

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE - CTA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RODRIGO ANDRÉ KLAMT

**UTILIZAÇÃO DA CAL E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NO
MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS**

Alegrete

2012

RODRIGO ANDRÉ KLAMT

**UTILIZAÇÃO DA CAL E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NO
MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS**

Trabalho final apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Graduado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M. Sc. Eng. Magnos Baroni

**Alegrete
2012**

RODRIGO ANDRÉ KLAMT

**UTILIZAÇÃO DA CAL E DA CINZA DA CASCA DE ARROZ NO
MELHORAMENTO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS**

Trabalho final apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Graduado em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 05 de outubro de 2012.
Banca Examinadora:

Prof. M. Sc. Eng. Magnos Baroni
Orientador
Engenharia Civil - UNIPAMPA

Prof. Dr. Eng. José Mário Doleys Soares
Engenharia Civil - UFSM

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
Engenharia Agrícola – UNIPAMPA

Dedico este trabalho a Deus que me deu sabedoria e paz de espírito. Aos meus pais, Walter e Marlene, pelo amor, companheirismo e dedicação de toda uma vida. Aos meus irmãos, Rafael e Carlos, pelo apoio. À minha namorada Luciéle, quem eu tanto amo e admiro.

AGRADECIMENTO

A Deus pela oportunidade de viver e realizar este curso de graduação.

Ao meu orientador, Magnos Baroni, pela paciência, incentivo, atenção e disponibilidade dedicados durante todo o decorrer do trabalho.

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

À minha namorada Luciéle da Silva Knierim, por sua dedicação, paciência e companheirismo.

Aos meus irmãos, Rafael e Carlos, pela torcida e apoio.

Aos meus amigos Ricardo Eguilhor Rodrigues e Ghaith Khalil Ahmad Suleiman, pelo companheirismo e apoio incessante prestado para a realização dessa pesquisa.

Aos laboratoristas do Laboratório de Mecânica dos Solos, Marcelo e Vivian, por toda ajuda e apoio prestados na realização dos ensaios.

Aos colegas, pelo auxílio, amizade e companheirismo disseminados nestes anos.

Aos demais professores pelos ensinamentos passados ao longo da graduação.

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 este curso.

RESUMO

A pesquisa relatada neste trabalho de conclusão de curso teve por objetivo estudar a viabilidade técnica de estabilizar-se um solo arenoso de Alegrete/RS com a adição de cal e cinza de casca de arroz (CCA). A cal é amplamente utilizada na melhoria dos solos, o diferencial é a inclusão de porcentagens de CCA que se encontra no grupo de rejeitos gerados em grande volume anualmente e são muitas vezes descartadas de forma inadequada no meio ambiente, sem nenhum critério técnico, ou demandam custos elevados relativos à estocagem e destinação final. A metodologia do trabalho consistiu em estudar e desenvolver um programa experimental de ensaios que permitiu o conhecimento e o melhoramento das propriedades de um solo arenoso proveniente de uma jazida localizada na cidade de Alegrete, RS, com o uso de diferentes porcentagens de cal e CCA como agentes estabilizantes. Foram comparados os resultados de corpos de prova do solo moldados sem inclusão de nenhum agente estabilizador e amostras com diferentes teores desses materiais e, desta maneira, é comprovado o desempenho dos diferentes traços estudados. Foram realizados ensaios de granulometria, limites de consistência, compactação e resistência à compressão simples (RCS) em todos os traços estudados e determinou-se as influências do tempo de cura e dos teores de cal e cal+CCA nas compactações, resistências e caracterizações. Os valores máximos de resistência à compressão simples foram obtidos para as misturas com cal+CCA. A estabilização do solo arenoso com cal e CCA mostrou-se eficaz, permitindo o uso desses materiais nas camadas de base e sub-base de pavimentação, tendo em vista a adição de novos materiais e minimização do problema de deposição da cinza de casca de arroz.

Palavras-chave: Estabilização de solos; Pavimentos; Cal; Cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

The research reported here in this assignment aimed to study the technical feasibility of stabilizing a sandy soil from Alegrete/RS with the addition of lime and rice husk ash. The limes are widely used in soil's improvement, the difference is the inclusion of percentages of CCA, which is in the group of large volume generated annually and are often improperly discarded into the environment without any technical criterion, or demand high costs relating to storage and final disposal. The methodology of the study was to develop a program of experimental tests that allowed the knowledge and improvement of some properties in the sandy soil from a deposit located in the city of Alegrete, RS, with the use of different percentages of lime and CCA as stabilizing agents. The body-proof's results were compared without any stabilizer samples with different amounts of these materials and, thus, is proven performance of the different traits studied. Particle size test, consistency of limits, compaction and compression strength (RCS) were realized. The same characteristics in all studied sample were found and it was possible to determined the influence so curing time and contents of lime and lime+CCA in the compressions, resistors and characterizations. The maximum values of compressive strength were obtained for mixtures with lime+CCA. The stabilization of a sandy soil with limes and CCA proved it selves effective, allowing the use of these materials in the layers of the base and sub-base for paving, in order to add new materials and minimizing the problem of disposal of rice hull ash.

Keywords: Soil stabilization; Pavements; Lime; Rice husk ash.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Exemplo de curva de Distribuição Granulométrica	21
FIGURA 2 - Esquema para Classificação pelo Sistema Unificado.....	23
FIGURA 3 - Curvas Granulométricas de Areias com Diferentes Coeficientes de Curvatura	24
FIGURA 4 - Esquema para Classificação pelo Sistema Rodoviário.....	25
FIGURA 5 - Aparelho de Casagrande para Determinação do Limite de Liquidez.....	26
FIGURA 6 - Gráfico de Número de Golpes x Umidade – Determinação do LL.....	26
FIGURA 7 - Determinação do Limite de Plasticidade	27
FIGURA 8 - Equipamentos do Ensaio de Compactação	29
FIGURA 9 - Curvas de Compactação de um Solo com Diferentes Energias	30
FIGURA 10 - Forma de Ruptura para as Amostras Submetidas ao Ensaio de RCS.....	32
FIGURA 11 - Mecanismo de Troca de Cátions	34
FIGURA 12 - Micrografia Eletrônica de Varredura da CCA Queimada a 560°C.....	37
FIGURA 13 - Localização da Jazida	41
FIGURA 14 - Coleta de Solo	42
FIGURA 15 - Localização da Jazida Georeferenciada.....	42
FIGURA 16 - Cal Hidratada Especial – CH II.....	44
FIGURA 17 - Filtro da Empresa CAAL.....	45
FIGURA 18 - Cinza de Casca de Arroz da CAAL.....	46
FIGURA 19 - Cinza de Casca de Arroz Moída.....	46
FIGURA 20 - Solo Coletado na Jazida.....	48
FIGURA 21 - Fluxograma de Ensaios.....	49
FIGURA 22 - Secagem do Solo ao Ar Livre	50
FIGURA 23 - Execução dos Ensaios de Peneiramento	51
FIGURA 24 - Execução dos Ensaios de Limite de Liquidez.....	51
FIGURA 25 - Execução dos Ensaios de Limite de Liquidez (Teor de Umidade)	52
FIGURA 26 - Execução dos Ensaios de Limite de Plasticidade.....	52
FIGURA 27 - Execução dos Ensaios de Peso Específico Real dos Grãos	52
FIGURA 28 - Ensaio de Compactação (Umidade)	53
FIGURA 29 - Problemas na Desmoldagem dos Corpos de prova	54
FIGURA 30 - Cura Úmida dos Corpos de prova	54
FIGURA 31 - Problemas no Capeamento dos Corpos de prova	55

FIGURA 32 - Serragem dos Corpos de prova.....	55
FIGURA 33 - Ensaio de Resistência à Compressão.....	56
FIGURA 34 - Forma de Ruptura do Corpo-de-prova Submetido à RCS	56
FIGURA 35 - Distribuição Granulométrica (Solo e Solo+Cal)	58
FIGURA 36 - Distribuição Granulométrica (Solo e Solo+Cal+CCA)	58
FIGURA 37 - Distribuição Granulométrica (Solo, Solo+Cal e Solo+Cal+CCA).....	58
FIGURA 38 - Evolução dos Limites de Consistência (Solo, Solo+Cal e Solo+Cal+CCA) ...	60
FIGURA 39 - Densidade Real dos Grãos das Misturas.....	64
FIGURA 40 - Índice de Vazios das Misturas.....	65
FIGURA 41 - Grau de Saturação das Misturas	65
FIGURA 42 - Curvas de Compactação – Solo e Mistura Solo+Cal.....	66
FIGURA 43 - Curvas de Compactação – Solo e Mistura Solo+Cal+CCA.....	67
FIGURA 44 - Resistência à Compressão Simples (MPa).....	70
FIGURA 45 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura (Solo e Solo+Cal).....	71
FIGURA 46 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura (Solo e Solo+Cal+CCA).....	71
FIGURA 47 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura de Todas Misturas	72
FIGURA 48 - Resistência à Compressão Simples aos 56 dias	74
FIGURA 49 - Resistência à Compressão Simples (RCS) x Índice de Vazios (e).....	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Limites de Atterberg de Alguns Solos Brasileiros	28
TABELA 2 - Valores Médios da Composição das Cales no Brasil	33
TABELA 3 - Composição Química de Várias CCA	38
TABELA 4 - Coordenadas Geográficas dos Pontos da Jazida.....	43

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Escala Granulométrica.....	21
QUADRO 2 - Terminologia do Sistema Unificado.....	23
QUADRO 3 - Energias de Compactação Utilizadas nos Ensaios	30
QUADRO 4 - Composição Química da CCA.....	45
QUADRO 5 - Porcentagens de Cada Mistura.....	48
QUADRO 6 - Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Não Uniformidade das Misturas..	59
QUADRO 7 - Síntese das Características de Granulometria e Plasticidade.....	61
QUADRO 8 - Classificação das Misturas.....	62
QUADRO 9 - Peso Específico Aparente Seco Máximo das Misturas	63
QUADRO 10 - Densidade Real dos Grãos (Gs), Grau de Saturação (Sr) e Índice de Vazios (e) das Misturas.....	64
QUADRO 11 - Características de Compactação do Solo e das Misturas.....	68
QUADRO 12 - Resistência à Compressão Simples (MPa).....	69

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC – Coeficiente de Curvatura
CCA – Cinza de Casca de Arroz
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
CNU – Coeficiente de Não Uniformidade
CR – Compacidade Relativa
e – Índice de Vazios
Gs – Densidade Real dos Grãos
HRB - Highway Research Board
IG – Índice de Grupo
IP – Índice de Plasticidade
IRGA – Instituto Rio Grandense de Arroz
ISC – Índice Suporte Califórnia
LC – Limite de Contração
LL – Limite Liquidez
LMSU – Laboratório de Mecânica dos Solos da Unipampa
LP – Limite de Plasticidade
MPa – MegaPascal
pH - Potencial de hidrogênio iônico
Psólidos – Peso dos Sólidos
RCS – Resistência à Compressão Simples
Sr – Grau de Saturação
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
Vsólidos – Volume dos Sólidos
 w_{ot} – Teor de Umidade Ótimo
 $\gamma_{d_{Max}}$ – Peso Específico Seco Máximo
 γ_s – Peso Específico Real dos Grãos
 γ_w – Peso Específico da Água

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1 Tema da Pesquisa	17
1.2 Delimitação do Tema.....	17
1.3 Formulação da Questão de Estudo	17
1.4 Definição dos Objetivos de Estudo	18
1.4.1 Objetivo Geral	18
1.4.2 Objetivos Específicos	18
1.5 Estrutura do Trabalho	19
2. Revisão Bibliográfica	20
2.1 Ensaio de Caracterização	20
2.1.1 Análise Granulométrica	20
2.1.1.1 Classificação dos Solos.....	22
2.1.2 Limite de Liquidez	25
2.1.3 Limite de Plasticidade.....	27
2.1.4 Índice de Plasticidade	27
2.1.5 Peso Específico Real dos Grãos	28
2.1.6 Ensaio de Compactação	29
2.2 Ensaio de Resistência	31
2.2.1 Resistência à Compressão Simples (RCS).....	31
2.3 Estabilização de Solo com Cal.....	32
2.3.1 A Cal.....	32
2.3.2 As Reações Solo-Cal	33
2.3.3 Solos Adequados para Estabilização com Cal	34
2.3.4 Alteração das Propriedades Mecânicas dos Solos com Adição de Cal	35
2.3.4.1 Plasticidade	35
2.3.4.2 Compactação	36
2.3.4.3 Resistência Mecânica.....	36
2.4 Estabilização dos Solos com Cinza de Casca de Arroz e Cal.....	36
2.4.1 Histórico da Utilização da Cinza de Casca de Arroz na Engenharia Civil.....	36
2.4.2 Características Gerais das Cinzas de Casca de Arroz.....	37
2.4.3 Temperatura de Incineração da Casca de Arroz.....	38

2.4.4 Solos Adequados para Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal	39
2.4.5 Efeitos da Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal nas Propriedades dos Solos.....	39
2.4.5.1 Plasticidade	39
2.4.5.2 Características de Compactação	40
2.4.5.3 Resistência.....	40
3. Materiais e Métodos	41
3.1 Materiais	41
3.1.1 Solo.....	41
3.1.2 Cal.....	43
3.1.3 Cinza de Casca de Arroz.....	44
3.1.4 Água.....	46
3.2 Metodologia	47
3.2.1 Coleta e Preparação do Solo	47
3.2.2 Dosagem e Mistura.....	48
3.2.3 Ensaio de Caracterização dos Solos.....	50
3.2.4 Ensaio de Compactação	53
3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	53
4. Análise e Interpretação dos Resultados	57
4.1 Ensaio de Caracterização do Solo Natural e das Misturas	57
4.2 Características de Compactação.....	66
4.3 Características de Resistência à Compressão Simples (RCS)	68
4.3.1 Influência do Tempo de Cura.....	70
4.3.2 Influência dos Teores de Cal e Cal+CCA.....	74
5. Conclusões e Sugestões	77
5.1 Conclusões	77
5.1.1 Com Relação aos Materiais Empregados	77
5.1.2 Quanto aos Ensaio de Consistência e Compactação.....	77
5.1.3 Quanto aos Resultados dos Ensaio de RCS.....	78
5.1.4 Conclusão Global	79
5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO A.....	87
ANEXO B	91

ANEXO C	98
ANEXO D	101
ANEXO E.....	105

1. Introdução

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a proporcionar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al, 2008). A busca por materiais, empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos, que se adaptem às especificações vigentes no Brasil representa um complexo problema que desafia os órgãos rodoviários locais. O conhecimento das potencialidades e das limitações dos materiais ocorrentes na natureza pode ajudar a solucionar o problema, favorecendo a possibilidade de escolha de soluções mais econômicas para a construção dessas camadas.

A estabilização do solo se torna uma grande alternativa para obras de pavimentação, principalmente em pavimentos de baixo tráfego. A resultante da estabilização dos solos é o bom desempenho e a durabilidade. A cal e o cimento Portland são os dois agentes estabilizadores mais amplamente empregados (BEHAK, 2007).

A cal usada em solos como estabilizadora data mais de 2000 anos (LAMBE, 1962). Atualmente, o melhoramento da estrutura de pavimentos é uma solução de baixo custo, isso, devido à ascendência na utilização e reutilização de diversos resíduos de processos produtivos industriais em obras de engenharia, que ocasiona benefícios econômicos e ambientais. As escórias de aciaria e as cinzas são as que mais têm destaque nesse ramo.

A casca é o mais abundante entre os subprodutos resultantes da produção agrícola e sua deposição final é um dos maiores problemas existentes nos países produtores de arroz. Segundo Vellupillai et al (1996), mais de 100 milhões de toneladas de casca de arroz são geradas no mundo a cada ano. No Brasil são produzidos em torno de 10 milhões de toneladas de arroz por ano e, o Estado do Rio Grande do Sul tem 49,5% de participação nessa produção. Segundo o Instituto Rio Grandense de Arroz (IRGA, 2011) o município de Alegrete/RS produz em média, aproximadamente, 437.000 toneladas de arroz por ano. Segundo Ali et al (1992), a cada 4 toneladas de arroz produzido, 1 tonelada é de casca. Portanto, em Alegrete são geradas, aproximadamente, 110.000 toneladas de casca de arroz anualmente.

A queima da casca de arroz produz cinza, o que reduz seu volume de resíduo, produzindo aproximadamente 20% em peso de cinza (Juliano, 1985). Portanto, surge o problema de deposição da cinza.

Na cidade de Alegrete existem grandes depósitos de solos arenosos, e segundo Juliano (1985), as areias e solos arenosos apresentam baixa atividade pozolânica frente à cal, pois são

pobres em sílica, portanto não reagem adequadamente. Então, geralmente, esses solos são estabilizados com cimento Portland, implicando, muitas vezes, em altos custos. Uma alternativa é substituir o cimento pela cal e adicionar a cinza da casca de arroz (CCA) que é rica em sílica (90 - 96%).

Procurando resolver esse problema propõe-se o estudo da estabilização de solos com cal acrescida de porcentagens CCA, analisando assim a melhoria da resistência através de ensaios de resistência a compressão simples (RCS) e a mudança de suas características através de ensaios de caracterização.

1.1 Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é:

Caracterização e melhoria das propriedades do solo de uma jazida da cidade de Alegrete, Estado do Rio Grande do Sul, através da inclusão de cal e cinza de casca de arroz (CCA).

1.2 Delimitação do Tema

O trabalho consiste no estudo de caso de caracterização e estabilização com cal e cinza de casca de arroz do solo proveniente de uma jazida localizada no município de Alegrete/RS, visando implantação desse solo melhorado em camadas de base e sub-base de pavimentos.

1.3 Formulação da Questão de Estudo

Quais são as características dos solos existentes na cidade de Alegrete/RS? O solo possui bom comportamento quando compactado? É possível utilizá-lo com camadas de base e sub-base de pavimentação? Se acrescentadas porcentagens de materiais como a cal e a cinza da casca de arroz o solo apresentará melhorias nas suas propriedades (resistência, plasticidade, compactação, etc...)?

1.4 Definição dos Objetivos de Estudo

Os objetivos deste estudo podem ser divididos em geral e específicos:

1.4.1 Objetivo Geral

Caracterizar o solo de uma jazida localizada na cidade de Alegrete/RS e estudar as características mecânicas do solo natural e avaliar o comportamento deste material quando acrescidas porcentagens de cal e cinza da casca de arroz.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- ✓ Fazer a caracterização do solo pertencente a uma jazida localizada no 6° Sub-distrito Estrada Alegrete/Catimbau, próximo ao Balneário Caverá, na cidade de Alegrete/RS;
- ✓ Iniciar a criação de um banco de dados com os parâmetros geotécnicos dos solos existentes na região;
- ✓ Demonstrar que a técnica de melhoramento do solo com cal e cinza de casca de arroz é uma alternativa tecnicamente viável para pavimentação de rodovias em regiões produtoras de arroz;
- ✓ Determinar as porcentagens da cal e CCA necessárias para que o solo local apresente as resistências mínimas exigidas pela normatização vigente para a sua aplicação em camadas de base de pavimentos;
- ✓ Estudar o ganho de resistência que o solo apresenta com a inclusão de diferentes porcentagens de CCA e Cal;
- ✓ Estudar a influência que o tempo de cura exerce sobre as amostras moldadas em laboratório;
- ✓ Verificar a influência da inclusão de porcentagens cal e CCA na granulometria, limites de consistência e peso específico real dos grãos;

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho se divide em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Apresenta a introdução, o tema da pesquisa, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Apresenta a revisão de estudos antecedentes de estabilização de solos com cal e CCA, visando à compreensão dos fenômenos químicos e físicos da estabilização de solos, e as modificações das propriedades mecânicas e físicas das misturas.

