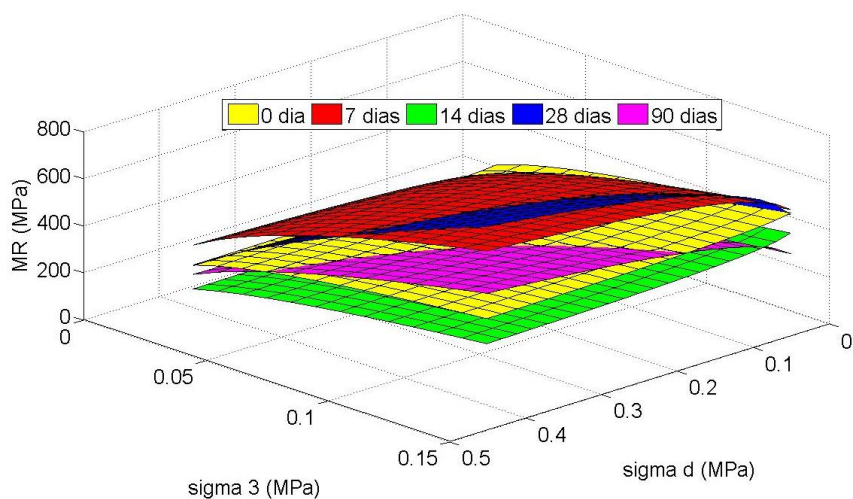
Figura 4.48: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pasta após diferentes períodos de cura, impostas a adição de diferentes teores de estabilizante.

Observando-se os gráficos das Figuras 4.47 e 4.48 e os comparando com o gráfico apresentado na Figura 4.43, verificou-se que os valores de MR encontrados para as misturas de solo Am-B mais cal foram melhores que o obtido para a amostra natural de solo Am-B. Além disso, constatou-se que, de um modo geral, os valores de MR das misturas de solo-cal, foram susceptíveis às variações da tensão de confinamento e as variações da tensão desvio, assim como verificado anteriormente nos resultados de MR obtidos para misturas estabilizadas e ensaiadas com o outro solo analisado.

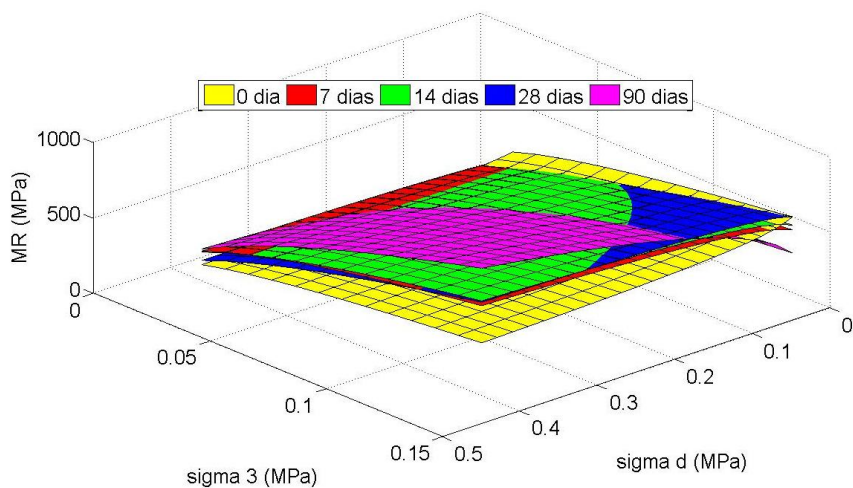
Com relação à variação do teor de estabilizante nas misturas de solo-cal, ensaiadas com o solo natural Am-B, percebeu-se que, para os CPs ensaiados após a moldagem, foram encontrados melhores incrementos nos valores de MR das amostras tratadas com 3% de cal, enquanto que, para os CPs submetidos a períodos de cura variando entre 7 e 90 dias, após a moldagem, foram obtidos, na maioria das situações verificadas, melhores resultados de MR à medida que se aumentou o teor de cal nas misturas. Esse fato também foi observado, e comentado, para as misturas ensaiadas com o solo Am-A.

É importante ressaltar, também, que as amostras de solo Am-B estabilizadas apresentaram, assim como verificado para a outra amostra de solo analisada (Am-A), valores de módulo resiliente tais, em pares de tensões mais altos ($\sigma_3 \times \sigma_d$), que permitiriam a utilização das mesmas em camadas de subbase e base de pavimentos rodoviários, quando considerados os valores de MR, relatados por COSTA e MOTTA (2006), citados, anteriormente, no subitem 4.10.1.1.

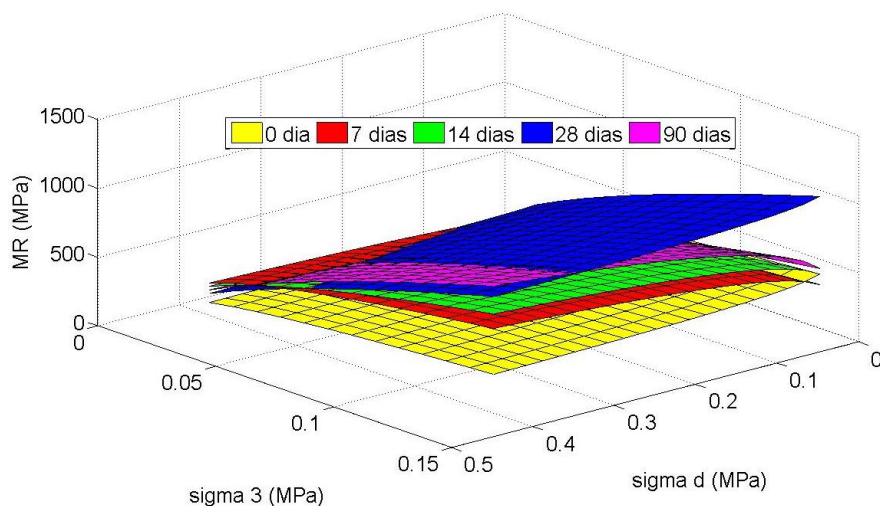
Os demais gráficos obtidos para as misturas de solo-cal, ensaiadas com o solo Am-B, foram elaborados com as superfícies referentes às diferentes condições de cura, para cada teor de cal analisado. As Figuras 4.49 e 4.50 apresentam os resultados encontrados para essas misturas, após a utilização das duas formas de aplicação da cal investigadas na pesquisa.