Capítulo 3 – Apresenta os métodos empregados para atingir os objetivos propostos, bem como a descrição dos materiais utilizados.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas solo com cal e solo com cal e CCA. São realizadas comparações entre o solo natural e as misturas estudadas. Analisam-se as modificações dos parâmetros físicos e mecânicos das diferentes misturas.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

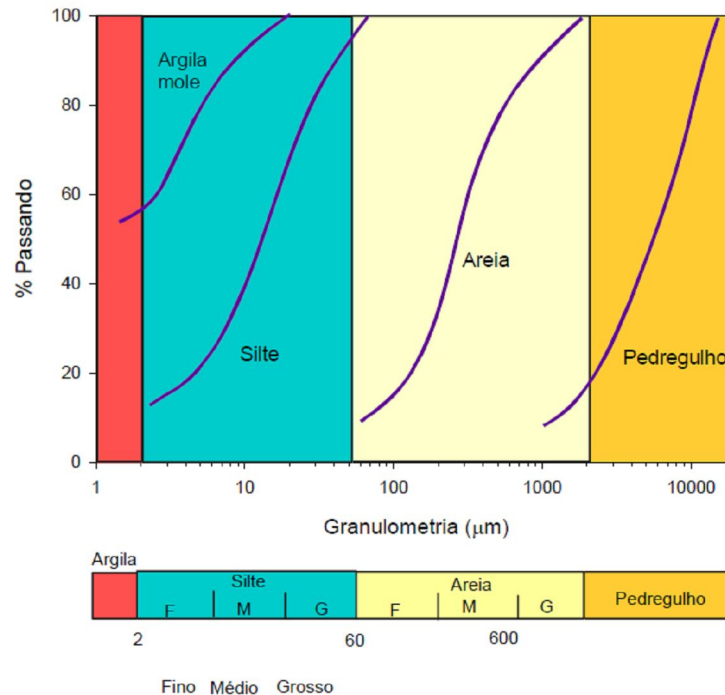
Neste capítulo serão abordados de forma sucinta os assuntos que serviram de embasamento à pesquisa. Enfatizam-se os mecanismos de estabilização e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do solo natural e do solo com a adição de cal e CCA, visando o emprego nas camadas de base e sub-base de pavimentos. São abordados também os ensaios e classificações necessárias para caracterizar o solo natural e as misturas.

2.1 Ensaio de Caracterização

2.1.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões e frequência das partículas que compõe o solo. O ensaio de análise granulométrica é normatizado pela NBR 7181/1984, que prescreve o método de análise granulométrica do solo, por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

Segundo Pinto (2002), nem sempre é fácil identificar as partículas de um solo porque grãos de areia, por exemplo, podem estar envoltos por uma grande quantidade de partículas argilosas, finíssimas, apresentando o mesmo aspecto de uma aglomeração formada exclusivamente por essas partículas argilosas. Um exemplo de curvas de distribuição granulométrica pode ser vista na Figura 1.



(Fonte: Ortigão, 2007)

FIGURA 1 - Exemplo de curva de Distribuição Granulométrica

A interpretação dos resultados é feita mediante comparação com escalas granulométricas padrões. A escala mais simples e fácil de ser memorizada está incluída na Figura 1. Baseia-se nos algarismos 2 e 6, conforme indicado no Quadro 1 (ORTIGÃO, 2007).

QUADRO 1
Escala Granulométrica

Descrição	Diâmetro das Partículas
Argila	< 2μm
Silte	2 a 60μm
Areia Fina	60 a 200μm
Areia Média	200 a 600μm
Areia Grossa	600 a 2mm
Pedregulhos	> 2mm

(Fonte: Ortigão, 2007)

A análise por peneiramento tem por limitação a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. A menor peneira costumeiramente empregada é a peneira nº 200 (abertura de 0,075mm). Quando há interesse em conhecer a distribuição granulométrica da porção mais fina dos solos, emprega-se a técnica da sedimentação (PINTO, 2002).

Detalhes do ensaio podem ser encontrados em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.1.1.1 Classificação dos Solos

A curva granulométrica em si não é suficiente para o conhecimento do solo em estudo, é preciso classificá-lo sob o ponto de vista da engenharia, estimando o comportamento do solo e permitindo uma análise mais detalhada (PINTO, 2002).

Existem diversas formas de classificar os solos, como pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, pela estrutura, pelo preenchimento de vazios. Os sistemas baseados no tipo e no comportamento das partículas que constituem o solo são os mais conhecidos na engenharia de solos. Esses sistemas têm como objetivo a definição de grupos que apresentam comportamentos semelhantes sob os aspectos de interesse da engenharia civil. Nestes sistemas, os índices empregados são geralmente a composição granulométrica e os índices de Atterberg.



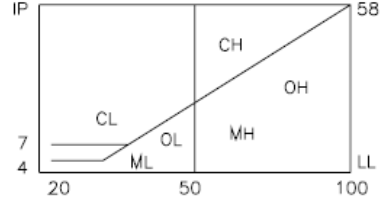
O Sistema de Classificação Unificada foi elaborado pelo Professor Casagrande. Nesse sistema todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como apresentado no Quadro 2. As cinco letras superiores indicam o tipo principal de solo e as quatro seguintes correspondem a dados complementares dos solos. Para esta classificação o primeiro aspecto a considerar é a porcentagem de finos presentes no solo, considerando-se finos o material que passa na peneira n° 200 (0,075mm), definindo assim se o solo será de granulação grosseira ou fina (PINTO, 2002).

QUADRO 2
Terminologia do Sistema Unificado

G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo Orgânico
W	Bem Graduado
P	Mal Graduado
H	Alta Compressibilidade
L	Baixa Compressibilidade
Pt	Turfas

(Fonte: Pinto, 2002)

A Figura 2 mostra o esquema utilizado para a classificação dos solos pelo Sistema Unificado.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC GM 
	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 12		SC SM 	
5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

(Fonte: Pinto, 2002)

FIGURA 2 - Esquema para Classificação pelo Sistema Unificado

Segundo (PINTO, 2002), para melhor identificar os solos granulares é necessário saber uma característica secundária, para então, definir o solo como “bem graduado”, “mal

graduado” ou “uniforme”. Esta característica é expressa pelo “coeficiente de não uniformidade”, definido pela Equação 1.

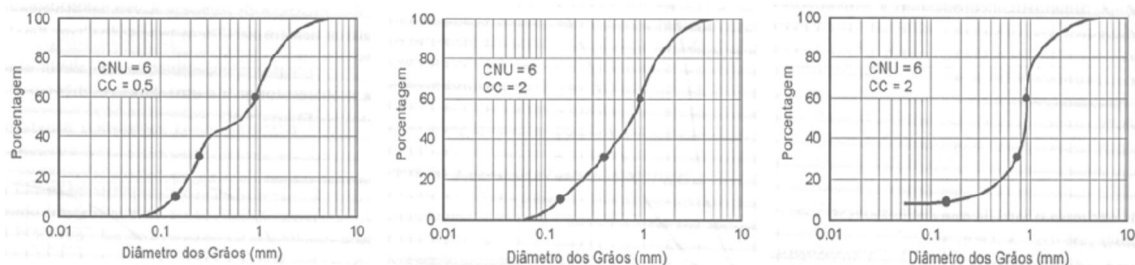
$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Onde “ D_{60} ” é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e, analogamente, “ D_{10} ” é o diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à percentagem que passa igual a 10%. Quanto maior o CNU, mais bem graduada é a areia. Areias com CNU menores do que 2 são chamadas de areias uniformes (PINTO, 2002).

Outro coeficiente, não tão empregado quanto o CNU, é o “coeficiente de curvatura”, definido pela Equação 2.

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

Se o coeficiente de não uniformidade indica a amplitude do tamanho dos grãos, o coeficiente de curvatura detecta o melhor formato da curva granulométrica. Considera-se que um material é bem graduado quando CC está entre 1 e 3. Na Figura 3 estão representadas curvas de três areias com CNU=6 e CC diferentes. Quando CC é menor que 1 a curva tende a ser descontínua; há falta de grãos de um certo diâmetro. Quando CC é maior que 3, a curva tende a ser muito uniforme na parte central. Ao contrário das outras duas, quando o CC está entre 1 e 3, a curva granulométrica se desenvolve suavemente (PINTO, 2002).



(Fonte: Pinto, 2002)

FIGURA 3 - Curvas Granulométricas de Areias com Diferentes Coeficientes de Curvatura

Outro sistema muito comumente utilizado para classificação de solos é o Sistema Rodoviário de Classificação, o qual também é baseado na granulometria e nos limites de

Atterberg. Nesse Sistema, também se inicia a classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200. O sistema é dividido em grupos e sub-grupos, que vão desde solos grossos até solos finos (PINTO, 2002).

A Figura 4 mostra o esquema para classificação pelo sistema rodoviário.

		% P#10 2,0mm	% P#40 0,42mm	% P#200 0,075mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	<50	<30	<15	<6
	A-1b		<50	<25	<6
	A-3	>50	<10	NP	
	A-2	IP			
		A-2-4			
A-2-5					
A-2-6					
A-2-7					
% P #200 > 35	A-4	IP			
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				
	A-7-5				
A-7-6					

(Fonte: Pinto, 2002)

FIGURA 4 - Esquema para Classificação pelo Sistema Rodoviário

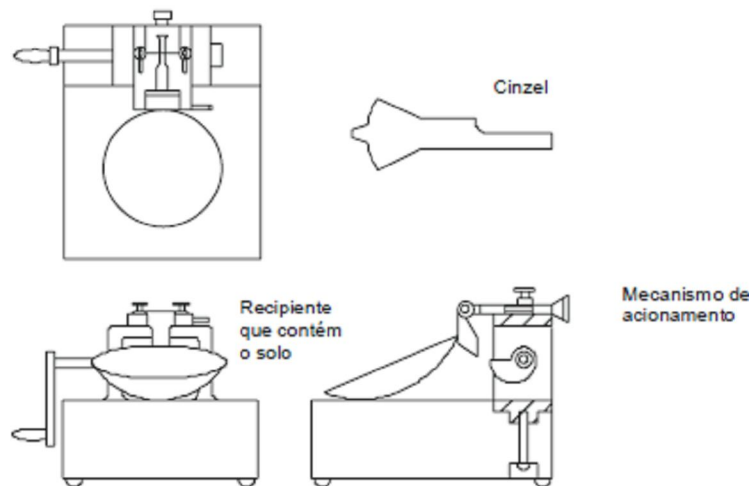
Acompanhando a sistemática de classificação pelos dois sistemas apresentados, verifica-se que eles são bastante semelhantes, considerando a predominância de grãos miúdos e graúdos e dando ênfase à curva granulométrica.

Detalhes podem ser encontrados em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.1.2 Limite de Liquidez

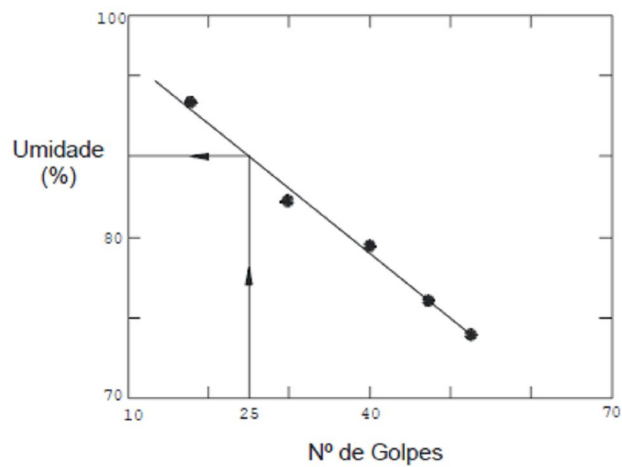
O Limite de Liquidez (LL) é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico; é a umidade de transição entre o estado líquido e o estado plástico. O ensaio de Limite de Liquidez (Figura 5) é normatizado pela NBR 6459/84 e

resultados são plotados conforme o indicado na Figura 6, determinando-se o valor de LL correspondentes a 25 golpes (ORTIGÃO, 2007).



(Fonte: Ortigão, 2007)

FIGURA 5 - Aparelho de Casagrande para Determinação do Limite de Liquidez



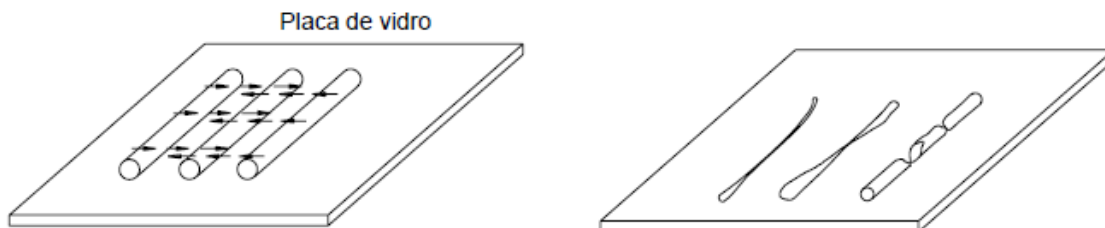
(Fonte: Ortigão, 2007)

FIGURA 6 - Gráfico de Número de Golpes x Umidade – Determinação do LL

Maiores informações sobre o ensaio podem ser encontradas em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.1.3 Limite de Plasticidade

O Limite de Plasticidade (LP) é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço; é a umidade de transição entre o estado plástico e o estado semi-sólido do solo. O Limite de Plasticidade é determinado seguindo as prescrições da NBR 7180/84. O ensaio consta da determinação da umidade correspondente ao início do fraturamento de uma amostra cilíndrica de 3mm de diâmetro. A amostra é rolada com a mão, em movimento de vai e vem, determinando-se a umidade na qual ela começa a se partir. Esse procedimento é ilustrado na Figura 7.



(Fonte: Ortigão, 2007)

FIGURA 7 - Determinação do Limite de Plasticidade

Maiores informações sobre o ensaio podem ser encontradas em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.1.4 Índice de Plasticidade

Segundo Pinto (2002), dos diversos índices, relacionando os limites de liquidez, de plasticidade e às vezes o teor de umidade do solo, o mais utilizado atualmente é o índice de plasticidade (IP). Fisicamente ele representa a quantidade de água que é necessária acrescentar a um solo, para que ele passasse do estado plástico ao líquido. Sendo definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, portanto, temos:

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Este índice determina o caráter de plasticidade de um solo, assim, quando maior o IP, tanto mais plástico será o solo. Na Tabela 1 estão apresentados resultados típicos dos Limites de Atterberg de alguns solos brasileiros.

TABELA 1
Limites de Atterberg de Alguns Solos Brasileiros

Solos	LL (%)	LP (%)
Residuais de arenito (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaise	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 40	5 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

(Fonte: Pinto, 2002)

2.1.5 Peso Específico Real dos Grãos

O peso específico real dos grãos é uma característica dos sólidos. Relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume. É expresso pelo símbolo γ_s . O peso específico real do solo é determinado segundo orientações da NBR 6508/84. Coloca-se um peso conhecido do solo num picnômetro e, completa-se com água, determinando seu peso total. O peso do picnômetro completado só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituído pelo solo. Deste peso, calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, tem-se o peso específico (PINTO, 2002). O peso específico real dos grãos é definido pela equação (4), apresentada abaixo.

$$\gamma_s = \frac{P_{sólidos}}{V_{sólidos}} \quad (4)$$

E por fim, define-se a densidade real dos grãos (G_s), pela equação (5), sendo γ_w o peso específico da água.

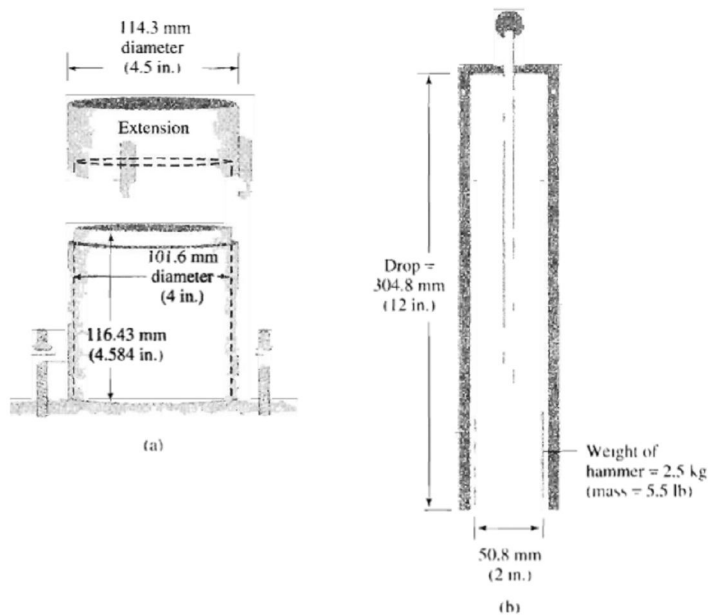
$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (5)$$

Maiores informações sobre o ensaio podem ser encontradas em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.1.6 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação tem por objetivo determinar o peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo ensaiado. Consiste em aumentar a massa específica aparente de um solo pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão do ar. O ensaio de compactação é realizado através de um cilindro Proctor (normal, intermediário ou modificado), segundo metodologia descrita na NBR 7182/86.

O ensaio de compactação desenvolvido por Proctor foi normalizado pela A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials) e é conhecido como ensaio de Proctor ou como A.A.S.H.O Standard. A Figura 8 mostra os equipamentos utilizados na realização do ensaio de compactação.



(Fonte: Das, 2006)

FIGURA 8 - Equipamentos do Ensaio de Compactação

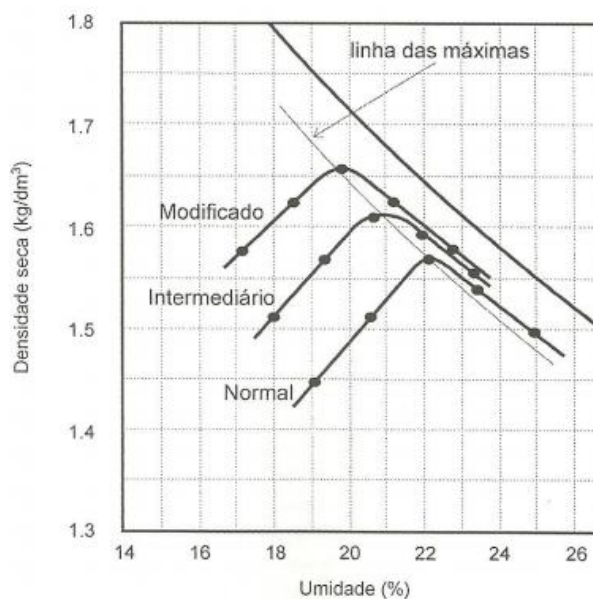
As características das diferentes energias de compactação são mostradas no Quadro 3 (PINTO, 2002).

QUADRO 3
Energias de Compactação Utilizadas nos Ensaios

Cilindro	Características de Energia de Compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	pequeno	grande	grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes	26	21	27
Grande	Soquete	grande	grande	grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

(Fonte: Pinto, 2002)

Um mesmo solo, quando compactado com energias diferentes, apresentará valores de peso específico aparente seco máximos maiores e teores de umidades ótimas menores, para valores crescentes dessa energia, logo, o ponto se deslocará para cima e para esquerda, conforme Figura 9 (PINTO, 2002).



(Fonte: Pinto, 2002)

FIGURA 9 - Curvas de Compactação de um Solo com Diferentes Energias

Mais detalhes sobre os procedimentos desse ensaio podem ser encontrados em Caputo (1988), Pinto (2002), Das (2006) e Ortigão (2007).

2.2 Ensaio de Resistência

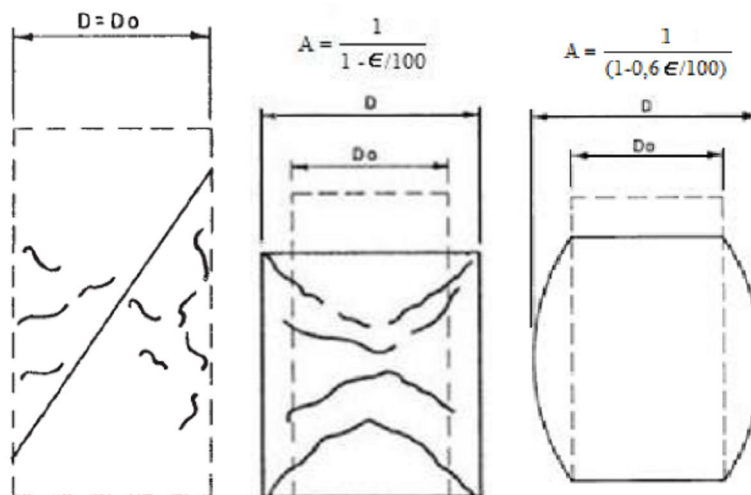
2.2.1 Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de compressão simples consiste em submeter um corpo-de-prova cilíndrico a um carregamento axial até a ruptura do mesmo. Esse ensaio é utilizado para determinar a resistência à compressão simples do concreto, conforme NBR 5739/94. Nessa, entre outras recomendações, está especificado a velocidade de carregamento do ensaio que é de $0,45 \pm 0,15$ MPa. Como se trata de um material que possui elevada rigidez, no ensaio de compressão simples o controle do avanço do prato da prensa não é por deslocamento, mas por velocidade de carregamento (MOURA, 2009).

Segundo o autor, os solos empregados na pavimentação apresentam elevada deformação quando submetidos a uma determinada carga, se comparados com concreto, Assim, pode-se determinar a resistência à compressão simples controlando-se a velocidade pelo deslocamento do prato da prensa. Sugere-se a velocidade relativamente baixa, 1,0 mm/min.

Moura (2009) ainda relata que a relação entre a altura (h) e diâmetro (d) do corpo-de-prova, recomendado é de 2:1, entretanto, pode-se determinar a resistência à compressão simples de corpos-de-prova com relações diferentes, nessas condições é recomendada a correção dos resultados.

A Figura 10 demonstra as formas de ruptura possíveis de ocorrer durante o ensaio de RCS, de acordo com a ASTM D5102/66, e apresenta a correlação dos valores da área da seção transversal (D_0), obtida após a moldagem dos corpos-de-prova, com o valor da área da seção transversal correspondente (D), 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 utilizou-se a correlação $D=D_0$ (ARAÚJO, 2009).



(Fonte: ASTM D5102/66)

FIGURA 10 - Forma de Ruptura para as Amostras Submetidas ao Ensaio de RCS

2.3 Estabilização de Solo com Cal

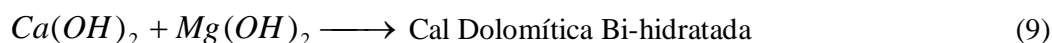
2.3.1 A Cal

A cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. O resultado da calcinação é o óxido de cálcio (CaO) e o cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominado genericamente de cal virgem ou cal aérea ou cal viva (GUIMARÃES, 2002). Segundo o mesmo autor, a cal hidratada resulta do processo industrial que dá origem a cal virgem. A reação química que a produz, com a presença da água, é uma clássica “reação de fases sólido-liquída”. Obtém-se como resultado da reação exotérmica o (Ca(OH)₂), conhecida como cal hidratada.

As reações de formação da cal viva e da cal hidratada são resumidas pelas Equações 6 e 7.



Segundo Behak (2007) a Equação 6 mostra a reação de formação da cal viva pela calcinação de carbonato de cálcio. Enquanto a Equação 7 mostra a reação de hidratação que forma a cal hidratada cálcica. Além dessa cal, chamada de cal cálcica, pode-se ter cais dolomíticas (ricas em magnésio). Essas cales são misturas de óxidos ou hidróxidos de cálcio e magnésio, como mostradas nas Equações 8 e 9.



A cal cálcica pode ter até 5% de óxido ou hidróxido de magnésio, enquanto esses teores na cal dolomítica variam entre 35% e 46% (NLA, 2004).

Segundo Guimarães (2002), a composição das cales comercializadas no Brasil possuem os valores médios apresentados na Tabela 2.

TABELA 2
Valores Médios da Composição das Cales no Brasil

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO+MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)	Perda ao Fogo (%)
Cal Virgem Cálcica	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96,0-98,5	-	0,5-5,0
Cal Hidratada Cálcica	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	1,5-3,5	1,0-0,0	96,0-98,5	0,5-1,8	23-27
Cal Hidratada Dolomítica	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	5-25	19-27
Cal Virgem Dolomítica	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,5-4,5	0,05-0,1	76-99	-	0,5-4,8

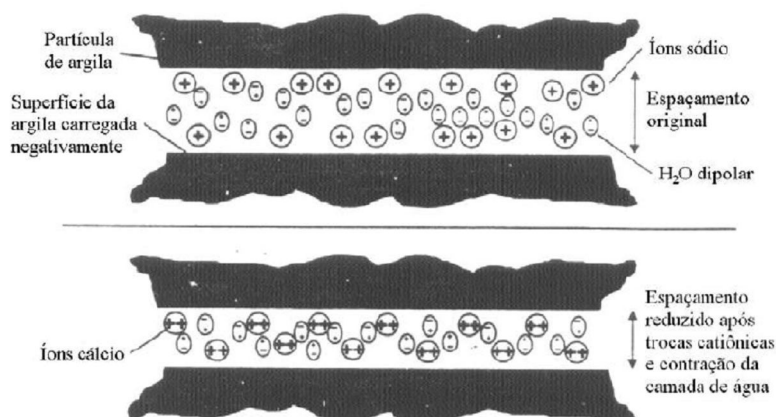
(Fonte: Guimarães, 2002)

2.3.2 As Reações Solo-Cal

A estabilização solo-cal se baseia nas interações dos elementos presentes nos solos (de acordo com sua mineralogia), dos componentes do meio ambiente (temperatura, água e ar) e da cal adicionada (cálcio ou magnésio). Esses fatores envolvem as trocas catódicas,

floculação-aglomeração, reações pozolânicas e carbonatação (BHATTACHARJA et al, 2003).

A troca catiônica e a floculação-aglomeração acontecem rapidamente após a adição de cal, em presença da água, sendo chamada de fase rápida. Essas reações são chamadas de melhoramento, pois só modificam as propriedades físicas dos solos (plasticidade, textura, trabalhabilidade, estabilidade volumétrica) sem aumento considerável da resistência. O processo de troca de cátions é mostrado na Figura 11.



(Fonte: Prusinski e Bhattacharja, 1999)

FIGURA 11- Mecanismo de Troca de Cátions

As reações pozolânicas iniciam-se algumas semanas após a adição de cal, em presença de água, e se desenvolvem em um longo período de tempo, podendo levar anos. Estas são chamadas de fase lenta da estabilização alcalina. As reações pozolânicas formam produtos cimentícios, responsáveis pelo aumento da resistência e da durabilidade das misturas solo-cal, constituindo a estabilização propriamente dita. A carbonatação é uma reação, geralmente não desejada, já que produz cimentos fracos, prejudiciais ao processo de estabilização (BEHAK, 2007).

2.3.3 Solos Adequados para Estabilização com Cal

A composição do solo e a química do solo são os fatores que determinam o teor de cal necessário para estabilizá-lo. Petry e Glazier (2005) destacam que o grau de alteração do solo, pH solo-água, concentração de cátions de base, concentração de sílica-alumina, teor de sulfatos e teor de matéria orgânica são os principais fatores que influenciam nas reações.

De acordo com Epps, Dunlap e Gallaway (1971) a cal reage com solos médios, moderadamente finos e finos. Quanto mais fino for o solo mais favorecido vai ser, diminuindo a plasticidade, melhorando a trabalhabilidade, reduzindo expansão e aumentando a resistência.

Arabani e Veis Karami (2005) determinaram que para maiores teores de argilas, o incremento das resistências à tração e à compressão foi significativo. Porém, observaram quedas na resistência à compressão para teores de argila maiores que 30%. Como conclusão, os autores definem o teor ótimo de argila em um determinado solo como sendo aquele com que produz a máxima resistência à tração e à compressão.

2.3.4 Alteração das Propriedades Mecânicas dos Solos com Adição de Cal

As alterações das propriedades físicas e mecânicas da adição de cal ao solo dependem do tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, temperatura, do processo e tempo de cura. As melhorias são apresentadas na plasticidade, trabalhabilidade, estabilidade volumétrica, condutividade hidráulica, resistência e comportamento tensão-deformação. A resistência da mistura depende do tipo de solo e de cal, do teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1976).

2.3.4.1 Plasticidade

Segundo Herrin e Mitchell (1961), a plasticidade do solo é alterada na presença de cal. Pequenos teores aumentam o Limite de Plasticidade (LP) e podem diminuir ou aumentar o Limite de Liquidez (LL), dependendo do tipo de solo. A combinação dos dois diminui o Índice de Plasticidade (IP). De acordo com Basma e Tincer (1991), à medida que o IP diminui com o aumento do teor de cal, o Limite de Contração (LC) aumenta. Os autores observaram que a cura da mistura não tem efeito na modificação das propriedades plásticas, sendo a troca catiônica e a floculação as causas da mudança nos limites de consistência.

2.3.4.2 Compactação

A relação teor de umidade - peso específico é alterado na presença de cal no solo. O teor de umidade ótimo (w_{ot}) aumenta e o peso específico seco máximo ($\gamma_{d_{máx}}$) diminui para uma mesma energia de compactação (TRB, 1987).

Osinubi (1998) observou a diminuição do peso específico seco máximo e da umidade ótima à medida que o tempo de espera entre mistura e compactação aumenta o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e floculação que diminuem a água disponível no sistema.

O peso específico seco não é influenciado pelo tipo de cal. Porém, a umidade ótima é mais elevada quando utilizar cal viva no lugar de cal hidratada (LIMA et al, 1993).

2.3.4.3 Resistência Mecânica

A resistência é geralmente avaliada pelos ensaios de compressão simples, compressão triaxial, compressão diametral e Índice de Suporte Califórnia (ISC). As resistências aumentam devido à estabilização com cal, porém, a cal em excesso pode diminuir as resistências (LITTLE, 1999).

O tempo de cura interfere na resistência, aumentando com a idade. No começo do período há um aumento rápido na resistência, mas ao progredir a cura a velocidade de aumento da resistência torna-se cada vez menor (HERRIN E MITCHELL, 1961).

Segundo Mendonça et al (1996), a atividade pozolânica entre a cal e o solo está ligada a temperatura de cura. Em temperaturas baixas, o aumento de resistência é pequeno, aumentando conforme a elevação da temperatura.

2.4 Estabilização dos Solos com Cinza de Casca de Arroz e Cal

2.4.1 Histórico da Utilização da Cinza de Casca de Arroz na Engenharia Civil

Vários pesquisadores citados por Behak (2007) conseguiram desenvolver técnicas com a Cinza de Casca de Arroz (CCA) aplicável na Engenharia Civil, dentre elas pode-se destacar: adição de CCA para telhas de blocos de cimento de alta qualidade; tijolos isoladores provenientes das misturas de cimento e CCA; CCA e cal como estabilizadores de argilas

sedimentares; manufaturação de cimentos com base em CCA; estabilização de solos com CCA e cal ou cimento; utilização da CCA como cimento para concretos convencionais e de alto desempenho.

Portanto, a CCA com o passar dos anos adquiriu espaço na Engenharia Civil, tornando-se um material de grande utilização e com bom desempenho no ramo.

2.4.2 Características Gerais das Cinzas de Casca de Arroz

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta aproximadamente de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica (METHA, 1992). Quando queimada, a lignina e a celulose podem ser removidas, resultando em uma estrutura celular e porosa, como mostrado na Figura 12.



(Fonte: SILVEIRA E RUARO, 1995)

FIGURA 12- Micrografia Eletrônica de Varredura da CCA Queimada a 560°C

Segundo Ali et al (1992), o teor de sílica na casca de arroz depende da variedade de arroz, tipo de solo, condições climáticas, temperatura e práticas agrícolas (aplicação de fertilizantes, inseticidas, etc.).

Korisa (1958), Lazaro e Moh (1970) e Basha et al (2003) determinaram a composição química de várias CCA (Tabela 3).

TABELA 3
Composição Química de Várias CCA

Composição Química (%)	Korisa (1958)		Lazaro e Moh (1970)	Basha (2003)
	Amostra 1	Amostra 2		
Silica (SiO ₂)	94,50	93,50	88,60	93,15
Óxido de Cálcio (CaO)	0,25	2,28	0,75	0,41
Óxido de Magnésio (MgO)	0,23	---	3,53	0,45
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,78	---	---	---
Potássio (K ₂ O)	1,10	3,15	---	2,31
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	Traços	1,01	0,36	0,21
Óxido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,53	---	---	---
Alumina (Al ₂ O ₃)	Traços	Traços	1,48	0,21
Óxido de Manganês (MnO ₂)	Traços	Traços	---	---
Dióxido de Carbono (CO ₂)	---	---	0,51	---

(Fonte: Korisa, 1958; Lazaro e Moh, 1970; Basha et al, 2003)

2.4.3 Temperatura de Incineração da Casca de Arroz

As propriedades da CCA dependem do processo de queima, sendo que a qualidade da casca depende da temperatura e tempo de incineração, do tempo de resfriamento e das condições de moenda (JAMES E RAO, 1986).

Boateng e Skeete (1990) afirmam que o tipo de cinza apropriada para as reações pozolânicas é a amorfa. A incineração da casca de arroz em uma faixa de temperatura de 550°C a 700°C é geralmente determinada para produzir sílica amorfa, entretanto temperaturas além de 900°C produzem formas cristalinas. Segundo os mesmos autores, as transformações estruturais a diferentes temperaturas afetam a reatividade da CCA já que quanto maior a superfície específica da sílica, maior o alcance das reações químicas da cal.

Quando queimada a céu aberto ou em fornos convencionais, a casca produz cinza silícea cristalina. Porém, quando incinerada em fornos a temperatura controlada, o resíduo é uma cinza branca altamente reagente que misturada com cal se transforma em um cimento estrutural tão bom quanto o cimento Portland (METHA, 1975).

2.4.4 Solos Adequados para Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM, 1998) a CCA composta com mais de 90% por sílica (SiO_2) é uma pozolana. Os solos arenosos com pouca argila não reagem satisfatoriamente à cal. Para estabilizá-los a adição de CCA e cal pode ser uma boa alternativa (BEHAK, 2007). Muntohar e Hantoro (2000) analisaram o efeito sobre as propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso e concluíram que as propriedades foram melhoradas.

2.4.5 Efeitos da Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal nas Propriedades dos Solos

A adição de CCA conjuntamente com a cal ou o cimento a solos arenosos ou areno-siltosos altera suas propriedades físicas e mecânicas, ocasionando melhorias na plasticidade, resistência, tensão-deformação e durabilidade. Essas alterações dependem do tipo de solo, tempo de incineração da casca, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura (BEHAK, 2007).

2.4.5.1 Plasticidade

Rahman (1986) estudou os Limites de Atterberg de um solo laterítico, comparando os resultados para o solo natural com o solo estabilizado com CCA e cal. Na opinião do autor, a adição de CCA e cal a solos finos causam a flocculação do solo, produzindo a diminuição do Índice de Plasticidade.

Basha et al (2003) também estudou a estabilização com CCA de um solo residual fino, concluindo que os teores ótimos de CCA reduzem a plasticidade do solo de 10% a 15%.

Muntohar e Hantoro (2000) pesquisaram os efeitos da estabilização com CCA e cal nas propriedades de um solo silto-argiloso e observaram que a densidade real dos grãos decresce à medida que é adicionada CCA, o mesmo acontece ao fixar-se o teor de CCA e aumentar o teor de cal.

2.4.5.2 Características de Compactação

Segundo Behak (2007), as misturas solo+CCA+cal apresentam menor peso específico aparente máximo ($\gamma_{d_{Max}}$) e maior teor de umidade ótima (w_{ot}) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que aumenta o teor de cal diminui o $\gamma_{d_{Max}}$.

Ali et al (1992) estudou os efeitos nos parâmetros de compactação da estabilização de CCA e cal ou cimento de uma areia argilosa. O autor descobriu que o decréscimo do $\gamma_{d_{Max}}$ da mistura é devido à baixa densidade real dos grãos da CCA. O aumento da w_{ot} pode ser devido à absorção de água pela CCA.

2.4.5.3 Resistência

Ali et al (1992) pesquisou a evolução da resistência à compressão simples (RCS) com a estabilização de uma areia argilosa com CCA e cal. A RCS aumenta rapidamente com a adição de CCA até atingir um máximo. Porém, teores de CCA além do ótimo podem diminuir a resistência, devido a diminuição do $\gamma_{d_{Max}}$ pela presença de CCA. Segundo resultados do autor, a resistência das misturas solo+cal pode ser aumentada adicionando 6% a 12% de CCA.

A RCS máxima de um solo argiloso melhorado com CCA e cal foi alcançada com as porcentagens de 80% de solo + 10% Cal + 10% CCA (MUNTOHAR E HANTORO, 2000).

Ali et al (1992) também comparou o ganho de RCS do solo areno-argiloso estabilizado com CCA+cal e CCA+cimento, fixando em 12% o teor de CCA. Com isso, observou que a cal propicia maiores ganhos de resistência do que o cimento nas misturas solo+CCA. O mesmo autor concluiu que o aumento da temperatura de cura aumenta a RCS do solo+Cal+CCA.

Muntohar e Hantoro (2000) determinaram o Índice de Suporte Califórnia (ISC) de um solo argiloso estabilizado com CCA e cal e concluíram que os valores de ISC para diferentes teores de CCA, com teor de cal constante, não diferiram significativamente. Por outro lado, Basha et al (2003) observou uma diminuição nos valores de ISC das misturas solo silto-arenosas-CCA. Portanto, segundo os autores a CCA não é apropriada como estabilizante por si só.

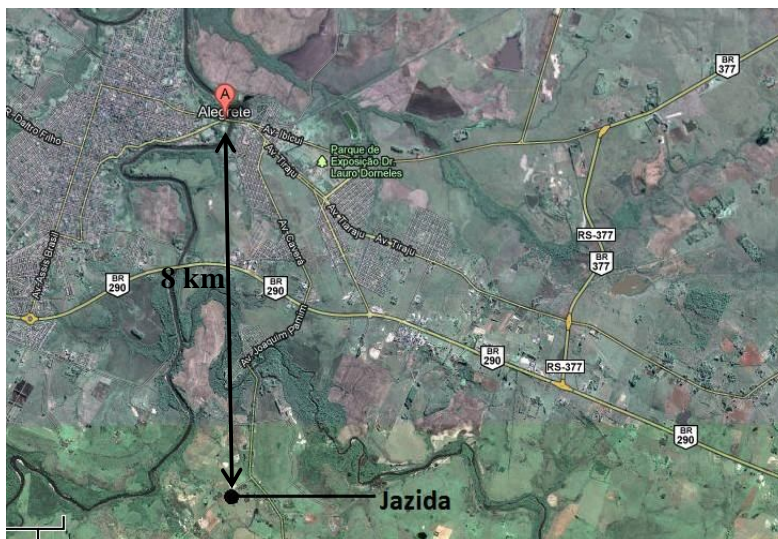
3. Materiais e Métodos

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.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado em jazida localizada no 6° Sub-distrito Estrada Alegrete/Catimbau, próximo ao Balneário Caverá, a aproximadamente 8 km do centro da cidade de Alegrete, Estado do Rio Grande do Sul (Figura 13). Essa jazida pertence à empresa Pedra Rosada e o solo é utilizado em obras correntes na cidade de Alegrete e Região.