a. Solo Am-B + 3% de Cal em pó

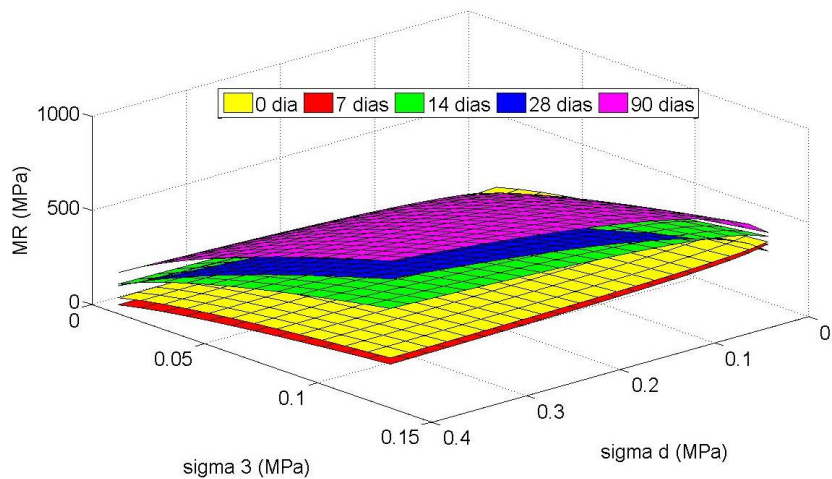


b. Solo Am-B + 5% de Cal em pó

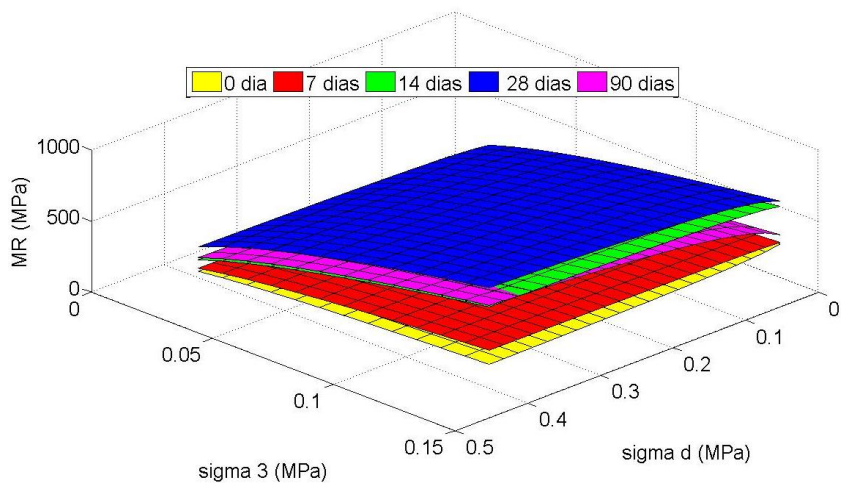


c. Solo Am-B + 7% de Cal em pó

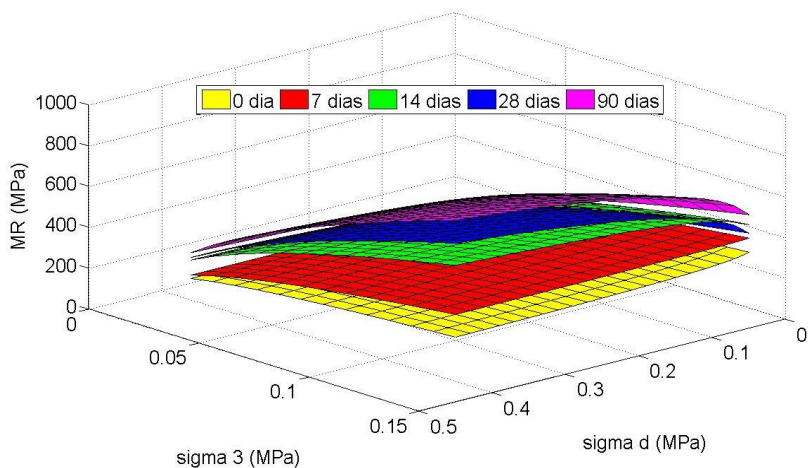
Figura 4.49: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pó impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.



a. Solo Am-B + 3% de cal em pasta



b. Solo Am-B + 5% de cal em pasta



c. Solo Am-B + 7% de cal em pasta

Figura 4.50: Gráficos comparativos de MR para as misturas do solo Am-B com cal em pasta impostas a diferentes períodos de cura, para cada teor de cal analisado.

Verificando-se os gráficos apresentados na Figura 4.49, referentes às misturas de solo-cal tratadas com a cal em pó, percebeu-se que, para as amostras modificadas e (ou) estabilizadas com 5% e 7% de cal, ocorreu, de um modo geral, melhorias no comportamento resiliente das misturas à medida que estas foram submetidas a períodos de cura mais elevados.

Já para as misturas tratadas com 3% de cal, verificou-se um comportamento resiliente atípico, quando comparado com os resultados obtidos para os outros teores de estabilizante analisados, com o aumento do tempo de cura, pois a resistência aumentou basicamente com o tempo de 7 dias de cura.

Já os gráficos expostos na Figura 4.50, referentes às misturas de solo-cal tratadas com a cal em pasta, apresentaram, de um modo geral, resultados de MR crescentes com o aumento do tempo de cura, para as amostras tratadas com 3% e 7% de estabilizante. As amostras tratadas com 5% de cal apresentaram incrementos nos valores de MR para as misturas ensaiadas até 28 dias após a moldagem dos CPs, apresentando, para um período de cura de 90 dias, uma queda considerável nos valores de MR. Esse fato mostra certa inconsistência no resultado obtido para a amostra de solo (Am-B) mais 5% cal (em pasta), submetida a cura mencionada anteriormente. Acredita-se que pode ter havido erros no equipamento, assim como constatado para outras amostras com resultados duvidosos, durante o ensaio triaxial dinâmico.

Já com relação à forma de aplicação da cal nas misturas estabilizadas, ensaiadas com a amostra de solo Am-B, não foi constatado diferenças significativas nos valores de MR.

Por fim, percebeu-se que a adição da cal às amostras dos solos analisados proporcionou, no geral, melhorias no comportamento resiliente destas sendo verificado, para maiorias das amostras, incrementos nos valores de MR com aumento do tempo de cura e da porcentagem de cal adicionada.

4.11. ANÁLISE MECANÍSTICA DE PAVIMENTOS

Com o intuito de verificar melhor os efeitos da aplicação da técnica solo-cal nas amostras dos solos analisados na pesquisa, foi realizado, nesse item, o dimensionamento mecânico para uma estrutura de pavimento constituído por uma camada de solo

estabilizada quimicamente pela cal, baseado nos resultados encontrados nos ensaios mecânicos.