(Fonte: Google Earth, em 06/12/2011)

FIGURA 13 - Localização da Jazida

O solo local (Figura 14) é arenoso de granulometria fina a média, apresenta coloração avermelhada e possui baixo teor de umidade natural.



FIGURA 14 - Coleta de Solo

A Figura 15 apresenta a vista superior da jazida, onde o solo foi coletado em dois locais, pontos 893 e 884. Já, a Tabela 4 mostra as coordenadas obtidas em alguns pontos da jazida através de GPS (georeferenciamento).



(Fonte: Google Earth, em 06/12/2011)

FIGURA 15 - Localização da Jazida Georeferenciada

TABELA 4
Coordenadas Geográficas dos Pontos da Jazida

Ponto	Coordenadas
884	S29°50'15,5"
	WO55°46'28,4"
893	S29°50'11,7''
	WO55°46'27,8''
892	S29°50'13,4''
	WO55°46'30,9''
889	S29°50'16,2''
	WO55°46'26,8''
895	S29°50'12,8''
	WO55°46'22,5''
894	S29°50'10,2''
	WO55°46'24,4''

3.1.2 Cal

A cal utilizada na pesquisa trata-se de uma cal hidratada especial comercial classificada na classe CH-II e atende aos requisitos impostos pela NBR 7175/2003. A cal hidratada especial CH-II FIDA é uma cal dolomítica com altos teores de cálcio e magnésio. Obtida através da calcinação do calcário em fornos com temperaturas entre 900°C e 1000°C.

A cal utilizada é comercializada na cidade de Alegrete e segundo ficha de informações da empresa FIDA, esta cal é aplicável à estabilização de solos. A Figura 16 ilustra a embalagem do material.



(Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos Unipampa, em 23/04/2012)

FIGURA 16 - Cal Hidratada Especial – CH II

3.1.3 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz empregada na pesquisa foi cedida pela CAAL (Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda.), localizada no município de Alegrete, Estado do Rio Grande do Sul. A queima da casca de arroz no forno ou secagem do arroz não é feita à temperatura controlada.

Segundo Relatório de Ensaio, N° 26305/15.11 realizado pela Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda., no dia 04 de Abril do ano de 2011, as cinzas que resultam da combustão das cascas de arroz apresentam uma composição baseada em 96% de sílica, podendo esta apresentar diferentes formas cristalinas ou amorfas. Segundo relatório, a cinza é classificada como resíduo não inerte – Classe II-A da NBR 10004/2004. A composição química é apresentada no Quadro 4 .

Salienta-se que os resultados do relatório são para amostras queimadas em determinada época, e que as cinzas utilizadas na pesquisa não são as mesmas ensaiadas, logo como não há controle de queima não é possível dizer qual é a porcentagem de sílica existente na CCA utilizada nos ensaios.

QUADRO 4
Composição Química da CCA

Parâmetros	Resultados (%)
Matéria Orgânica	9,90
Cinzas	89,60
Umidade	0,50
pH	8,89

(Fonte: Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda., 2011)

A cinza de casca de arroz é queimada nas caldeiras de um galpão da empresa, como mostrado na Figura 17.



(Fonte: Empresa CAAL, em 06/01/2012)

FIGURA 17 - Filtro da Empresa CAAL

A cinza de casca de arroz foi coletada diretamente dos silos de armazenamento da CAAL. Ela tem coloração escura, devido à quantidade de matéria orgânica, porém está livre de impurezas (galhos, folhas, etc.), como mostrada na Figura 18.



FIGURA 18 - Cinza de Casca de Arroz da CAAL

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM, 1998) a CCA composta com mais de 90% por sílica (SiO_2) é uma pozolana. As cinzas da casca de arroz que apresentam coloração clara possuem um maior teor de sílica. Por se tratar de uma cinza de coloração escura acredita-se que a cinza utilizada nos ensaios possui baixa atividade pozolânica, a mesma foi moída no Moinho de Abrasão Los Angeles para utilização nos ensaios, tendo dupla função, aumento da resistência do solo (parcela de pozolana) e melhoramento da granulometria com a inclusão de cinza moída. A Figura 19 apresenta a cinza após moagem no laboratório.



FIGURA 19 - Cinza de Casca de Arroz Moída

3.1.4 Água

Utilizou-se água destilada para produção das misturas solo+cal, solo+cal+CCA e para o solo no estado natural na realização dos ensaios de Limite de Plasticidade, Limite de

Liquidez, Peso Específico Real dos Grãos, Compactação e Resistência à Compressão Simples. Os ensaios de laboratório foram efetuados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unipampa (LMSU), onde no mesmo local foi realizado o processo de destilação de água proveniente do sistema de abastecimento urbano da cidade de Alegrete, RS.

3.2 Metodologia

A principal hipótese a testar na pesquisa foi verificar se a estabilização de solos arenosos com cinza de casca de arroz e cal produz materiais mais resistentes e duráveis, visando sua utilização em camadas de pavimentos.

Além disso, procura-se efetuar o melhoramento do solo com inclusão de porcentagens de cal e cinza de casca de arroz e realizar novamente os ensaios de caracterização, visando estudar a alteração das propriedades do solo, na granulometria, nos Limites de Atterberg e Peso Específico Real dos Grãos.

3.2.1 Coleta e Preparação do Solo

As amostras do solo foram coletadas com auxílio de uma pá, na quantidade necessária para serem realizados os ensaios laboratoriais. As amostras indeformadas coletadas foram cuidadosamente armazenadas em cápsulas metálicas, envoltas de um filme de PVC e papel alumínio para evitar a perda de água, visando determinar a umidade higroscópica do solo.

O material para os demais ensaios foi armazenado em sacos e, posteriormente, seco ao ar. Após seco, foi destorroado, quarteado e passado na peneira n° 40 (0,42mm) para os ensaios de Limites de Atterberg e Peso Específico Real dos Grãos e na peneira n° 4 (4,8mm) para os ensaios de compactação, resistência e granulometria.

A Figura 20 mostra o solo coletado na jazida para realização dos ensaios laboratoriais.



FIGURA 20 - Solo Coletado na Jazida

3.2.2 Dosagem e Mistura

No método tradicionalmente utilizado, usando a cal hidratada em pó e CCA, adicionam-se inicialmente os aditivos ao solo e, em seguida, é feita a mistura e homogeneização da amostra para posteriormente ser adicionada água a mistura.

As amostras de solo foram preparadas inicialmente com misturas estabilizadas com 6%, 10% e 13% de cal em relação ao peso seco do solo. O objetivo inicial da pesquisa era obter o melhor resultado da estabilização com cal e tomá-lo como referência para as adições posteriores de CCA. Porém, devido ao pouco tempo disponível para pesquisa optou-se por tomar por base a adição de 10% de cal em relação ao peso seco do solo e adicionar as quantidades de 5%, 10% e 15% de CCA em relação ao peso seco do solo+cal. No Quadro 5 são apresentadas as porcentagens utilizadas na realização dos ensaios. Cabe lembrar que, devido à baixa atividade pozolânica da cinza, foram tomados teores altos de CCA.

QUADRO 5
Porcentagens de Cada Mistura

Mistura
Solo Natural
94% Solo + 6% Cal
90% Solo + 10% Cal
87% Solo + 13% Cal
85% Solo + 10% Cal + 5% CCA
80% Solo + 10% Cal + 10% CCA
75% Solo + 10% Cal + 15% CCA

A Figura 21 apresenta o fluxograma do roteiro da realização dos ensaios. O programa experimental consistiu na coleta do solo na jazida e transporte do mesmo até o LMSU. Em seguida foi feita a secagem do solo ao ar livre e posterior peneiramento para realização dos ensaios. Com o solo natural e com as misturas solo+cal e solo+cal+CCA foram realizados os ensaios de peneiramento, Limites de Atterberg, Peso Específico Real dos Grãos e posterior cálculo do grau de saturação e índice de vazios. Para definição da umidade ótima e do peso específico seco aparente máximo do solo natural e das misturas foi realizado o ensaio de compactação, com energia intermediária. Por meio dos valores obtidos de umidade ótima foi realizada a moldagem dos corpos de prova, os quais foram deixados em cura úmida até 56 dias para realização do ensaio de resistência à compressão simples. Por fim, foi feita a análise de todos os resultados obtidos.

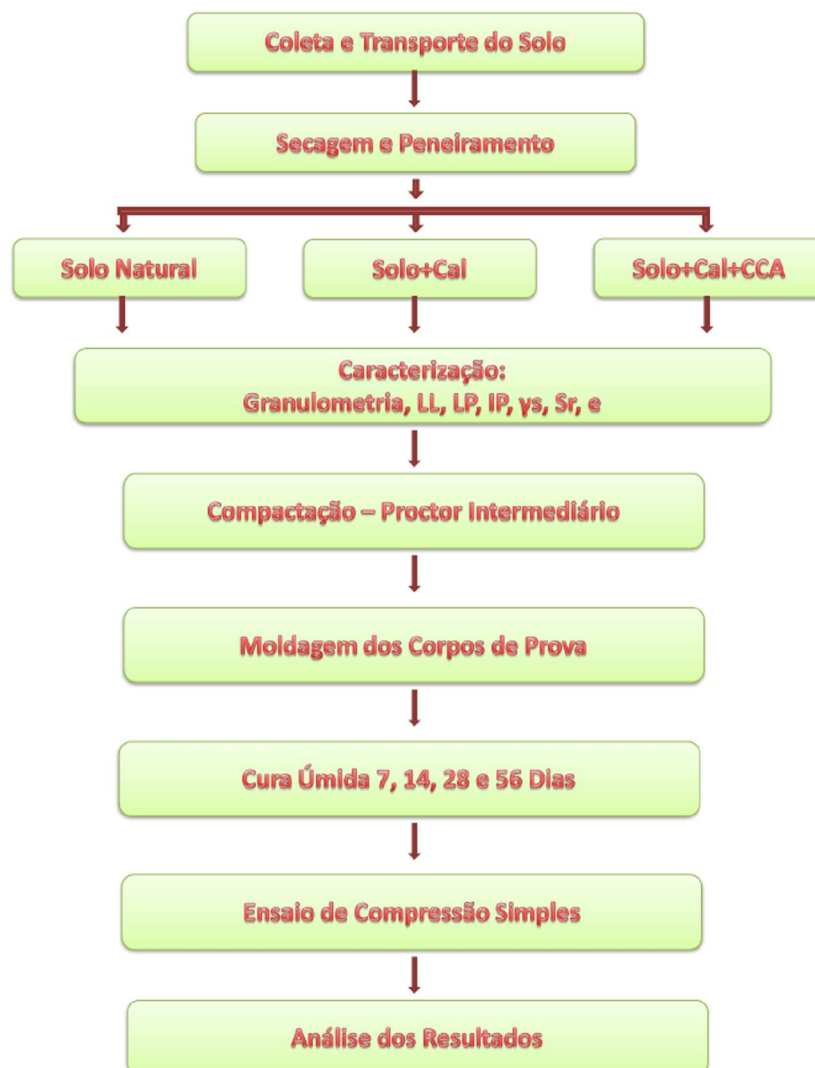


FIGURA 21 - Fluxograma de Ensaio

O solo foi seco ao ar livre, conforme Figura 22. A CCA e o solo foram estocados em sacos plásticos para mantê-los secos, e no caso da cal, foi isolada do ar para evitar a carbonatação. O solo, CCA, cal e água foram pesadas em balança com precisão de 0,01g. Os teores de CCA e de cal foram calculados em relação ao peso do solo seco. Os teores de água foram calculados em função do peso seco da mistura.



FIGURA 22 - Secagem do Solo ao Ar Livre

3.2.3 Ensaio de Caracterização dos Solos

O ensaio de análise granulométrica foi realizado com base na NBR 7181/1984, que prescreve o método de análise granulométrica do solo, por peneiramento. Os ensaios de peneiramento, do solo natural e das misturas, foram feitos através do vibrador e das peneiras normatizadas, ver Figura 23.



FIGURA 23 - Execução dos Ensaios de Peneiramento

O Limite de Liquidez foi determinado pelo método de ensaio da NBR 6459/84. Para execução desses ensaios, tanto para o solo natural como para as misturas, foram utilizados os aparelhos e equipamentos mostrados na Figura 24 e na Figura 25.



FIGURA 24 - Execução dos Ensaios de Limite de Liquidez

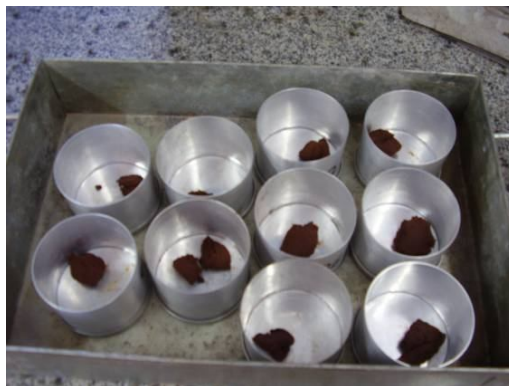


FIGURA 25 – Execução dos Ensaios de Limite de Liquidez (Teor de Umidade)

O Limite de Plasticidade foi determinado pelo ensaio da NBR 7180/84. Para execução desses ensaios, tanto para o solo natural como para as misturas, foram utilizados dispositivos como mostrado na Figura 26.



FIGURA 26 - Execução dos Ensaios de Limite de Plasticidade

O peso específico real dos grãos do solo foi determinado pelo ensaio da NBR 6508/84. Para execução desses ensaios, tanto para o solo natural como para as misturas, foram utilizados equipamentos e aparelhos como mostrado na Figura 27.



FIGURA 27 - Execução dos Ensaios de Peso Específico Real dos Grãos

3.2.4 Ensaio 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 e solo+cal+CCA foram realizados ensaios de compactação no cilindro Proctor. Neste estudo, prevaleceu a utilização da energia intermediária de compactação, utilizando cilindro pequeno e soquete grande, compactando o solo em 3 camadas com 21 golpes em cada. O procedimento de ensaio seguiu a metodologia descrita na NBR 7182/86 sendo que o ensaio foi realizado imediatamente após a mistura. O ensaio de compactação é mostrado na Figura 28.



FIGURA 28 - Ensaio de Compactação (Umidade)

3.2.5 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples do solo e das misturas com 7, 14, 28 e 56 dias de cura úmida. Os corpos de prova foram compactados logo após a homogeneização das misturas.

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados conforme norma NBR 5739/94. Os corpos de prova foram compactados em cilindros metálicos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, aplicando-se o método estático de compactação no teor de umidade ótimo com energia intermediária, em três camadas. Cabe lembrar que, visando caracterizar o solo natural e as misturas e a disponibilidade de pouco tempo para pesquisa, foi moldado apenas um corpo de prova para cada tempo de cura de cada mistura.

Primeiramente, tiveram-se problemas na desmoldagem dos corpos de prova, os quais estavam grudando nas paredes, como mostrado na Figura 29. Procurando alternativas para

resolução deste problema, foi possível adaptar fitas adesivas na parede interna do moldes, o que permitiu a desmoldagem logo após a compactação.



FIGURA 29 - Problemas na Desmoldagem dos Corpos de prova

Após desmoldados, os corpos de prova foram levados a um reservatório com água para cura úmida. Os corpos de prova foram depositados em estrado de madeira a 20 cm acima da lâmina de água, (ver Figura 30). O processo de cura variou de 7 a 56 dias.



FIGURA 30 - Cura Úmida dos Corpos de prova

Visando deixar o topo dos corpos de prova planos tentou-se capear os mesmos com enxofre e caulim, porém, a tentativa foi frustrada, já que os corpos de prova acabaram absorvendo o enxofre e rompendo por tração, conforme mostrado na Figura 31.



FIGURA 31 - Problemas no Capeamento dos Corpos de prova

Como não se conseguiu capear os corpos de prova com enxofre e caulim, optou-se por serrar o topo dos mesmos, visando regularizá-los para realização dos ensaios de resistência (ver Figura 32).



FIGURA 32 - Serragem dos Corpos de prova

Os ensaios de RCS se realizaram em uma prensa hidráulica, com velocidade controlada de 0,25mm/min e conduzidos até se atingir à resistência última. O ensaio é mostrado na Figura 33.



FIGURA 33 - Ensaio de Resistência à Compressão

A Figura 34 mostra a forma de ruptura de uma amostra representativa dos corpos de prova ensaiados à compressão simples, onde a grande maioria apresentou ruptura frágil, característica de materiais cimentados, mesmo comportamento observado por Lovato (2004). Observa-se que não há presença de impurezas no corpo de prova.



FIGURA 34 - Forma de Ruptura do Corpo-de-prova Submetido à RCS

4. Análise e Interpretação dos Resultados

O solo coletado foi ensaiado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Unipampa para definição de suas propriedades geotécnicas e compactado para aferição de sua capacidade de carga, quando empregado como base e sub-base de pavimentos. Posteriormente foi efetuado o melhoramento desse solo com inclusão de porcentagens de cal e cinza de casca de arroz e realizado novamente os ensaios de caracterização e ensaios de resistência. De posse dos resultados, os valores obtidos foram comparados, sendo objeto de estudo deste capítulo.

4.1 Ensaios de Caracterização do Solo Natural e das Misturas

A caracterização do solo estudado nesse trabalho teve por objetivo verificar algumas características que possam vir a afetar o desempenho das misturas estabilizadas pela cal e pela cal em conjunto com a cinza de casca de arroz (CCA). Em seguida, verificam-se algumas características físicas das amostras, procurando averiguar como cada uma das propriedades analisadas pode vir a afetar o desempenho das misturas solo+cal e solo+cal+CCA.

Os ensaios foram realizados imediatamente após mistura, sem a compactação. Esse processo foi adotado pelo fato de se ter receio em utilizar a mistura destorroada depois de compactada, pois isso poderia acarretar na destruição das reações químicas, além de uma possível alteração no formato das partículas, mascarando, assim, os resultados.

A distribuição granulométrica das amostras é mostrada nas Figuras 35, 36 e 37. Verifica-se que o solo e as misturas são granulares, com menos de 2% de solo passante na peneira # 200.