A estrutura de pavimento adotada na análise mecanística foi utilizada por ser comumente encontrada em rodovias de baixo volume de tráfego, no estado do Ceará, sendo constituída por três camadas: uma de revestimento, uma de base e uma de reforço do subleito. Para essa estrutura foi considerado um revestimento em tratamento superficial simples, uma base em solo-cal e camada de reforço do subleito constituída por solo argiloso, como apresentado na Figura 4.51.

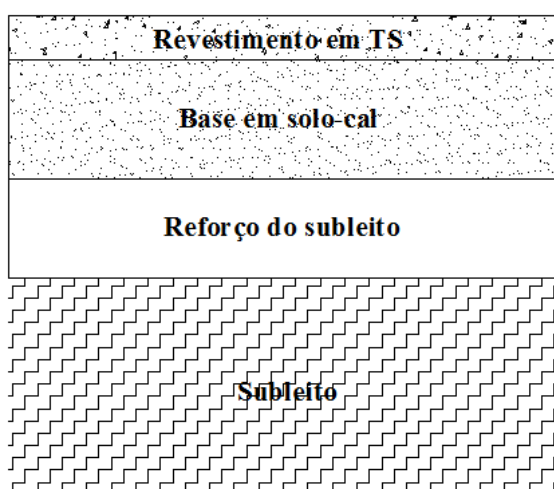


Figura 4.51: Estrutura de pavimento analisada.

A amostra de solo-cal selecionada para ser utilizada na análise da estrutura proposta anteriormente, foi a mistura de solo Am-A mais 5% de cal em pó, ensaiada após 7 dias de cura. Os critérios utilizados na escolha dessa amostra levaram em consideração os seguintes fatores: o solo que apresentou um melhor comportamento mecânico após a estabilização, um teor de cal que atendeu aos critérios especificados pelo método de dosagem preconizado por THOMPSON (1966), a forma de aplicação da cal que proporcionou melhores comportamentos resilientes para as misturas testadas e um tempo de cura que representasse melhor o período entre a compactação de uma camada e sua liberação ao tráfego em campo.

Já a análise mecanística da estrutura foi realizada através da utilização do programa computacional FEPAVE2, usando-se um modelo elástico linear para o revestimento, reforço do subleito e subleito e outro modelo elástico não linear para a

camada de base. Esse programa, de acordo com BEZERRA NETO (2004), foi desenvolvido na Califórnia, em 1968, e utiliza o método de elementos finitos no cálculo de tensões e deslocamentos de camadas de pavimentos. Segundo o mesmo autor, o perfil das estruturas de pavimentos analisadas de forma linear é dividido em malhas quadrangulares e a carga de roda é aplicada na superfície e distribuída de maneira uniforme em uma área circular, enquanto que, para as estruturas não lineares a carga de roda é aplicada em incrementos iguais e os módulos das camadas são calculados pelas equações resilientes encontradas em laboratório.

Os dados de entrada adotados para condição do carregamento da análise foram de uma área de raio de carregamento de 10,8 cm e uma pressão nessa área de 5,6 Kgf/cm², considerando a ação de um eixo simples padrão de 8,2 tf e desconsiderando as tensões gravitacionais.

Os parâmetros físicos e mecânicos utilizados para os materiais constituintes das camadas do pavimento analisado encontram-se expostos na Tabela 4.31. É importante ressaltar que foi considerada apenas uma variável independente, referente ao desvio padrão no valor de k_1 , admitindo-se possíveis oscilações no valor de MR para a mistura de solo-cal analisada como camada de base. Para os outros dois parâmetros, k_2 e k_3 , foram adotados valores de desvios padrões iguais a zero. Contudo, a critério de curiosidade, foram obtidos, através do programa LabFit, os desvios padrões para os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 e expostos na Tabela 4.32.

Tabela 4.31: Parâmetros físicos e mecânicos da estrutura de pavimento analisada.

Camada	Material	Espessura (cm)	MR (Kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	Tratamento Superficial	2	5000	0,30
Base	Solo-Cal	15	$6739 \cdot \sigma_3^{0,4337} \cdot \sigma_d^{0,0555}$	0,25
Reforço do Subleito	Solo Argiloso	15	1500	0,45
Subleito	Solo Argiloso	-	1000	0,45

Os valores dos coeficientes de Poisson das camadas de revestimento, reforço do subleito e subleito foram os mesmos adotados por LOVATO (2004). Já os valores de MR dessas camadas foram utilizados após uma consulta a engenheiros rodoviários locais.

Tabela 4.32: Desvios padrões encontrados, no programa LabFit, para os parâmetros k1, k2 e k3 apresentados na Tabela 4.13.

Parâmetro	Desvio Padrão
K1	370,62
K2	0,09146
K3	0,070248

Os critérios de aceitação adotados na análise mecânica da estrutura investigada foram: a Deflexão máxima admissível (D_{adm}) e a tensão vertical admissível no topo do subleito (σ_{vadm}), dados pelas equações 4.20 e 4.21, retiradas da norma DNER PRO 269/94. Foi desconsiderada na análise a tensão de tração na base do revestimento devido a não realização de ensaios que possibilitassem o conhecimento de dados relativos à vida de fadiga do material, bem como a RTI do TSS.

$$\text{Log}D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N_p \quad (4.20)$$

$$\sigma_{vadm} = \frac{0,006MR_{\text{médio}}}{1 + 0,7 \log N_p} \quad (4.21)$$

Onde:

N_p - número de operações do eixo padrão de 8,2 tf;

σ_d - valor médio do módulo de resiliência do subleito.

Nesta pesquisa foram analisados níveis de tráfego leve ($N = 10^5$), médio ($N = 10^6$) e pesado ($N = 10^7$). Para o cálculo da tensão admissível no topo do subleito argiloso admitiu-se um valor de $MR_{\text{médio}} = 1000 \text{ Kg/cm}^2$. Foram analisados níveis de confiabilidade de 75%, 85%, 95% e 99,8%. Esses níveis foram recomendados por BENEVIDES (2000) e, de acordo com o mesmo, são comumente empregados para rodovias estaduais.

Os resultados encontrados após análise mecânica da estrutura do pavimento proposto encontram-se expostos na Tabela 4.33.

Tabela 4.33: Resultados do dimensionamento mecânico para a estrutura proposta.

Estrutura	Número N	Parâmetros Calculados	Média	Desvio Padrão	Nível de Confiabilidade				Critério de Aceitação
					75%	85%	95%	99,80%	
1	$N = 10^5$	D (mm)	66	1	66,67	67,03	67,64	69	161,44
		σ_v (mm)	0,4489	0	0,4489	0,4489	0,4489	0,4489	1,3333
	$N = 10^6$	D adm	66	1	66,67	67,03	67,64	69	104,71
		σ_v adm	0,4489	0	0,4489	0,4489	0,4489	0,4489	1,1538
	$N = 10^7$	D adm	66	1	66,67	67,03	67,64	69	67,92
		σ_v adm	0,4489	0	0,4489	0,4489	0,4489	0,4489	1,0169

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 4.33, percebe-se que a estrutura do pavimento proposto atende aos critérios de aceitação definidos anteriormente (D_{adm} e σ_{vadm}) com um nível de confiabilidade de 99,8%, para os níveis de tráfego leve e médio. Contudo, verifica-se que esta estrutura apresentou uma D_{adm} superior a aceitável para um tráfego pesado, quando analisado um nível de confiabilidade de 99,8%. No entanto, observou-se que os resultados encontrados no dimensionamento mecânico do pavimento sugerido apresentaram, de um modo geral, valores bastante satisfatórios, principalmente levando-se em conta o fato dessa estrutura vir a ser aplicada posteriormente em rodovias de baixo volume de tráfego.

4.12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram expostos e discutidos os resultados obtidos durante a realização do programa experimental, apresentado no capítulo 3. Procurou-se verificar os efeitos da cura, do teor da cal e da forma de aplicação da mesma (em pó e em pasta), durante o processo de estabilização das duas amostras de solos estudadas. Buscou-se ainda identificar outros fatores que pudessem vir a interferir no comportamento mecânico das misturas de solo-cal ensaiadas, como a composição química dos solos, o tipo de energia de compactação adotado e o período de espera entre a mistura e compactação das amostras estabilizadas. No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões e sugestões resultantes da análise realizada para resultados oriundos da aplicação do programa experimental.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

5.1.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para estudos futuros, que resultaram da aplicação do programa experimental aos dois solos estudados. Ressalta-se que todas as conclusões obtidas estão vinculadas ao universo em estudo e a partir delas, pôde-se conhecer melhor as potencialidades e as limitações dos materiais analisados.

5.1.2. Principais Resultados

5.1.2.1. *Quanto à Caracterização Geotécnica e a Análise Química dos Solos Naturais*

- a) As duas amostras de solos naturais estudadas nesta pesquisa, denominadas por Am-A e Am-B, apresentaram valores de capacidade de troca catiônica condizentes com materiais constituídos por minerais argílicos caulíníticos. Ambos os solos apresentaram um baixo potencial de expansão e foram considerados intemperizados;
- b) As duas amostras de solos naturais estudadas apresentaram ainda argilas com baixa atividade. Essas amostras forneceram valores de ΔpH negativo, indicando, dessa forma, a presença de argilas silicatadas e alumínio trocáveis em sua composição. Vale ressaltar que a presença de tais componentes em um solo indica a possibilidade de melhoria nas propriedades deste após a estabilização com a cal.

5.1.2.2. *Quanto aos Métodos de Dosagem das Misturas de Solo-Cal*

- a) Constatou-se que a dosagem das misturas de solo-cal, realizada através do método proposto por EADES e GRIM (1966), mostrou-se inadequada para os dois solos, não sendo encontrado para nenhuma amostra

ensaiada, após uma hora da realização das misturas, um valor de pH igual ou superior a 12,3. Verificou-se, porém, que a amostra Am-A apresentou uma maior reatividade em relação amostra Am-B, quando tratada pela cal, fornecendo um valor de pH superior ao citado, anteriormente, para a mistura ensaiada com 9% de cal (submetida a um período de cura de 7 dias).

- b) Através do método de dosagem proposto por EADES e GRIM (1966), verificou-se ainda, de um modo geral, aumentos nos valores de pH das amostras estabilizadas em função do teor de estabilizante adicionado e do aumento da cura antes da realização do ensaio;
- c) Com relação ao método de dosagem proposto por THOMPSON (1966), verificou-se que a amostra de solo Am-A mostrou-se reativa à cal com a adição de apenas 3% desse estabilizante, para as duas formas de aplicação do aditivo analisadas (cal em pó e cal em pasta). Constatou-se ainda, uma melhor aplicabilidade da cal em pó, na estabilização da amostra de solo Am-A;
- d) A amostra de solo Am-B apresentou-se reativa à cal em pasta, de acordo com o método de dosagem proposto por THOMPSON (1966), após ser tratada com 5% desse estabilizante. Contudo, não foi encontrado, para nenhuma amostra de solo Am-B ensaiada com a cal em pó, um teor de cal que proporcionasse um incremento de resistência mínimo (345 kN/m²), condizente com o estabelecido pelo método utilizado, que indicasse um teor ótimo para a mistura. Verificou-se uma melhor aplicabilidade da cal em pasta na estabilização do solo Am-B;
- e) Com relação ao tipo de solo analisado através do método de dosagem proposto por THOMPSON (1966), verificou-se, nitidamente, um melhor aplicabilidade da cal na estabilização da amostra Am-A, uma vez que esta forneceu valores de resistência à compressão simples bem superiores aos encontrados para as amostras de solo Am-B estabilizadas.

5.1.2.3. Quanto aos Ensaio de Consistência, Compactação, ISC e Expansão

- a) Verificou-se que os resultados do limite de plasticidade e do índice de plasticidade obtidos para as duas amostras naturais dos solos estudados (Am-A e Am-B), apresentaram valores superiores aos estabelecidos pelo DNIT (25% para LL e 6% para IP), impossibilitando o uso desses materiais em camadas de base e subbase de pavimentos.
- b) As duas amostras de solos naturais (Am-A e Am-B) apresentaram valores de expansão e de capacidade de suporte baixos. Verificou-se que os valores de expansão atenderam aos limites estabelecidos pelo DNIT para o uso desses materiais em camadas de base e de subbase rodoviárias. Contudo, os valores de ISC dos dois solos apresentaram valores baixos que impossibilitariam a ocorrência desse uso;
- c) Com relação aos limites de consistência das misturas de solo-cal, verificou-se que as amostras de solo Am-A, após a inserção do estabilizante, apresentaram uma condição de não-plásticas e de não-líquidas para todos os teores de estabilizantes testados. Já para a amostra de solo Am-B, foi constatado um aumento nos valores de LL e LP e uma redução nos valores de IP, após a inserção da cal. Credita-se o aumento nos valores dos LLs das amostras de solo Am-B estabilizadas, dentre outros fatores, à baixa atividade das argilas constituintes desse material e à composição dos cátions trocáveis presentes no mesmo;
- d) Verificou-se que a adição da cal aos solos estudados reduziu, ou anulou, os IPs das amostras estabilizadas, melhorando a trabalhabilidade desses materiais;
- e) Para os ensaios de compactação observou-se, de forma geral, após a adição da cal aos solos, uma redução na massa específica aparente seca máxima e um aumento da umidade ótima das misturas estabilizadas. Constatou-se ainda que, à medida que o teor da cal foi aumentado nas misturas, para ambas as formas de aplicação da cal investigadas (em pó e

em pasta), foram obtidos valores de massa específica aparente seca mais altos e de umidade ótima mais baixos;