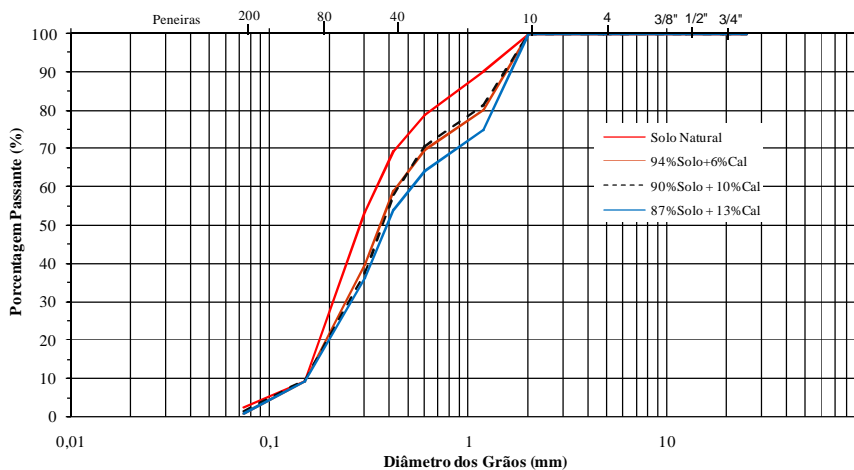


FIGURA 35 - Distribuição Granulométrica (Solo e Solo+Cal)

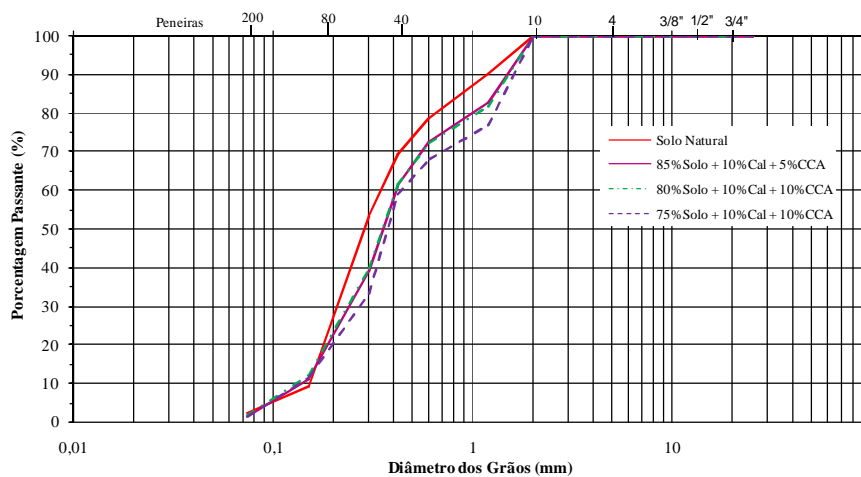


FIGURA 36 - Distribuição Granulométrica (Solo e Solo+Cal+CCA)

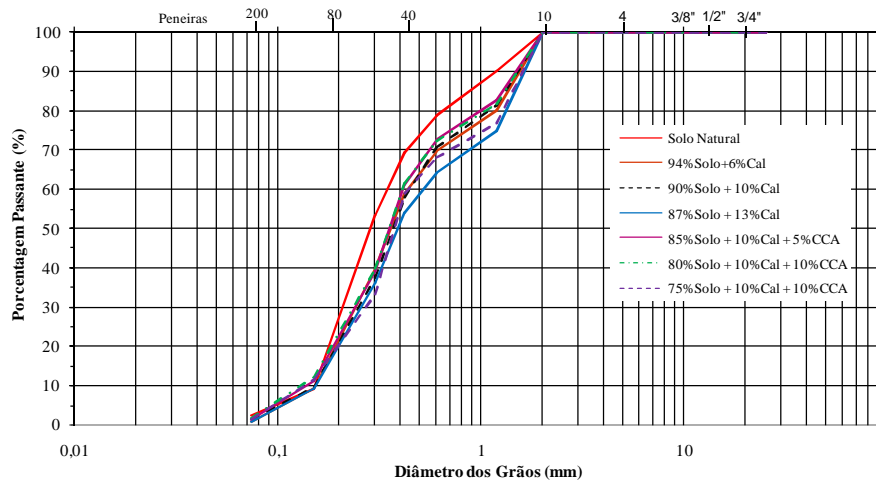


FIGURA 37 - Distribuição Granulométrica (Solo, Solo+Cal e Solo+Cal+CCA)

Pode deduzir-se, através da comparação das curvas granulométricas (Figura 37), que as adições de cal e de cal com CCA ao solo natural alteraram pouco as dimensões de suas partículas, mas fica clara que a adição de Cal e CCA tem capacidade de agrupar as partículas deslocando as curva um pouco para a direita, isso pode facilitar a drenagem e a resistência do material quando aplicado em campo.

No Quadro 6 são mostrados os valores de CC (Coeficiente de Curvatura) e CNU (Coeficiente de Não Uniformidade).

QUADRO 6
Coeficiente de Curvatura e Coeficiente de Não Uniformidade das Misturas

Mistura	CC	CNU
Solo Natural	0,94	2,26
94% Solo + 6% Cal	0,9	2,68
90% Solo + 10% Cal	0,92	2,68
87% Solo + 13% Cal	0,94	2,26
85% Solo + 10% Cal + 5% CCA	1,03	2,56
80% Solo + 10% Cal + 10% CCA	1,01	2,73
75% Solo + 10% Cal + 15% CCA	1,13	2,68

Analisando o Quadro 6, quanto ao coeficiente de não uniformidade (CNU) e coeficiente de curvatura (CC) das misturas, percebe-se que o solo natural e as misturas com adição de cal apresentaram valores de CC menores que 1 e valores de CNU menores que 5, logo, são classificados como solos mal graduados e uniforme. Já as misturas com adição de cal e CCA apresentaram valores de CNU menores que 5, porém valores de CC entre 1 e 3, logo, essas misturas podem ser consideradas como solos bem graduados e uniformes. No entanto, percebe-se pelos valores apresentados que a variação dos resultados foi pequena, comprovando que não houve uma alteração significativa na granulometria do solo com a adição de cal e CCA.

A evolução dos limites de consistência para o solo e para as misturas solo+cal e solo+cal+CCA são apresentados na Figura 38.

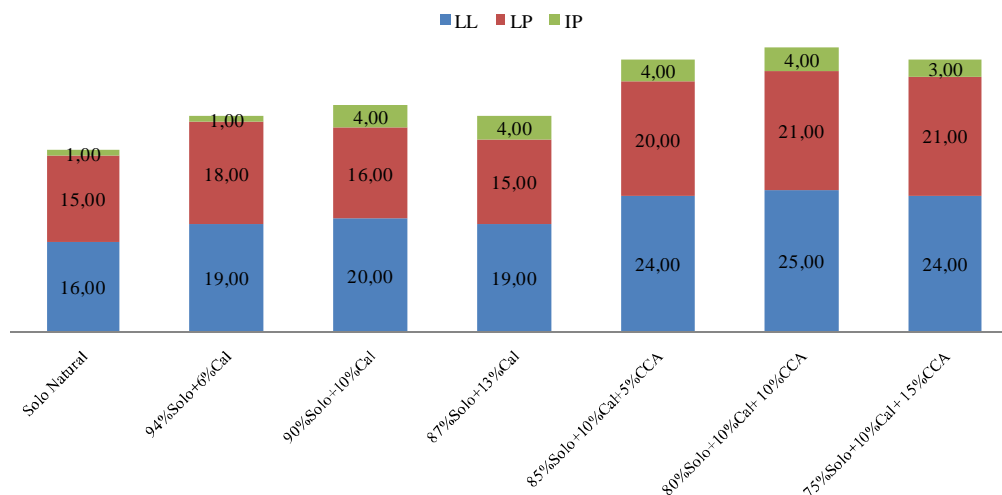


FIGURA 38 - Evolução dos Limites de Consistência (Solo, Solo+Cal e Solo+Cal+CCA)

Observa-se pela Figura 38 que as características de plasticidade apresentaram alterações, aumentando o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade de todas as misturas, com um acréscimo maior nas adições de cal com CCA, ou seja, o solo se tornou mais plástico com as adições. As misturas e o solo natural são classificados como solos pouco plásticos ($1 < IP < 7$). As alterações dessas propriedades foram percebidas na realização dos ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez, apresentando pior trabalhabilidade para as misturas com maiores valores de IP.

Os ensaios para determinação dos limites de consistência (LL e LP) e das curvas granulométricas, do solo natural e das misturas, originaram os resultados sintetizados nos Quadros 7.

QUADRO 7
Síntese das Características de Granulometria e Plasticidade

Mistura	GRANULOMETRIA (%)					PLASTICIDADE (%)		
	Pedregulho(>4,8mm)	Areia Grossa (4,8 - 2,0mm)	Areia Média (2,0 - 0,42mm)	Areia Fina (0,42 - 0,074mm)	Silte + Argila (<0,074mm)	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)	LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)
Solo Natural	-	-	30,64	67,14	2,22	16,00	15,00	1,00
94% Solo+6% Cal	-	-	41,01	58,31	0,68	19,00	18,00	1,00
90% Solo+10% Cal	-	-	41,93	56,80	1,27	20,00	16,00	4,00
87% Solo+13% Cal	-	-	45,92	53,18	0,90	19,00	15,00	4,00
85% Solo+10% Cal+5% CCA	-	-	38,75	59,97	1,28	24,00	20,00	4,00
80% Solo+10% Cal+ 10% CCA	-	-	38,29	59,91	1,80	25,00	21,00	4,00
75% Solo+10% Cal + 15% CCA	-	-	41,18	57,34	1,48	24,00	21,00	3,00

Com base nos resultados das Figuras 37 e 38 e do Quadro 7 é possível caracterizar o solo natural como uma areia, a qual apresenta maior porcentagem de areia fina em todas as misturas, ou seja, um solo não coesivo e pouco plástico.

Analisando novamente os valores expostos no Quadro 7, verifica-se que os valores máximos de LL e IP, foram 25,00% e 4,00%, respectivamente, o que, de acordo com as especificações do DNIT 058/2004 - ES e DNIT 143/2010 - ES que estabelece uma LL máximo de 40% e um IP máximo de 18%, possibilita o uso desses materiais em camadas de base de pavimentos rodoviários.

Núñez (1991), ao analisar os limites de consistência para um solo arenoso pouco plástico, observou um ligeiro aumento no valor de Limite de Liquidez desse solo. O autor creditou esse fato à baixa atividade físico-química do solo e a baixa quantidade de argila. Thomé (1994) relatou que solos com baixa plasticidade apresentam um aumento nos valores de LL e IP quando misturados com a cal.

Acredita-se que o aumento nos valores de LL encontrados para as misturas solo+cal e solo+cal+CCA deve-se, dentre outros fatores, à baixa porcentagem das argilas constituintes desse material, já que o solo natural possui pouca fração fina (menos de 5%).

Dessa forma, notou-se que a adição de cal à amostra de solo aumentou a plasticidade do material, sendo um acréscimo maior ainda observado na presença de cal e CCA. Concluiu-se que a adição desses estabilizantes aos solos estudados aumentou os IPs das misturas, mas piorou a trabalhabilidade destas se comparada ao solo natural.

O Quadro 8 apresenta a classificação do solo natural e das misturas quanto aos sistemas mais comumente empregados para classificação de solos.

QUADRO 8
Classificação das Misturas

Misturas	CLASSIFICAÇÃO	
	HRB	SUCS
Solo Natural	A-2-4	SP
94% Solo+6% Cal	A-2-4	SP
90% Solo+10% Cal	A-2-4	SP
87% Solo+13% Cal	A-2-4	SP
85% Solo+10% Cal+5% CCA	A-2-4	SP
80% Solo+10% Cal+10% CCA	A-2-4	SP
75% Solo+10% Cal+15% CCA	A-2-4	SP

Segundo o Quadro 8, quanto à classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), segundo norma ASTM-D2487/85, verifica-se que o solo natural e todas as misturas foram classificados como SP, ou seja, areia mal graduada, logo, apresentam curvas granulométricas uniformes ou abertas. Os subgrupos SW e GW possuem no máximo 5% de partículas finas, mas suas curvas granulométricas não completam os requisitos de graduação indicados para serem considerados como bem graduados.

Analisando novamente o Quadro 8, agora quanto à classificação rodoviária, conhecida como HRB (Highway Research Board), regida pela norma AASHTO M145-42, verifica-se que o solo natural e todas as misturas pertencem ao grupo A-2-4 com IG = 0 (Índice de Grupo), comprovando que não houve grandes alterações na granulometria do solo com a adição de cal e de cal com CCA. Esse solo é areno-siltoso de baixa compressibilidade.

Todas as misturas foram ensaiadas e caracterizadas pelos métodos consagrados de classificação dos solos utilizados na engenharia civil, SUCS, HRB. Nenhuma classificação resultou nas características reais do solo (areia fina a média, sem pedregulhos). Isso

demonstra que é necessária a caracterização local do solo, e o desenvolvimento de sistemas de classificação regionais, adaptadas as características dos solos locais.

Procurou-se verificar a densidade real dos grãos, para então definir o índice de vazios e o grau de saturação das misturas estudadas. Considerando $\gamma_w = 1$, por meio dos índices físicos dos solos sabemos que $\gamma_s = G_s$, logo, os valores de G_s serão os mesmos para os valores de γ_s de cada mistura. Pela Equação 10 definiram-se os valores do índice de vazio (e) de cada mistura. Já, pela equação 11 definiram-se os valores de grau de saturação (S_r).

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (10)$$

$$S_r = \frac{\gamma_s \cdot W_{ótima}}{e} \quad (11)$$

Onde γ_d é o peso específico aparente seco máximo, obtido nos ensaios de compactação (será visto no item 4.2), mostrado no Quadro 9.

QUADRO 9
Peso Específico Aparente Seco Máximo das Misturas

Material	Peso Específico Aparente Seco Máximo (g/cm ³)
Solo Natural	2,046
94% Solo+6% Cal	1,934
90% Solo+10% Cal	1,910
87% Solo+13% Cal	1,898
85% Solo+10% Cal+5% CCA	1,841
80% Solo+10% Cal+10% CCA	1,732
75% Solo+10% Cal+15% CCA	1,692

Logo, os valores da densidade real dos grãos (G_s) obtidos em laboratório, os valores de índice de vazios (e) e de grau de saturação (S_r), obtidos numericamente, são apresentados no Quadro 10 e Figuras 39, 40 e 41.

QUADRO 10
Densidade Real dos Grãos (Gs), Grau de Saturação (Sr) e Índice de Vazios (e) das Misturas

Misturas	Gs	Sr (%)	e
Solo Natural	2,66	84	0,30
94%Solo + 6% Cal	2,70	79	0,39
90%Solo + 10% Cal	2,68	86	0,40
87%Solo + 13% Cal	2,68	82	0,41
85%Solo + 10% Cal + 5%CCA	2,65	77	0,44
80%Solo + 10% Cal + 10%CCA	2,66	70	0,54
75%Solo + 10% Cal + 15%CCA	2,62	69	0,55

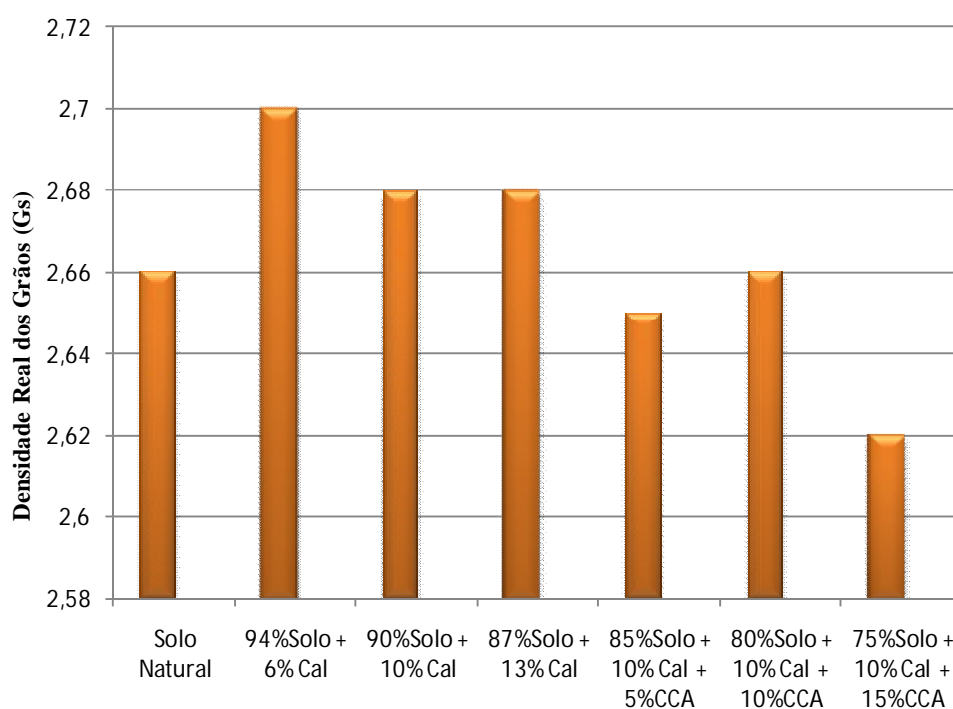


FIGURA 39- Densidade Real dos Grãos das Misturas

Percebe-se pelo Quadro 10 e Figura 39 que a densidade real dos grãos apresentou pouca variação dos resultados, ficando entre 2,62 e 2,70. Verificou-se um aumento nos valores conforme se adicionou cal ao solo natural. Já a adição de cal+CCA proporcionou um decréscimo nos valores de densidade real dos grãos, ficando igual ou abaixo dos valores encontrados para o solo natural, isso se deve à menor massa específica da cinza.

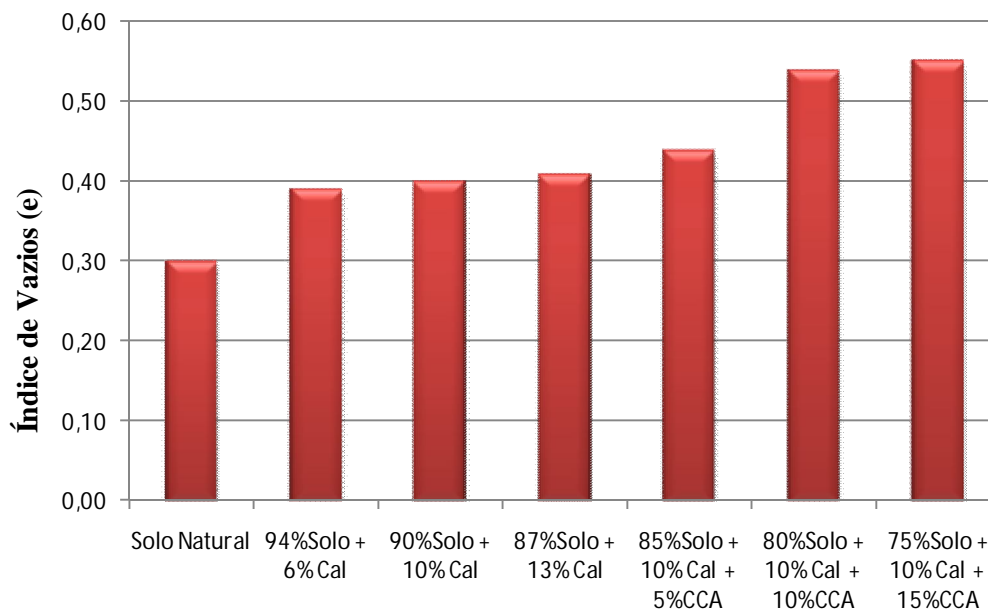


FIGURA 40 - Índice de Vazios das Misturas

Através dos valores apresentados (Quadro 10 e Figura 40) percebe-se que o índice de vazios aumentou conforme se adicionou cal e CCA, logo, o solo natural era mais compacto se comparado com as misturas estabilizadas. Os resultados comprovam a tendência apresentada pela TRB (1987). As partículas de solo se tornam mais floculadas, quando adicionados os novos materiais ao solo, logo, o índice de vazios aumenta.

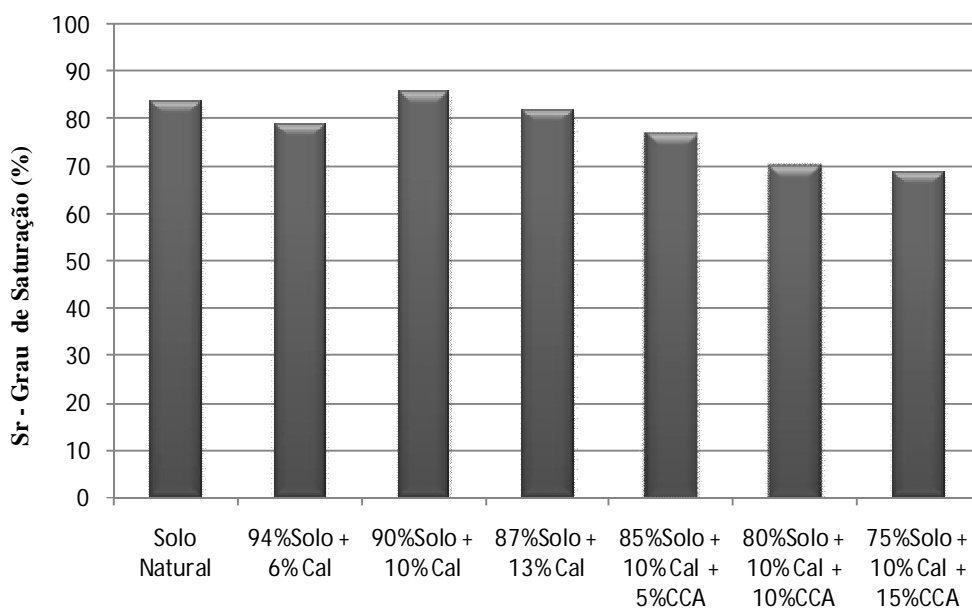


FIGURA 41 - Grau de Saturação das Misturas

O grau de saturação foi calculado em função da massa específica máxima e da umidade ótima de cada traço estudado. Verificou-se, pelo Quadro 10 e Figura 41, que o grau de saturação variou de 79% a 86% para as misturas solo+cal. Já com a adição de CCA percebe-se uma redução no grau de saturação, variando de 69% até 77%, ou seja, a presença da cinza fez com que a mistura apresente-se um menor grau de saturação, o que corrobora com as curvas de compactação que não apresentam pico, tendo as umidades ótimas próximas.

4.2 Características de Compactação

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam as curvas de compactação das misturas solo+cal e solo+cal+CCA na energia intermediária.

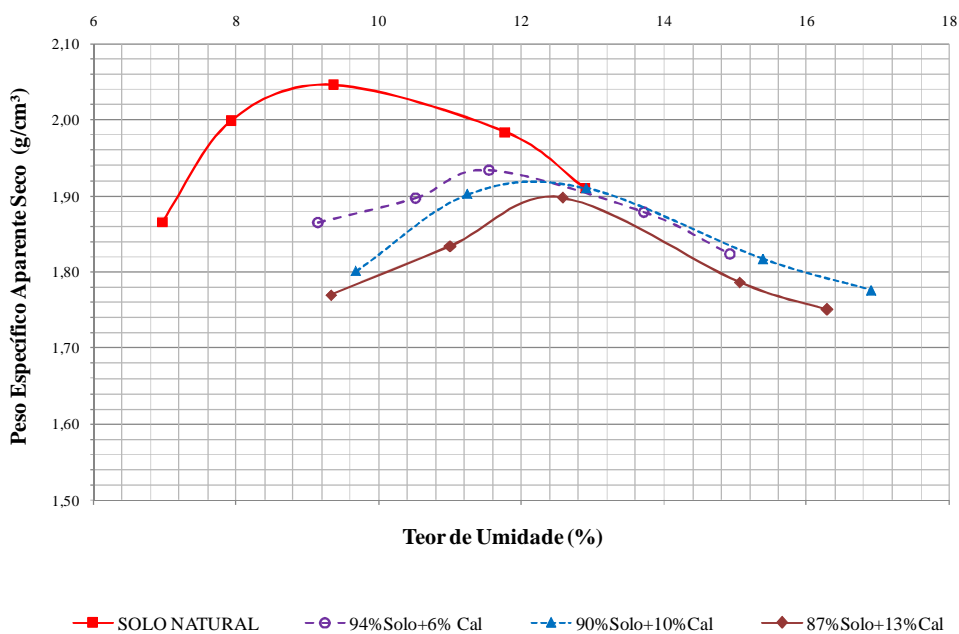


FIGURA 422- Curvas de Compactação – Solo e Mistura Solo+Cal

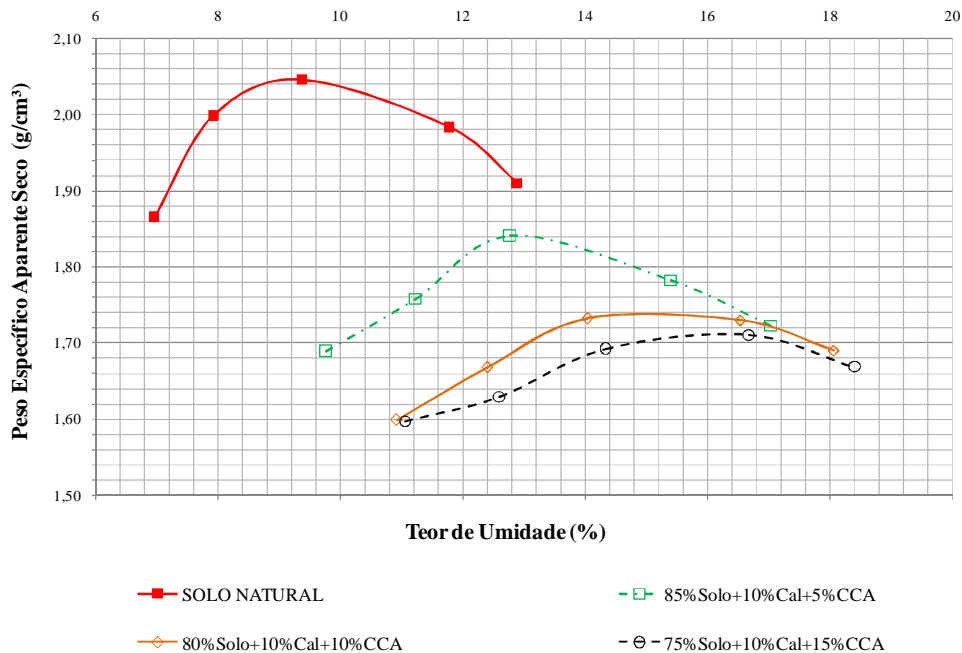


FIGURA 433 - Curvas de Compactação – Solo e Mistura Solo+Cal+CCA

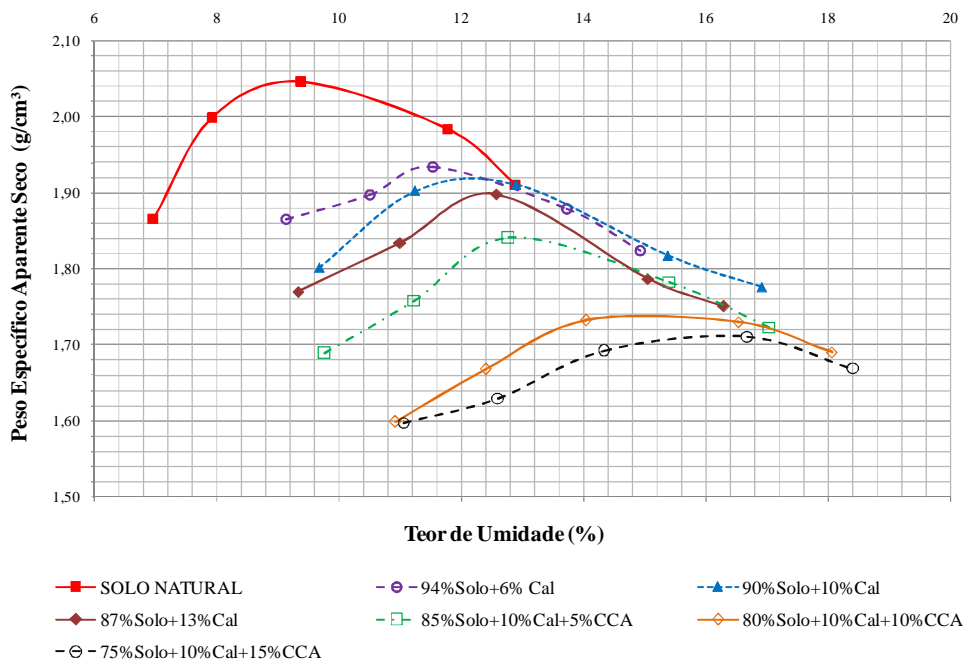


FIGURA 44 - Curvas de Compactação – Solo, Mistura Solo+Cal e Mistura Solo+Cal+CCA

O peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de compactação encontrada para o solo natural e para as misturas solo+cal e solo+cal+CCA são apresentados no Quadro 11.

QUADRO 11
Características de Compactação do Solo e das Misturas

Material	Peso Esp. Apar. Seco Máx. (kN/m ³)	Umidade Ótima (%)
Solo Natural	20,46	9,37
94% Solo+6% Cal	19,34	11,54
90% Solo+10% Cal	19,10	12,90
87% Solo+13% Cal	18,98	12,58
85% Solo+10% Cal+5% CCA	18,41	12,77
80% Solo+10% Cal+10% CCA	17,32	14,03
75% Solo+10% Cal+15% CCA	16,92	14,34

Quanto a Figura 44 e ao Quadro 11, os resultados comprovam a tendência apresentada pela TRB (1987). A adição de cal e CCA proporcionaram uma redução no peso específico aparente seco máximo e um aumento na umidade ótima de compactação, se comparada com o solo natural. Isto se explica pelo fato de as partículas de solo se tornar mais floculadas, quando adicionados os novos materiais ao solo. O índice de vazios aumenta, e a estrutura floculada se torna forte para resistir à compactação com índice de vazios mais alto, reduzindo o peso específico aparente seco máximo. Portanto, a quantidade maior de vazios, a absorção de água pela cal na hidratação e absorção de água pela CCA resulta em mais água para preenchê-los, de forma a conseguir a maior eficiência na compactação, aumentando a umidade ótima (LOVATO, 2004).

Os resultados também coincidem com os encontrados por Ali et al (1992) e Muntohar e Hantoro (2000), onde os autores apontam que a queda do peso específico seco máximo nas misturas é devido à soma das baixas densidades reais dos grãos (Gs) da cal e da CCA, sendo que não houve tempo suficiente para desenvolver as reações pozolânicas, de modo que não houve demora entre a mistura e compactação.

4.3 Características de Resistência à Compressão Simples (RCS)

A principal função do agente estabilizante é o ganho de resistência (compressão/tração) e a manutenção da durabilidade ao longo do tempo; tais fatores estão ligados ao teor estabilizante adicionado, ao tipo de material estabilizado, a massa específica do material compactado e a temperatura de cura do material. O tempo de cura também exerce papel importante, principalmente nas primeiras idades.

A resistência à compressão simples (RCS) é uma característica muito importante na análise da estabilização de um solo pela cal, logo, também pode ser aplicada para verificar o comportamento do solo quando adicionadas porcentagens de cal e CCA. Os valores de RCS são utilizados na análise de materiais estabilizados, quando da aplicação do método de dimensionamento empírico das camadas de pavimentos.

Dessa forma, a resistência mecânica do solo foi avaliada mediante ensaios de compressão simples, objetivando sua comparação com as resistências de misturas solo+cal e solo+cal+CCA, e avaliar a eficiência da estabilização. Sendo o solo em estudo composto praticamente por areia com um teor muito baixo de finos, é de se esperar que a resistência à tração seja desprezível, razão pela qual o solo não foi ensaiado à tração por compressão diametral. Cabe lembrar, que nesse trabalho o solo natural e as misturas foram compactadas logo após a mistura/homogeneização dos materiais, em sua umidade ótima.

No Quadro 12 e na Figura 44 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples, para o solo natural, para as misturas de solo+cal e solo+cal+CCA curadas por tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

QUADRO 12
Resistência à Compressão Simples (MPa)

Tempo de Cura (dias)	RCS (MPa)	Cal (%)			Cal/CCA (%)		
	Solo Natural	6	10	13	10/5	10/10	10/15
7	0,46	0,32	0,70	0,89	0,79	1,05	1,23
14	0,44	0,33	0,53	0,87	0,88	1,45	1,64
28	0,89	0,38	0,73	1,15	1,55	2,16	2,23
56	1,17	0,57	1,16	1,37	2,32	2,6	2,89

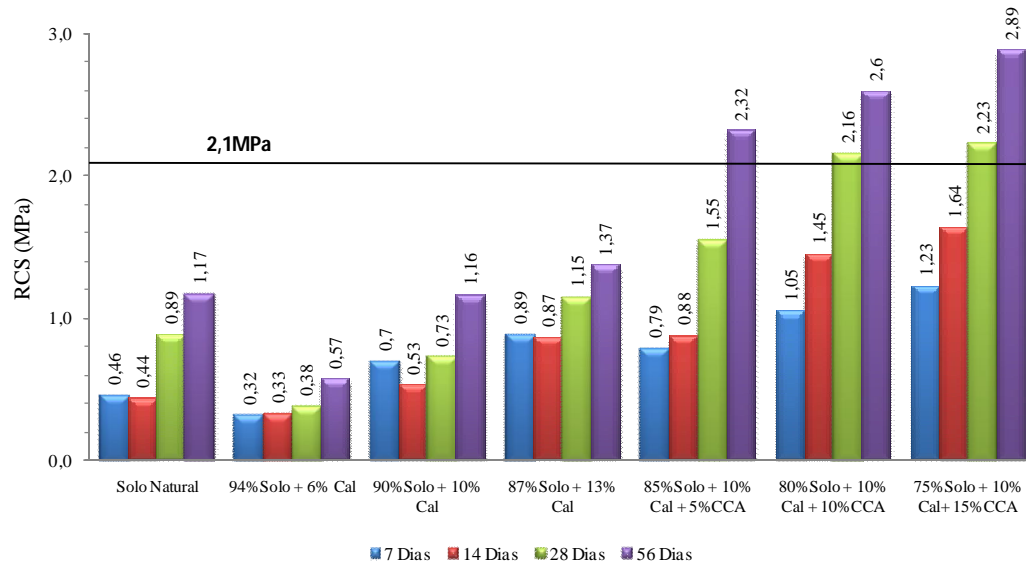


FIGURA 44 - Resistência à Compressão Simples (MPa)

Os solos arenosos com pouca argila não reagem satisfatoriamente à cal. Para estabilizá-los a adição de CCA e cal pode ser uma boa alternativa (BEHAK, 2007). E segundo Ali et al (1992), o aumento da temperatura de cura contribui para o aumento da resistência das misturas solo+cal+CCA.

A influência dos teores de cal e CCA e do tempo de cura, que influenciam na RCS de misturas é analisada a seguir.

4.3.1 Influência do Tempo de Cura

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam a evolução da resistência à compressão simples com o tempo de cura para o solo natural e para as mistura de solo+cal e solo+cal+CCA. Os tempos de cura foram de 7, 14, 28 e 56 dias.

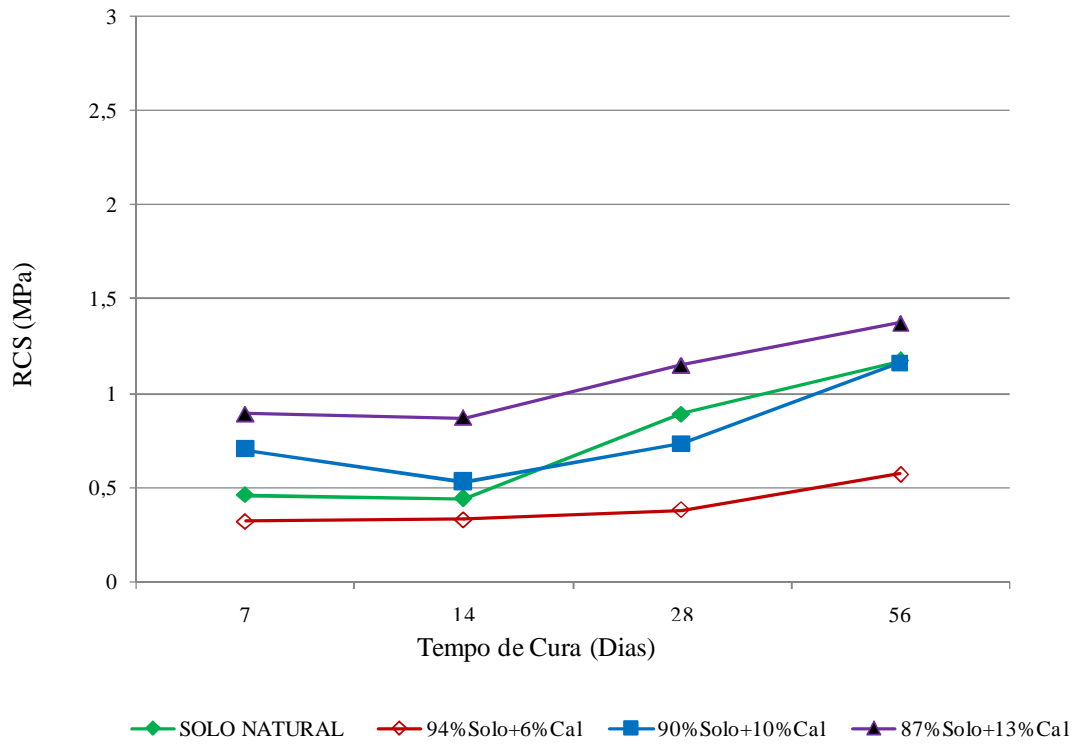


FIGURA 45 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura (Solo e Solo+CaI)

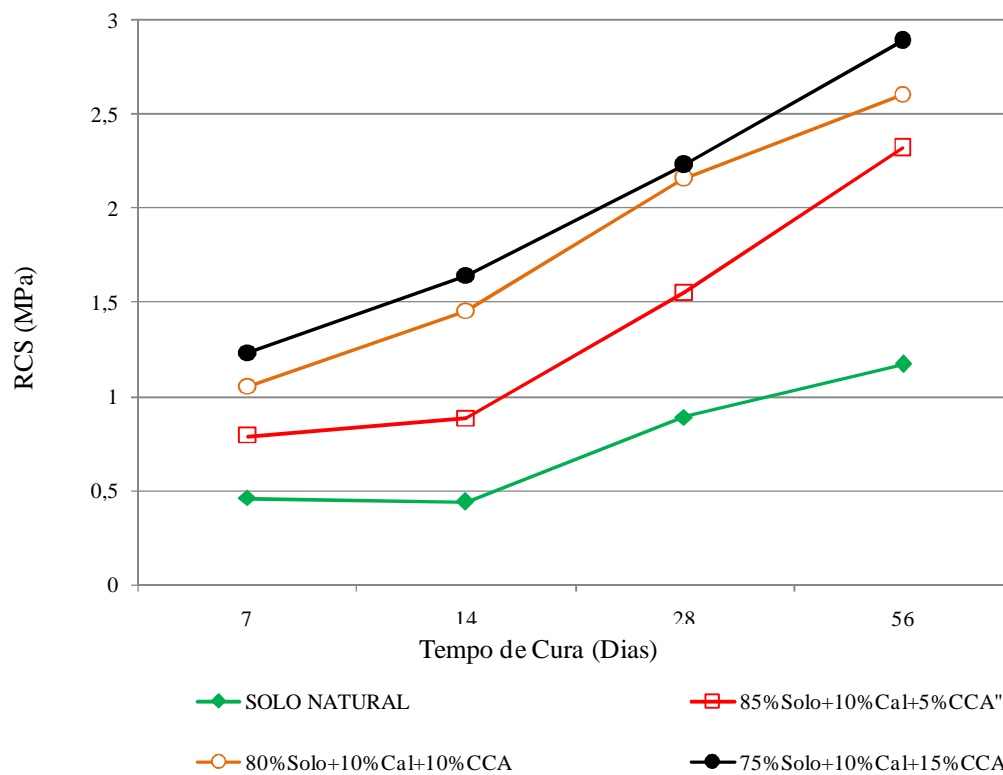


FIGURA 46 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura (Solo e Solo+CaI+CCA)

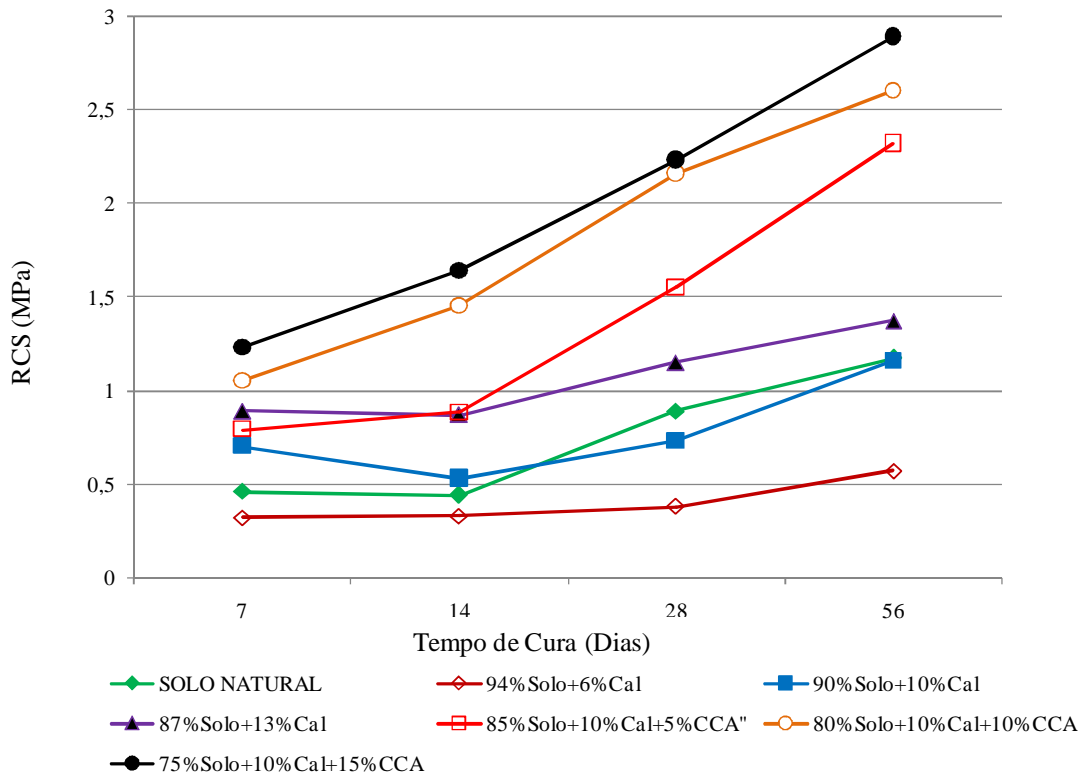


FIGURA 47 - Evolução da Resistência à Compressão Simples com Tempo de Cura de Todas Misturas

Observa-se pela Figura 47 que para as misturas de solo+cal ensaiadas o aumento da RCS não teve um bom desempenho se comparado com as misturas de solo+cal+CCA, e até mesmo se comparado com o solo natural. Apenas a mistura de 87% Solo+13% Cal apresentou um melhor comportamento. Em contrapartida, as misturas solo+cal+CCA apresentaram bom comportamento, evoluindo de forma constante com o tempo de cura em todas as misturas. A taxa de ganho de RCS foi considerável.