- f) Com relação à variação da energia de compactação nas misturas de solo Am-A mais cal, verificou-se que as amostras ensaiadas na energia Proctor normal apresentaram resultados de massa específica aparente seca máxima menores e de umidade ótima maiores que os obtidos para as amostras ensaiadas na energia Proctor intermediária. Esses resultados foram encontrados para todos os teores de cal testados e para duas formas de aplicação do estabilizante analisadas;
- g) Para os dois solos estudados, verificou-se, de forma geral, melhorias na capacidade de suporte após a inserção da cal. Constatou-se, ainda, que a amostra de solo Am-A mais cal, apresentou valores de ISC bem maiores que os encontrados para as misturas de solo Am-B estabilizadas. Com relação a forma de aplicação da cal, observou-se, à luz dos resultados de ISC, uma melhor aplicabilidade da técnica da cal em pasta na estabilização da amostra de solo Am-A e uma melhor aplicabilidade da técnica da cal em pó na estabilização da amostra de solo Am-B;

5.1.2.4. Quanto aos Resultados dos Ensaios de RCS

- a) Com relação aos resultados de RCS encontrados para as misturas de solo-cal, verificou-se a influência de alguns fatores preponderantes para a melhoria da resistência mecânica dos dois solos analisados, tais como: porcentagem de cal adicionada à amostra, período de cura aos quais os corpos de prova foram submetidos, tipo de técnica de estabilização aplicada (cal em pó e cal em pasta) e tipo de solo utilizado;
- b) Para as amostras de solo Am-A mais cal, constatou-se que os valores de RCS cresceram, de um modo geral, em função do aumento dos períodos de cura testados. Verificou-se, porém, que as misturas desse solo estabilizadas com 3% de cal (em pó e em pasta) alcançaram sua resistência máxima aos 28 dias de cura, apresentando uma redução nesses valores para períodos de cura mais longos (90 dias). Esse fato indica uma

possível cessação das reações pozolânicas nessas misturas entre um período de 28 a 90 dias;

- c) Com relação à influência dos teores de estabilizante nos valores de RCS das misturas de solo Am-A com cal, pôde-se verificar, através dos resultados encontrados, que para períodos de cura mais baixos (0 – 14 dias), a adição da cal em pó na percentagem de 3% apresentou valores de RCS mais elevados do que as misturas com 5% e 7% de cal. Contudo, para períodos de cura mais elevados (28 – 90 dias) percebeu-se a ocorrência expressiva das reações pozolânicas nas misturas mais ricas (com 5% e 7% de cal). Comportamento similar foi observado para as misturas de solo Am-A estabilizadas com cal em pasta;
- d) As amostras de solo Am-A ensaiadas com cal em pó apresentaram melhores resultados de resistência após serem tratadas com 5% desse aditivo. Já as misturas de solo Am-A ensaiadas com cal em pasta apresentaram melhores resultados de RCS para as misturas tratadas com 7% do estabilizante. Constatou-se ainda que ambas as formas de aplicação da cal investigadas proporcionaram a obtenção de resultados de RCS semelhantes para as misturas de solo Am-A estabilizadas, verificando-se, porém, uma melhor aplicabilidade do método convencionalmente utilizado (cal em pó);
- e) Á luz dos resultados de RCS, pôde-se constatar que a aplicação da cal pode ser utilizada satisfatoriamente na estabilização do solo designado por Am-A. Recomenda-se, porém, o uso de 5% desse estabilizante ao solo em questão. Este teor se justifica para as duas formas de aplicação da cal investigadas, uma vez que algumas de suas misturas atingiram valores superiores a 1,034 MPa. Acredita-se que o valor de resistência mínimo aceitável em projetos de rodovias de baixo volume no estado do Ceará é de 0,7 MPa, com base em algumas experiências práticas locais;
- f) Para as amostras de solo Am-B mais cal em pó, constatou-se que os valores de RCS cresceram, em função do aumento dos períodos de cura aos quais estas amostras foram submetidas antes da ruptura, quando

ensaiadas com teores mais elevados de cal (5% e 7%). Já a mistura de solo Am-B mais cal em pó (3%) apresentou uma redução no valor de RCS para períodos de cura mais longos (28 – 90 dias), como verificado para a mistura de solo Am-A mais cal em pó (3%);

- g) Com relação aos resultados de RCS encontrados para as amostras de solo Am-B mais cal em pasta, percebeu-se que estas apresentaram incrementos de resistência em seus valores, em função do aumento do tempo de cura, para as misturas ensaiadas com 5% de estabilizante. Porém, para as amostras ensaiadas com 3% e 7% de cal verificou-se uma redução nos valores de RCS após 14 dias de cura, indicando uma possível cessação das reações cimentantes nas mesmas;
- h) Com relação à forma de aplicação da cal (em pó e em pasta) nas misturas de solo Am-B estabilizadas, verificou-se uma semelhança na maioria dos resultados encontrados. Constatou-se, porém, para alguns teores de cal (3%) a melhor aplicabilidade da cal em pó e para outros (5% e 7%) a melhor aplicabilidade da cal em pasta;
- i) Constatou-se que a adição da cal a amostra de solo Am-B melhorou as propriedades mecânicas desse material. Verificou-se, porém, que essa melhoria não se mostrou muito satisfatória. Acredita-se que esse material esteja mais apto a ser estabilizado por outro processo químico, como o da inserção de betume;
- j) Com relação aos ensaios de RCS, denominados por não convencionais, verificou-se, que a amostra de solo Am-A apresentou os maiores incrementos de resistência quando compactadas após uma hora de sua mistura com a cal, enquanto a amostra Am-B apresentou melhores resultados após ser ensaiada 2 horas da inserção do estabilizante. Esses resultados foram verificados para duas formas de aplicação da cal (em pó e em pasta).

5.1.2.5. Quanto aos Resultados dos Ensaios de RTCD

- a) Com relação aos resultados de RTCD encontrados para as misturas de solo Am-A e Am-B estabilizadas, constatou-se que para todas as amostras ensaiadas foram encontrados valores de resistência superiores à 0,12 MPa para pelo menos um dos períodos de cura analisados. Isso mostra a ocorrência das reações pozolânicas nessas amostras. O valor de RTCD igual 0,12 MPa é citado em algumas bibliografias como sendo um indicativo da fronteira entre as fases cimentada e modificada das misturas de solo-cal;
- b) Foram encontrados melhores valores de RTCD, após a inserção da cal, para as amostras ensaiadas com o solo Am-A. Constatou-se ainda que as amostras de solo Am-B mais cal (em pó e em pasta), mesmo apresentando valores de resistências superiores a 0,12 MPa para algumas misturas, não podem ser qualificadas em camadas nobres de rodovias;
- c) Com relação à forma de aplicação do estabilizante ao solo Am-A, verificou-se, de um modo geral, uma melhor aplicabilidade da técnica da cal em pó. Para essa mesma amostra de solo foi constatado melhores resultados de RTCD após a inserção de 5% de cal, para as duas formas de aplicação do estabilizante (cal em pó e cal em pasta), coincidindo com o encontrado durante a análise da RCS dessas amostras;
- d) Para as misturas de solo Am-B mais cal em pó foi constatado melhores incrementos de RTCD para as misturas ensaiadas com 7% desse estabilizante. Já para as amostras de solo Am-B mais cal em pasta foram encontrados melhores valores de RTCD para as misturas tratadas com 3% do estabilizante. Esses resultados indicam algumas divergências no comportamento dessas amostras quando comparados com os resultados de RCS, uma vez que foram observados melhores incrementos de resistência, durante à realização desse último ensaio, nas amostras tratadas com 5% de cal (em pó e em pasta). Desconhece-se a razão para a ocorrência desse fato.

5.1.2.6. *Quanto aos Resultados dos ensaios de MR*

- a) A adição da cal nas amostras dos solos analisadas proporcionou melhorias no comportamento resiliente destas, sendo verificado, para maiorias das misturas de solo-cal ensaiadas, incrementos nos valores de MR com aumento do tempo de cura e da percentagem de cal adicionada;
- b) O comportamento resiliente das misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-A, foi tanto melhor quanto maior o teor de estabilizante adicionado. Porém, em alguns casos, como para as amostras ensaiadas logo após a moldagem, um aumento no teor da cal não ocasionou melhorias adicionais nos valores de MR.
- c) Verificou-se a supremacia do modelo composto, frente aos modelos clássicos, na análise das amostras dos solos naturais Am-A e Am-B, assim como para suas misturas modificadas/estabilizadas pela cal.
- d) Com relação à forma de aplicação da cal nas misturas com o solo Am-A, constatou-se que as duas técnicas analisadas (cal em pó e cal em pasta) proporcionaram bons resultados de MR. Verificou-se, porém, que as misturas estabilizadas com cal em pó apresentaram resultados de MR levemente melhores que os obtidos para as misturas com cal em pasta.
- e) Com relação à forma de aplicação da cal nas misturas de solo-cal estabilizadas, ensaiadas com a amostra de solo Am-B, não foi constatado diferenças significativas nos valores de MR.

5.1.2.7. *Quanto ao Dimensionamento do Pavimento Proposto*

- a) Com relação à análise mecânica realizada para a estrutura do pavimento rodoviário constatou-se que a mesma atendeu às especificações, retiradas da norma DNER PRO 269/94, da deflexão máxima admissível e da tensão vertical admissível no topo do subleito, com uma confiabilidade de 99,8% para o uso em rodovias de tráfego leve e médio e com uma confiabilidade de 95,0% para o uso em rodovias de tráfego pesado.

5.1.3. Principais Conclusões

Com base nos principais resultados encontrados nesta pesquisa conclui-se que:

- a) A cal exerceu influência de maneira imediata na resistência dos solos analisados, reduzindo ou anulando a plasticidade destes e melhorando a trabalhabilidade dos mesmos;
- b) A resistência das amostras estabilizadas aumenta, de um modo geral, para períodos de cura mais longos e para maiores teores da cal. Porém, foram verificados padrões distintos de resistência para os solos estudados;
- c) A adição da cal modificou as curvas de compactação das misturas de solo-cal, aumentando a umidade ótima das mesmas e diminuindo o peso específico aparente seco máximo destas;
- d) A amostra de solo Am-A apresentou melhores incrementos de resistência que a amostra de solo Am-B, após a estabilização com a cal.
- e) À luz dos resultados de RCS, constatou-se que a aplicação da cal pode ser utilizada satisfatoriamente na estabilização do solo designado por Am-A. Enquanto que para a amostra de solo Am-B não foram encontrados incrementos de resistência tais que pudessem classificar este solo como apto a estabilização com a cal, para o uso em camadas nobres de rodovias;
- f) Os valores de MR das misturas de solo-cal, ensaiadas com os solos Am-A e Am-B, apresentaram valores condizentes, para pares de tensões elevadas, com materiais utilizados em camadas de base e de subbase de rodovias;
- g) As duas formas de aplicação da cal proporcionaram resultados bem parecidos, constatando-se, porém, uma melhor aplicabilidade da forma convencional (cal em pó);

- h) O dimensionamento mecânico indicou o uso satisfatório da amostra de solo Am-A em camadas de bases revestidas de rodovias de baixo volume de tráfego.

5.2. PRINCIPAIS SUGESTÕES

Com o intuito de complementar a pesquisa apresentada neste trabalho, sugere-se:

- a) Realizar difratogramas de raios-X, em misturas de solos estabilizadas com cal em pó e em pasta, a fim de verificar a cinética da reação de hidratação nas misturas estabilizadas.
- b) Realizar uma Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras de solos analisadas e em suas misturas estabilizadas.
- c) Realizar um ensaio de termogravimetria nas amostras de solos naturais e em suas misturas estabilizadas, com o intuito de conhecer a porcentagem de cada componente presente nas amostras ensaiadas e a retenção de água (H₂O) nas misturas de solo-cal após o tempo de cura.
- d) Investigar a possibilidade de aplicação de outras técnicas de estabilização aos solos analisados na pesquisa, como a de solo-emulsão, a fim de verificar qual a melhor técnica construtiva em termos técnicos, econômico e financeiros.
- e) Estudar o comportamento à fadiga das misturas de solos estabilizadas quimicamente pela cal.
- f) Promover a cura das misturas de solo-cal em diferentes temperaturas e verificar a variação das propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas.
- g) Investigar o processo de imprimação em camadas estabilizadas pela cal, variando-se o tipo e a taxa de ligante empregado.
- h) Avaliar o desempenho de pavimentos rodoviários executados com camadas estabilizadas pela cal e verificar a evolução do comportamento mecânico da estrutura, com o passar do tempo e após os efeitos oriundos

do tráfego sobre esta, correlacionando com o desempenho observado em laboratório, por meio de simuladores de tráfego.