Para as misturas de solo+cal (Figura 45) observa-se um aumento grande na resistência aos 7 dias, onde houve aumento de 56%, 60% e 82% para as misturas de 94% Solo+6% Cal, 90% Solo+10% Cal e 87% Solo+13% Cal, respectivamente. A RCS continuou aumentando até os 56 dias, porém de forma não muito acentuada. Este comportamento permite supor que as reações pozolânicas continuaram ocorrendo com o passar do tempo, no entanto de forma mais lenta. Lembrando que, segundo Behak (2007), a formação de reações pozolânicas do solo com a cal pode levar semanas ou até anos para acontecer.

Foi observada uma queda de resistência nos teores de 90% Solo+10% Cal e 87% Solo+13% Cal dos 7 para os 14 dias, voltando a aumentar nos 28 e 56 dias. Uma das

hipóteses que se pode levantar para explicar esse fato baseia-se na possível formação de etringita e taumasita, devido à presença de sulfato no solo, aliados a carbonatação, o que poderia ter inibido a formação dos silicatos e aluminatos hidratados (Sivapullaiah et al, 2000 e Bhattacharja et al, 2003). De acordo com os autores, as reações pozolânicas são modificadas na presença de sulfatos, por meio da combinação do ataque de sulfatos e da carbonatação, além da presença da alumina reativa.

Outra hipótese, também levantada por Bhattacharja et al (2003), é a possível presença de CaCO_3 nas misturas, que contribuí para formação de compostos expansivos, prejudicando o ganho de resistência. Porém, o ganho de resistência apresentado pelas misturas de solo+cal em relação ao solo natural indica que algum produto cimentante deve ter se formado, por meio de reações pozolânicas. Entretanto, esse é um assunto que precisa ser analisado com mais detalhe em pesquisas futuras.

As misturas solo+cal+CCA (Figura 46) tiveram aumento de resistência considerável nos primeiros dias, onde aos 7 dias alcançaram 34%, 40% e 42%, respectivamente para os teores de 85% Solo+10% Cal+5% CCA, 80% Solo+10% Cal+10% CCA e 75% Solo+10% Cal+15% CCA, das máximas RCS verificadas aos 56 dias de cura. Aos 14 dias, o aumento da resistência não foi considerável em relação à RCS obtida nos 7 dias.

Já aos 28 dias, as misturas 85% Solo+10% Cal+5% CCA, 80% Solo+10% Cal+10% CCA e 75% Solo+10% Cal+15% CCA apresentaram razões de 66%, 83% e 77%, respectivamente, correspondente aos 56 dias de cura. As taxas de ganho de resistência diminuem com o aumento do tempo de cura, o que comprova o comportamento dos estudos de Ali et al (1992), que segundo o autor, as taxas de incremento de RCS são altas no início do tempo de cura.

Pela Figura 48 observa-se que as RCS aos 56 dias das misturas 85% Solo+10% Cal+5% CCA, 80% Solo+10% Cal+10% CCA e 75% Solo+10% Cal+15% CCA são 2, 2,25 e 2,5 vezes maiores, respectivamente, que as do solo natural. Portanto, os ganhos de RCS, com relação à do solo natural. Já para as misturas de solo+cal, apenas a mistura 87% Solo+13% Cal teve RCS maior do que o apresentado pelo solo natural.

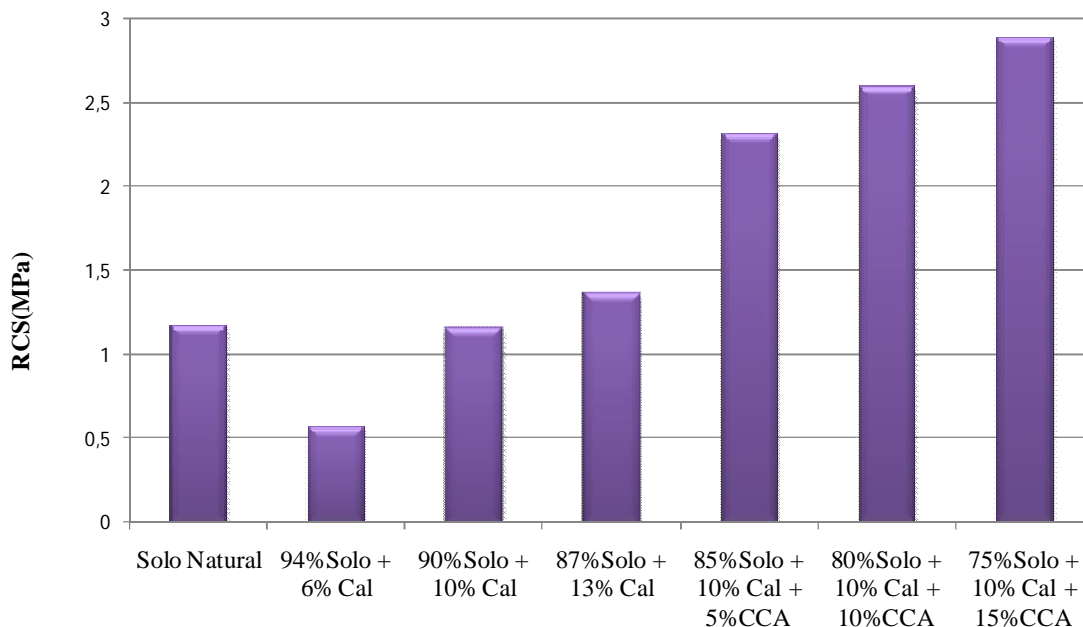


FIGURA 48 - Resistência à Compressão Simples aos 56 dias

4.3.2 Influência dos Teores de Cal e Cal+CCA

Observa-se, pela Figura 45, que a RCS aumentou com o teor de cal. A mistura com 87%Solo+13%Cal teve aumento de 59% e 15% em relação às misturas de 94%Solo+6%Cal e 90%Solo+10%Cal, respectivamente.

A Figura 46 mostra a evolução da RCS em função dos teores de cal e CCA para 7, 14, 28 e 56 dias de cura. A RCS aumentou com o aumento dos teores de CCA, para todos os tempos de cura, sendo máxima para mistura 75%Solo+10%Cal+15%CCA. Comparando com o solo natural, a mistura foi 2,5 vezes maior, para 28 e 56 dias.

Como se pode observar, por se tratar de uma cinza com teor de sílica amorfa, as reações são muito lentas, de tal modo que aos 56 dias ainda existiria sílica amorfa e cal disponíveis a reagir, tendendo a aumentar a RCS com o passar do tempo. Portanto, o acréscimo de cal, não só aumenta a RCS, mas também acelera as reações pozolânicas com a sílica amorfa da cinza, atingindo maiores resistências nas idades prematuras, e ficando mais lento o aumento em idades maiores.

Os resultados obtidos, no que se refere à variação da resistência à compressão simples com os teores de cal e CCA para todos os tempos de cura, são coerentes com os resultados apresentados por Ali et al (1992).

Além disso, segundo Mendonça et al (1996), a atividade pozolânica entre a cal e o solo está ligada a temperatura de cura. Em temperaturas baixas, o aumento de resistência é pequeno, aumentando conforme a elevação da temperatura. Esse pode ser um fator de interferência nos resultados de RCS, já que os mesmos foram realizados no inverno, onde na Região de Alegrete, as temperaturas nessa estação são próximas a 10°C. Segundo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, 2012), a temperatura média dos últimos 3 invernos, anos de 2009, 2010 e 2011, foi de 14,23 °C. Isso leva a crer que a aplicação em pista em estações quentes do ano pode-se alcançar valores superiores de RCS ou ainda reduzir o teor de cal adicionado.

Na Figura 49 são comparados os resultados de resistência à compressão simples, aos 56 dias de cura, com os valores de índice de vazios encontrados para o solo natural e para as misturas solo+cal e solo+cal+CCA.

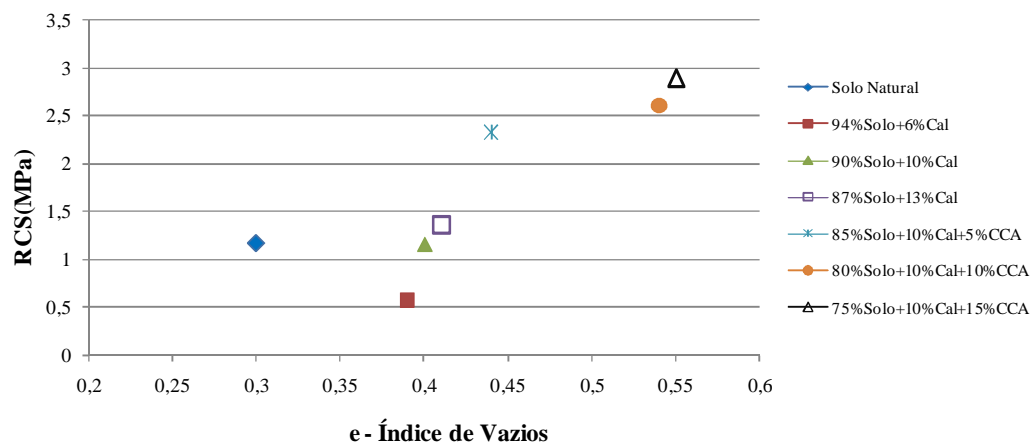


FIGURA 49 - Resistência à Compressão Simples (RCS) x Índice de Vazios (e)

Através dos valores apresentados percebe-se que o índice de vazios aumentou conforme se adicionou cal e CCA, tornando as partículas mais flocladas, corroborando com a tendência apresentada pela TRB (1987). Com o acréscimo das porcentagens de cal o índice de vazios passou de 0,3 (solo natural) para 0,41, já a RCS aumentou em até 14,60%. As amostras com porcentagens de Cal+CCA o índice de vazios passou de 0,30 para 0,55, assim, apesar do aumento do índice de vazios, há um ganho de resistência muito significativo, de 59,51 %, devido à cimentação.

A partir das análises não foi possível definir com clareza um teor ótimo de cal e CCA. A continuidade da pesquisa, ensaiando misturas com diferentes teores tanto de cal como de cal e CCA, diferentes tipos de cal e CCA, e maiores tempos de cura, talvez permita a definição de um teor ótimo.

De acordo com as normas NBR 12253/92 e DNIT 143/2010 - ES elaboradas para solo-cimento, a resistência mínima aceitável para utilização deste material como base de pavimentos é 2,1 MPa com 7 dias de cura. A Figura 44 mostra que nos ensaios realizados essa resistência não foi alcançada em nenhum traço aos 7 dias. Observando ainda a figura, é possível perceber que nas misturas com porcentagens a RCS aumenta consideravelmente com o tempo e aos 56 possui resistência superior a 2,1 MPa. Salienta-se que não existe nenhuma normativa para mistura solo+cal, ou solo+cal+CCA e que é de conhecimento geral que a cal precisa de um maior tempo de cura.

Dessa forma, pode se constatar, de um modo geral, à luz dos resultados de RCS obtidos, que a aplicação das porcentagens sugeridas de cal a este tipo de solo não pode ser utilizada satisfatoriamente. Porém, adicionando CCA e cal a esse solo, os resultados são mais satisfatórios, permitindo inclusive o uso dessas amostras em camadas nobres de rodovias, com 28 dias de cura.

5. Conclusões e Sugestões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para estudos futuros, que resultaram da aplicação do programa experimental do solo estudado. Ressalta-se que todas as conclusões obtidas estão vinculadas ao universo em estudo a partir delas, pôde-se conhecer melhor as potencialidades e as limitações dos materiais analisados.

5.1 Conclusões

5.1.1 Com Relação aos Materiais Empregados

- O solo utilizado nesta pesquisa é uma areia mal graduada e com poucos finos, classificada como SP segundo o sistema unificado de classificação de solos da ASTM, e como A-2-4 (0) segundo a classificação rodoviária do sistema AASHTO. É um solo que apresenta facilidade na compactação, com curvas de compactação com picos. A capacidade de suporte é baixa (RCS com energia intermediária ficou entre 0,4 e 1,2 MPa), não sendo adequado para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

- Foi utilizada na pesquisa uma cinza de casca de arroz que é queimada em um forno a temperaturas elevadas e sem controle. A cinza coletada apresentou uma cor preta, porém sem impurezas. A cinza tem em média 9,9% de teor de matéria orgânica, portanto é classificada como uma cinza de baixa atividade pozolânica.

5.1.2 Quanto aos Ensaio de Consistência e Compactação

- Verificou-se que os resultados do limite de plasticidade e do índice de plasticidade obtidos para as amostras de solo+cal e solo+cal+CCA apresentaram valores superiores se comparado ao solo natural, porém atendendo os limites estabelecidos pelo DNIT 143/2010 - ES e DNIT 058/2004 - ES (máximo de 40% para LL e 18% para IP), possibilitando o uso desses materiais em camadas de base e sub-base de pavimentos.

- Com relação aos limites de consistência das misturas solo+cal e de solo+cal+CCA, verificou-se que as amostras, após inserção de estabilizante, apresentaram

condições de pouco plásticas. O aumento nos valores dos LLs das amostras de solo estabilizadas se deve, dentre outros fatores, à baixa atividade das argilas constituintes desse material e à composição dos cátions trocáveis presentes no mesmo. Em consequência, um aumento nos IPs das amostras estabilizadas piorou a trabalhabilidade dos materiais.

- Para os ensaios de compactação observou-se, após a adição de cal e CCA aos solos, uma redução na massa específica aparente seca máxima e um aumento da umidade ótima das misturas estabilizadas, diminuindo e aumentando, respectivamente, os parâmetros conforme o aumento nos teores de cal e de cal e CCA. As curvas de compactação das misturas apresentaram redução de pico, ficando mais achatadas, e dificultando a compactação. Esse comportamento se deve às características porosas da cinza de casca de arroz e ao consumo de água pela cal na hidratação.

5.1.3 Quanto aos Resultados dos Ensaio de RCS

- Com relação aos resultados de RCS encontrados para as misturas de solo+cal e solo+cal+CCA, verificou-se a influência de alguns fatores preponderantes para a melhoria da resistência mecânica das amostras analisadas, tais como: porcentagens de cal e CCA adicionadas às amostras, período de cura aos quais os corpos-de-prova foram submetidos e tipo de solo utilizado.

- Para as amostras de solo+cal, constatou-se que duas amostras obtiveram resistências inferiores ao solo natural, o que se deve a uma possível formação de etringita e taumasita, devido à presença de sulfato no solo, aliados a carbonatação, o que poderia ter inibido a formação dos silicatos e aluminatos hidratados, modificando as reações pozolânicas na presença de sulfatos, por meio da combinação do ataque de sulfatos e da carbonatação, além da presença da alumina reativa. Outra hipótese é a possível presença de CaCO_3 nas misturas, que contribuiu para formação de compostos expansivos, prejudicando o ganho de resistência. A mistura com maior porcentagem de cal (13%) apresentou aumento na RCS, com valores crescentes em função do aumento dos períodos de cura testados.

- Para as amostras de solo+cal+CCA, constatou-se que os valores de RCS cresceram, de um modo geral, em função do aumento dos períodos de cura. O aumento da RCS foi maior nas idades iniciais, porém ao final dos dias de cura (56) as misturas ainda apresentaram aumento de resistência considerável, não cessando as reações pozolânicas.

- Com relação à influência dos teores de estabilizantes nos valores de RCS das misturas percebe-se a ocorrência expressiva das reações pozolânicas nas misturas tanto com apenas a adição de cal (13%Cal) como com a adição de cal e CCA (10%Cal+15%CCA).

- A análise de todos os resultados apresentados permite concluir que nenhum dos teores alcançou aos 7 dias a resistência à compressão simples mínima exigida pelas normas NBR 12253/92 e DNIT 143/2010 - ES ($RCS \geq 2,1\text{MPa}$) para a utilização como camada de base do pavimento. Porém, como se pode ver, com o passar do tempo houve um acréscimo na resistência, onde, aos 28 dias, traços das misturas solo+cal+CCA estudadas já poderiam ser utilizadas nas camadas de base de pavimentos. O aumento do teor de cinza de casca de arroz proporcionou um maior teor de sílica amorfa, favorecendo as reações pozolânicas com a cal. O acréscimo do teor de cal aumenta consideravelmente a resistência à compressão simples e acelera as reações pozolânicas com a sílica amorfa da cinza, atingindo os maiores valores de resistência.

5.1.4 Conclusão Global

- Dessa forma, pode se constatar, de um modo geral, à luz dos resultados de RCS obtidos, que a aplicação das porcentagens sugeridas de cal a este tipo de solo não pode ser utilizada satisfatoriamente. Porém, adicionando CCA e cal a esse solo, os resultados são mais satisfatórios, permitindo inclusive o uso dessas amostras em camadas nobres de rodovias, com 28 dias de cura.

- Comprova-se que o emprego de cinza de casca de arroz, em conjunto com a cal, na estabilização de solos arenosos, propiciará significativa melhora nas malhas rodoviárias de regiões produtoras de arroz, logo, se concretiza como uma técnica sócio e economicamente viável, a qual contribuirá para o meio ambiente, empregando um resíduo abundante e reduzindo a exploração de jazidas de recursos não-renováveis, como solos e rochas.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Com o intuito de complementar a pesquisa apresentada neste trabalho, sugere-se:

Realizar os ensaios aqui apresentados, porém com tempos de curas maiores de 56 dias, como por exemplo, 90 e 128 dias, visando verificar os teores ótimos de cal e de cal e CCA.