5.2.1. Proposta Preliminar Para Investigação da Compatibilidade da Cal Com o Solo

Com base na experiência adquirida após o desenvolvimento desta pesquisa, sugere-se um método preliminar e simplificado de análise da compatibilidade de um solo à estabilização química com a cal. Este modelo propõe uma análise inicial das características físicas do solo e das possibilidades freqüentemente adotadas para a melhoria destas. Em seguida, apresenta as características que uma amostra de solo deve ter para ser enquadrada, preliminarmente, como apta a estabilização com a cal. Por fim, o modelo propõe a utilização do método de dosagem desenvolvido por THOMPSON (1966), a fim de obter a percentagem ótima de cal a ser aplicada para atender às especificações do projeto.

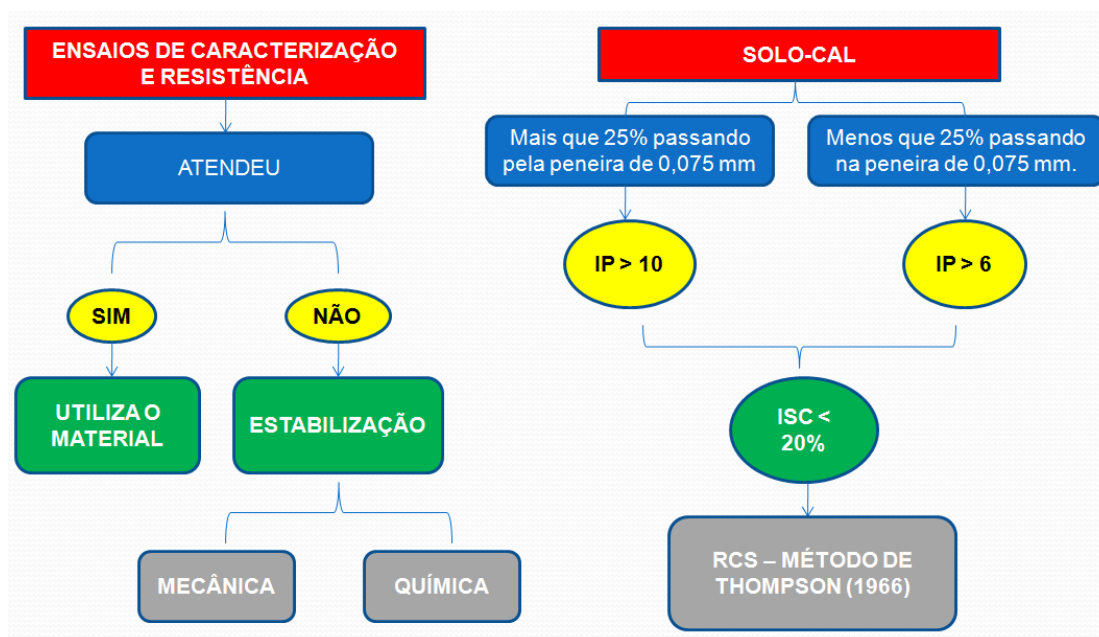


Figura 5.1: Proposta preliminar para investigação da compatibilidade da cal com o solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2003) NBR 7175 – Cal Hidratada para Argamassas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL (2007). **O Setor da Cal no Brasil**. Net, São Paulo. Disponível em: www.abpc.org.br. Acesso em: 7 de mar. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1966). **ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime /mixtures**. Philadelphia.
- ANGELIM, R. R. (2005) **Influência do Procedimento de Misturas da Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária**. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2. 2005, Goiânia. Anais, Goiânia, UFG, p 195-200.
- AZEVEDO, A. L. C.; JÚNIOR, A. O.; PEDROSA, R. A. A.; RAMALHO, R. W. (1998) **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais, n. 2, p. 47-56.
- BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.
- BARROSO, S. H. A. (2002) **Estudos de solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária**. Tese de Doutorado. 178 p. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, São Paulo
- BARROSO, S. H. A.; SANTOS, R. M. (2006) **Estudo de Misturas de Solo-Cal dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia**

Rodoviária. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, Paraná.

BENEVIDES, S. A. S. (2000) **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará.** Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

BERNUCCI, L. L. B. (1995) **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.** Tese de Doutorado. 237 p. Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo. São Paulo, São Paulo.

BEZERRA NETO, R. S. (2004). **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos Métodos Empíricos do DNER e Mecânico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (MS).** São Carlos, 2004. 169p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCracken, F. D.; SOUTHARD, R. J. (1997) **Soil Genesis and Classification.** 2.th.ed. Ames: Iowa State University, 527p.

CARVALHO, J. B. Q. (1988). **Propriedade e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal.** 22^a Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Florianópolis, SC, 1:689-706.

CARVALHO, J. B. Q. (1990). **Reações que Ocorrem Quando da Estabilização com Cal de Solos Lateríticos.** 24^a Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Belém, vol. 1, pp. 224-232.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004) **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado.** Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CASTRO, F. J. C. de O. (1981) **Um Estudo Difratométrico (RX) da Interação Pozolânica: Argilominerais do Solo e Hidróxido de Cálcio.** In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro. Anais... p.453-468.

CEARÁ (2003) **Relatório Anual de Atividades**. Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, CE.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2007). **Relatório Anual dos Transportes**. Net, Set. 2007. Disponível em: www.cnt.org.br. Acesso em: 28 set. 2007.

COUTO, E. G. (2008) **Notas de Aula da Disciplina Solos III**. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade Federal de Mato Grosso.

DERT/CE. (1994) Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes. **Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias**. Fortaleza.

DIAS, C. R. C. (2004) **Estudo de Misturas de Areia-Asfalto e Cinza Cal Para Emprego em Pavimentos Urbanos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil 127 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DNER (1994) ME 041/94 – Solos – **Preparação de Amostras para Caracterização**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

DNER (1994) ME 049/94 – Solos – **Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

DNER (1994) ME 051/94 – Solos – **Análise Granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

DNER (1994) ME 082/94 – Solos – **Determinação do Limite de Plasticidade**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

DNER (1994) ME 093/94 – Solos – **Determinação da Densidade Real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.

- DNER (1994) ME 122/94 – Solos – **Determinação do Limite de Liquidez** – Método de Referência e Método Expedito. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 162/94 – Solos – **Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) ME 138/94 – Misturas Asfálticas – **Determinação da Resistência à Tração na Compressão Diametral**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNER (1994) PRO 269/94 - Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- DNIT (2006). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Publicação IPR 719, 3 ed. Rio de Janeiro, RJ. 278 p.
- EADES, J. L.; GRIM, R. E.(1960) Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. Highway Research Record, Washington, D. C. 262: 51- 63.
- EADES, J. L.; GRIM, R. E. (1966) **A quick test to determine lime requirements for lime stabilization**. Highway Research Board, Washington, D. C.; n.139, p.61-72.
- FERRAZ, R.L. (1994) **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Viçosa, UFV. 174p. (Tese de MS).
- FERREIRA, J. G. H. M. (2002). **Elaboração e Análise de Base de Dados de Ensaio Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 251p.
- GIRÃO, A. R.; DUTRA, I.; SOUZA, F. (2000). **Área Irrigada e Métodos de Irrigação no Estado do Ceará**. Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará.
- GONDIM, L. M. (2008) **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação

de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.

GUIMARÃES, J. E. P. (1971) **Estabilização de Solos com Cal**. ABPC, São Paulo, SP, Boletim n° 5, 68p.

GUIMARÃES, J. E. P. (2002) **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. (1968) **Misturas de Solo-Cal**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação 426, 1968. Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE (2007). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações Sobre os Municípios Brasileiros**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm>. Acesso em: 25 set. 2008.

INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005). **Cement and Lime Stabilisation**. Net, fev. ; 2005. Disponível em: http://www.ifgworld.org/browse/all_pdf_files.asp. Acesso em: 3 jan. 2007.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. (1972) **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sidney: Butterworths. 374p.

IPECE (2007) **Perfil Básico Municipal**. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, CE.

IPLANCE (1997) CD ROM. **Atlas do Ceará**. Instituto de Planejamento do Estado do Ceará. Fortaleza, CE.

JACINTHO, E. C. (2005) **Estudo do Comportamento de Misturas Solo-emulsão para Uso em Barragens**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-132/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

KIEHL, E. J. (1979). **Manual de Edafologia: Relações Solo – Planta**. Editora Agronômica CERES Ltda, São Paulo, SP, 262 p.

- LIMA, D. C. (1984) **Estabilização Solo-Cal**. In: 19ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro. Anais... p.67-82.
- LITTLE, D. N. (1995). **Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime**, Published by Kendall/Hunt Publishing Company.
- LITTLE, D. N. (1999) **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association.
- LOIOLA, P. R. R.; BARROSO, S. H. A. (2007) **Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará**. Anais da 37º Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, GO.
- LOIOLA, P. R.R; NOBRE JÚNIOR, E. F. (2001) **Trecho Experimental Utilizando Mistura de Solo-Cal no Município de Limoeiro do Norte-Ceará**. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Brasília, Distrito Federal.
- LOVATO, R. S. (2004) **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado á Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- MALLELA, J.; QUINTUS, P. E. H. V.; SMITH, K. L. (2004) **Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design**. Prepared for The National Lime Association.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 574 p.
- MICELI JR, G. (2006) **Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- MITCHELL, J. K. (1976) **Fundamentals of Soil Behavior**. USA: John Willey & Sons.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (2000). **Technical Memorandum Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates**. Austin White Lime, Chemical lime, Texas Lime. <Disponível em: www.lime.org/sulfate.pdf>. Publicado no site em Agosto de 2000. Acesso em: 04/09/2007.

NATIONAL INSTITUTE FOR TRANSPORT AND ROAD RESEARCH (1986) **Cimentitious Stabilizers in Road Construction. Technical Recommendations for Highways**, Pretoria, 13: 1-64.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (2004) **Lime Stabilization and Lime Modification**. Lime Treated Soil Construction Manual, Bulletin 326.

NÓBREGA, M. T. (1981) **Estabilização Solo-Cal**. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Boletim 13. São Paulo, Brasil.

NÓBREGA, M. T.; GUIMARÃES, J. E. P. (1981) **Estabilização de Latossolo Vermelho Escuro Argiloso com Cal e Proposição do Manual Brasileiro de Construção de Solos Estabilizados com Cal**. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Boletim 13. São Paulo, Brasil.

NÚÑEZ, W. P. (1991) **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando Seu Emprego na Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGE/UFRGS, Porto Alegre. 150p.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. (1999) Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record, Washington D.C.**, n° 1652, p.215-227.

RABÊLO, A. N. (2006). **Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Rodovias de Baixo Volume de Tráfego do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 186 fl.

SANTOS, J. (2004). **Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para Uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. Dissertação de

Mestrado, Publicação G.DM-127/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.

SEAGRI (1999). Net, Fortaleza. Disponível em: www.noolhar.com/opovo/especial/agronegociostres/396395.html. Acesso em: 28 de Abril de 2006.

SEED, H. B.; CHAN, C. K.; LEE, C. D. (1962) Resilient Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failure in Asphalt Pavements. In: Proceedings of the 1st. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor 1: 611-36.

SENÇO, W (2001). Manual de Técnicas de Pavimentação. Volume II. 1^a Edição. Editora Pini. São Paulo.

SOUZA JÚNIOR, J. D. (2005) **O Efeito da Energia de Compactação em Algumas Propriedades dos Solos do Estado do Ceará Utilizados em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. (1998) **Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil**. Ground Improvement, n.2, p.27-32.

THOMÉ, A. (1994) **Estudo do Comportamento de Um Solo Mole Tratado Com Cal, Visando Seu Uso em Fundações Superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGE/UFRGS, Porto Alegre. 149p.

THOMPSON, M. R. (1965) Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soil. Highway Research Record, Washington, D. C. 92: 69-82.

THOMPSON, M. R. (1966) **Lime Reactivity of Illinois Soils**. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, v.92, p.67-92.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1987). **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction**. Washington: TRB, 58p. (State of the art Report, 5).

UFJF (2008) **Sistema de Classificação do TRB**. Universidade Federal de Juíz de Fora. Net, Juíz de Fora, MG. Disponível em: http://www.geotecnia.ufjf.br/MECSOL/T12_sistemas_aasho_e_trb.htm. Acesso em: 8 de set. 2007.

VILLIBOR, D. F. (1982) **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP.

YOUNG, R. N. AND WARKENTIN, B. P. (1966). **Introduction to Soil Behavior**, MacMillian, New York.