Realizar ensaios de resistências à compressão simples de misturas com teores de cinza de casca de arroz e cal diferentes aos empregados na pesquisa.

Realizar ensaios controlando a temperatura, por meio de um termômetro, com a finalidade de avaliar a mudança da resistência conforme a mudança de temperatura.

Realizar pesquisas aplicando os ensaios de deformidade, permeabilidade e ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais para obtenção do ângulo de atrito e coesão.

Estudar o aumento da resistência à tração, para utilizar esse tipo de solo em camadas superficiais de pavimentos.

Executar trechos experimentais instrumentados, para avaliação do desempenho de pavimentos com camadas de solo estabilizados com cinza de casca de arroz e cal.

Avaliar o desempenho de pavimentos executados com camadas de solo estabilizado com cal e com cal e CCA. Comparar resultados obtidos em campo com os previstos em modelos numéricos.

Investigar a possibilidade de aplicação de outras técnicas de estabilização ao solo analisado na pesquisa, a fim de verificar qual a melhor técnica construtiva em termos técnicos, econômicos e financeiros.

Promover a cura das misturas de solo+cal e solo+Cal+CCA em diferentes temperaturas e verificar a variação de suas propriedades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Provas Cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

_____. **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

_____. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira 4,8mm – Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

_____. **NBR 7175**: Cal Hidratada para Argamassas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 12004**: Solo – Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1990.

_____. **NBR 12253**: Solo-Cimento – Dosagem para o Emprego como Camada de Pavimento - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1992.

ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia With Rice Husk Ash as an Additive**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 10, n. 2, PP. 117 – 134, Amsterdam, 1992.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO M145-42: Specifications for Highway Materials**. Washington, D. C., 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1998.

_____. **ASTM D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. Philadelphia, 1985.

_____. **ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime/Mixtures**. Philadelphia, 1966.

ARABANI, M.; VEIS KARAMI, M. **Geomechanical Properties of Lime Stabilized Clayey Sands**. In: 2ª INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECICLYNG OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRAESTRUCTURE, 10 p., Paris, 2005.

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

BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MUNTOHAR, A. S. **Effect of the Cement – Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. <Disponível em : <http://www.ejge.com/2003/Ppr0304/Abs0304.htm>>. Publicado no site em 2003. 11 p., 2003.

BASMA, A. A.; TUNCER, E. R. **Effect of Lime on Volume Change and Compressibility of Expansive Clays**. Transportation Research Record, n. 1295, p. 52 – 61, Washington D.C., 1991.

BEHAK, L. **Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso Uruguaí com Cinza de Casca de Arroz e Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC-UFRGS, Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, L. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. **Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature**. PCA R&D Serial N° 2066, Portland Cement Association, 60 p., Skokie, Illinois, USA, 2003.

BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. **Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience**. Cement and Concrete Research; v. 20, n. 5, pp. 795 – 802, USA, 1990.

BERTUOL, F. **Caracterização Geotécnica da Sensibilidade de um Depósito Sedimentar do Rio Grande do Sul com o Uso de Ensaio de Laboratório**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6 ed. Tradução All Tasks. Revisão Técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

DNER ME 093. **Determinação da Densidade Real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF, 1994.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Publicação IPR 719, 3 ed. Rio de Janeiro, RJ. 278 p.

DNIT (1996). **Manual de Pavimentação**. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2ª Ed.

DNIT 058 - ES (2004). **Pavimento Rígido**. Execução de Sub-base de Solo-Cimento – Especificações de Serviço. Rio de Janeiro.

DNIT 143 – ES (2010). **Pavimentação**. Base de Solo-Cimento – Especificações de Serviço. Rio de Janeiro.

EARTH GOOGLE. **Localização: Alegrete/RS**. Acessado em 06/12/2011.

ECONSULTING, Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda. **Relatório de Ensaio N° 26305/15.11**, Viamão/RS, 2011.

EPPS, J. A.; DUNLAP, W. A.; GALLAWAY, B. M. **Soil Stabilization: A Mission Oriented Approach**. Highway Research Record, n. 351, pp. 1 – 20, Washington, D. C., 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

HERRIN, J. R.; MITCHELL, H. **Lime-Soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, n. 304, pp. 99 – 121, Washington, D. C., 1961.

INMET (2012). **Instituto Nacional de Meteorologia**. <Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

IRGA (2011). **Instituto Rio Grandense do Arroz**. <Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/uploads/anexos/1319216535Area_Producao_e_Produtividade.pdf>, publicado em 20 de maio de 2011, 3 p., 2011.

JAMES, J.; RAO, S.M. **Reactivity of Rice Husks Ash**. Cement Concrete Research, n. 16, pp 269 – 302, 1986.

JULIANO, B. O. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minneapolis, 1985.

KORISA, J. **Rice and Its By-products**. Edward Arnold, 2ª Ed., 426p., London, 1958.

LAMBE, T. W. **Soil Stabilization**. In: Foundation Engineering, Cap. 4, Editado por G. A. Leonards, Ed. Mc Graw – Hill Book Co., 1962.

LAZARO, R. C.; MOH, Z. C. **Stabilization of Deltaic Clays with Lime-Rice Husk Ash Mixtures**. In: 2ª SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, pp. 215-223, 1970.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização de Solos III: Mistura Solo-Cal para fins Rodoviários**. Caderno Didático n.334, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 40p., 1993.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary and Findings.** Prepared for the National Lime Association, 1999.

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC-UFRGS, Porto Alegre, 2004.

MENDONÇA, A. A.; SANTOS, M. F.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; FONTES, M. P. F. **Resistência Mecânica de Misturas Solo-Cal: Estudo de Caso com Dois Solos de Viçosa – MG.** In: 30ª RAPv, Salvador, 24 a29 de novembro, 1996.

METHA, P. K. **Rice Hull Ash Cement. High-Quality, Acid Resisting.** ACI Journal, pp. 235 – 236, USA, 1975.

METHA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material.** Advances in Concrete Technology, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

MOURA, E. **Notas de Aula – Mecânica dos Solos.** Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC/SP. São Paulo, 2009.

MUNTOHAR, A. S.; HANTORO, G. **Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering. <Disponível em: www.ejge.com/2000/Ppr0019/Abs0019.htm>, Publicado em 2000, 12 p., 2000.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). **Lime-Treated Soil Construction Manual. Lime Stabilization & Lime Modification.** NLA, Bulletin N° 326, 41 p., 2004.

NÚÑES, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC-UFRGS, 150 p., Porto Alegre, 1991.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3ª Edição. Editora Terratek, 2007.

OSINUBI, K. J. **Influence of Compactive Efforts and Compaction Delays on Lime-Treated Soil.** Journal of Transportation Engineering, Março/Abril, 1998.

PETRY, T. M.; GLAZIER, E. J. **The Effect of Organic Content on Lime Treatment of Highly Expansive Clay.** In: 2ª INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 15 p., Paris, 2005.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/2ª Edição.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils.** Transportation Research Record, n. 1546, PP. 24 – 31, Washington D. C., 1996.

RAHMAN, M. A. **The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction.** Building and Environment Journal, v. 21, n. 1, PP. 57 – 61; England, 1986.

SILVEIRA, A. A.; RUARO, P. **A adição de cinza de casca de arroz em concretos: Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto.** Seminário da Disciplina de Novos Materiais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

SIVAPULLAIAH, P.V.; SRIDHARAN, A. RAMESH, H. N. Strength behavior of lime-treated soil in the presence of sulphate. **Canadian Geotechnical Journal**, n.37, p. 1358-1367. 2000.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de Um Solo Molde Tratado Com Cal, Visando Seu Uso em Fundações Superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGE/UFRGS, Porto Alegre, 1994.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1987). **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction.** Washington, D.C.: TRB, 58 p. (State of the Art Report, 5).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **State of the Art - Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction.** Report n° 180, Washington: TRB, 31 p., 1976.

VELUPILLAI, L., MAHIN, D. B., WARSHAW, J. W., WAILES, E. J. **A Study of the Market for the Rice-Husk-to-Energy Systems and Equipment.** Louisiana Agricultural Centre, 24 p., Louisiana, 1996.

ANEXO A – Planilhas Ensaios Granulometria

TABELA A.1
Granulometria Solo Natural

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1.074	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa	
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,80	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	4,8 - 2,0mm	0,00
Água (g)	73,83	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Média	
		Solo Seco (g)	81,54	2,0 - 0,42mm	30,64
		Água (g)	6,02	Areia Fina	
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,97	Umidade Higroscópica(%)	7,38	0,42 - 0,074mm	67,14
Amostra Total Seca (g)	999,97	Fator de Correção	0,9312	Silte+Argila(<0,074mm)	2,22
				Total	100,00

PENEIRAMENTO

Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	98,74	10	10	90	1,2
N ^o 30	114,88	11	21	79	0,6
N ^o 40	92,81	9	31	69	0,42
N ^o 50	157,92	16	46	54	0,30
N ^o 100	444,04	44	91	9	0,15
N ^o 200	69,40	7	98	2	0,074

TABELA A.2
Granulometria 94%Solo + 6% Cal

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa	
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,46	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	4,8 - 2,0mm	0,00
Água (g)	73,80	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Média	
		Solo Seco (g)	81,54	2,0 - 0,42mm	41,02
		Água (g)	6,02	Areia Fina	
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,66	Umidade Higroscópica(%)	7,38	0,42 - 0,074mm	58,31
Amostra Total Seca (g)	999,66	Fator de Correção	0,9312	Silte+Argila(<0,074mm)	0,68
				Total	100,00

PENEIRAMENTO

Peneiras	Material Retido			% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
	Peso (g)	% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	199,13	20	20	80	1,2
N ^o 30	105,37	11	30	70	0,6
N ^o 40	105,52	11	41	59	0,42
N ^o 50	191,84	19	60	40	0,30
N ^o 100	305,61	31	91	9	0,15
N ^o 200	85,43	9	99	1	0,074

TABELA A.3
Granulometria 90% Solo + 10% Cal

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.072,88	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	41,93
Água (g)	73,76	Solo Seco (g)	81,54	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	56,80
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,12	Água (g)	6,02	Silte+Argila(<0,074mm)	1,27
Amostra Total Seca (g)	999,12	Umidade Higroscópica(%)	7,38	Total	100,00
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO

Peneiras	Peso (g)	Material Retido		% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
		% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	185,39	19	19	81	1,2
N ^o 30	107,67	11	29	71	0,6
N ^o 40	125,85	13	42	58	0,42
N ^o 50	205,30	21	62	38	0,30
N ^o 100	280,76	28	91	9	0,15
N ^o 200	81,45	8	99	1	0,074

TABELA A.4
Granulometria 87% Solo + 13% Cal

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1.073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,18	Cápsula e Solo Úmido (g)	93,79	Areia Média 2,0 - 0,42mm	45,92
Água (g)	73,78	Solo Seco (g)	81,54	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	53,18
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,40	Água (g)	6,02	Silte+Argila(<0,074mm)	0,89
Amostra Total Seca (g)	999,40	Umidade Higroscópica(%)	7,38	Total	100,00
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO

Peneiras	Peso (g)	Material Retido		% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
		% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	249,98	25	25	75	1,2
N ^o 30	109,72	11	36	64	0,6
N ^o 40	99,27	10	46	54	0,42
N ^o 50	178,63	18	64	36	0,30
N ^o 100	269,66	27	91	9	0,15
N ^o 200	83,22	8	99	1	0,074

TABELA A.5
Granulometria 85% Solo + 10% Cal + 5% CCA

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1,073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa	0,00
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,26	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	4,8 - 2,0mm	
Água (g)		Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Média	
		Solo Seco (g)	81,54	2,0 - 0,42mm	38,75
	73,79	Água (g)	6,02	Areia Fina	
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,47	Umidade Higroscópica(%)	7,38	0,42 - 0,074mm	59,97
Amostra Total Seca (g)	999,47	Fator de Correção	0,9312	Silte+Argila(<0,074mm)	1,28
				Total	100,00

PENEIRAMENTO

Peneiras	Peso (g)	Material Retido		% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
		% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	171,51	17	17	83	1,2
N ^o 30	102,20	10	27	73	0,6
N ^o 40	113,56	11	39	61	0,42
N ^o 50	220,75	22	61	39	0,30
N ^o 100	280,83	28	89	11	0,15
N ^o 200	97,83	10	99	1	0,074

TABELA A.6
Granulometria 80% Solo + 10% Cal + 10% CCA

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1,073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa	0,00
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,08	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	4,8 - 2,0mm	
Água (g)		Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Média	
		Solo Seco (g)	81,54	2,0 - 0,42mm	38,29
	73,78	Água (g)	6,02	Areia Fina	
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,30	Umidade Higroscópica(%)	7,38	0,42 - 0,074mm	59,91
Amostra Total Seca (g)	999,30	Fator de Correção	0,9312	Silte+Argila(<0,074mm)	1,80
				Total	100,00

PENEIRAMENTO

Peneiras	Peso (g)	Material Retido		% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
		% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	183,79	18	18	82	1,2
N ^o 30	94,31	9	28	72	0,6
N ^o 40	104,56	10	38	62	0,42
N ^o 50	220,06	22	60	40	0,30
N ^o 100	275,15	28	88	12	0,15
N ^o 200	103,44	10	98	2	0,074

TABELA A.7
Granulometria 75%Solo + 10% Cal + 15%CCA

Amostra Total Seca	Umidade Higroscópica			Resumo Granulometria (%)	
Amostra Total Úmida (g)	1,073	Cápsula N ^o	4	Pedregulho (>4,8mm)	0,00
Retido n ^o 10 (g)	0,00	Peso Cápsula N ^o (g)	12,25	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	0,00
Passando N ^o 10 Úmida (g)	1.073,10	Cápsula e Solo Úmido (g)	99,81	Areia Média 2,0 - 0,42mm	41,18
Água (g)	73,78	Cápsula e Solo Seco (g)	93,79	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	57,33
Passando N ^o 10 Seca (g)	999,32	Solo Seco (g)	81,54	Silte+Argila(<0,074mm)	1,48
Amostra Total Seca (g)	999,32	Água (g)	6,02	Total	100,00
		Umidade Higroscópica(%)	7,38		
		Fator de Correção	0,9312		

PENEIRAMENTO

Peneiras	Peso (g)	Material Retido		% Que Passa da Amostra Total	Peneiras (mm)
		% Amostra Total	% Acumulada		
3 pol		0	0	100	76,2
2 pol		0	0	100	50,8
1 1/2 pol		0	0	100	38,1
1 pol		0	0	100	25,4
3/4 pol		0	0	100	19,1
3/8 pol		0	0	100	9,5
N ^o 4		0	0	100	4,8
N ^o 10		0	0	100	2,0
N ^o 16	233,02	23	23	77	1,2
N ^o 30	87,10	9	32	68	0,6
N ^o 40	91,44	9	41	59	0,42
N ^o 50	255,00	26	67	33	0,30
N ^o 100	216,99	22	88	12	0,15
N ^o 200	100,97	10	99	1	0,074

ANEXO B – Planilhas Ensaio Limites de Atterberg

TABELA B.1
Limites de Atterberg do Solo Natural

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula	1	3	10	13	14	
⊖	Total Úmido	18,40	26,54	22,47	18,44	20,25
○	Total Seco	18,01	25,94	21,81	18,01	19,78
∩	Cápsula	15,14	21,05	18,04	15,20	16,60
∩	Água	0,39	0,60	0,66	0,43	0,47
∩	Solo Seco	2,87	4,89	3,77	2,81	3,18
Umidade (%)		13,59	12,27	17,51	15,30	14,78
Limite de Plasticidade		14,69				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes	52		33		30		18		14		
Número da Cápsula	90	6	70	16	26	22	9	66	86	31	
⊖	Total Úmido	34,15	32,17	31,91	33,80	31,51	31,05	33,32	33,91	32,13	35,63
○	Total Seco	33,26	31,46	31,10	32,94	30,67	30,37	32,24	32,71	31,26	34,37
∩	Cápsula	27,34	26,76	25,58	27,24	25,39	26,16	26,11	25,58	25,96	26,99
∩	Água	0,89	0,71	0,81	0,86	0,84	0,68	1,08	1,20	0,87	1,26
∩	Solo Seco	5,92	4,70	5,52	5,70	5,28	4,21	6,13	7,13	5,30	7,38
Umidade (%)		15,0	15,1	14,7	15,1	15,9	16,2	17,6	16,8	16,4	17,1
Umidade Média (%)		15,1		14,9		16,0		17,2		16,7	

GRÁFICO B.1
Limites de Atterberg do Solo Natural

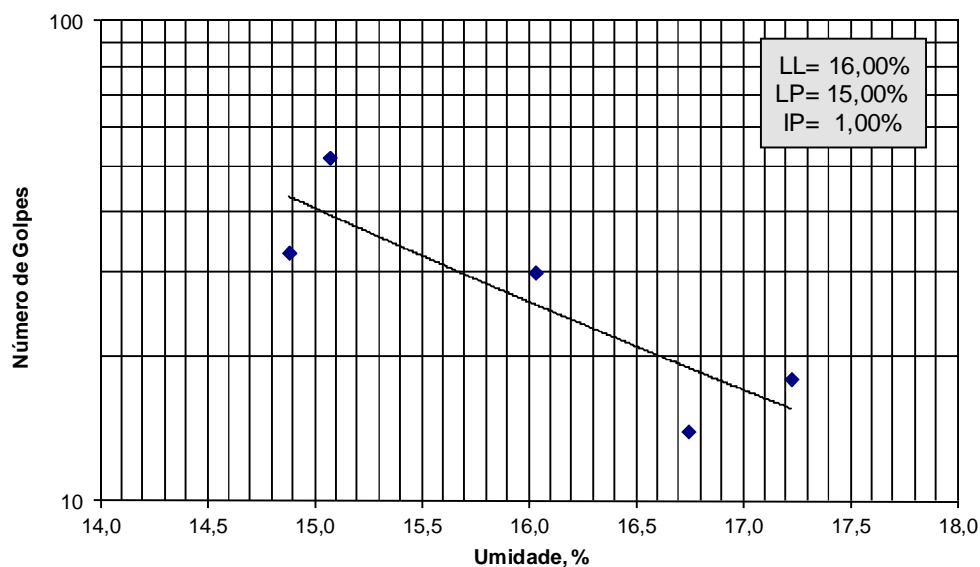


TABELA B.2
Limites de Atterberg 94%Solo + 6% Cal

LIMITE DE PLASTICIDADE					
Número da Cápsula	24	49	18	4	57
⊕ Total Úmido	20,18	20,69	22,80	21,29	22,22
○ Total Seco	19,95	20,35	22,19	20,95	21,75
∞ Cápsula	18,61	18,33	18,92	19,16	19,10
∞ Água	0,23	0,34	0,61	0,34	0,47
∞ Solo Seco	1,34	2,02	3,27	1,79	2,65
Umidade (%)	17,16	16,83	18,65	18,99	17,74
Limite de Plasticidade	17,88				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes	40		31		26		18		14		
Número da Cápsula	90	19	67	62	60	82	97	76	73	15	
⊕ Total Úmido	24,52	27,37	26,89	25,51	26,46	25,41	25,57	29,64	27,58	27,47	
○ Total Seco	23,72	26,22	25,55	24,37	25,00	24,40	24,18	28,61	26,06	25,98	
∞ Cápsula	19,08	19,60	18,64	18,19	17,17	17,57	18,16	23,02	18,44	18,19	
∞ Água	0,80	1,15	1,34	1,14	1,46	1,01	1,39	1,03	1,52	1,49	
∞ Solo Seco	4,64	6,62	6,91	6,18	7,83	6,83	6,02	5,59	7,62	7,79	
Umidade (%)	17,2	17,4	19,4	18,4	18,6	14,8	23,1	18,4	19,9	19,1	
Umidade Média (%)	17,3		18,9		16,7		20,8		19,5		

GRÁFICO B.2
Limites de Atterberg 94%Solo + 6% Cal

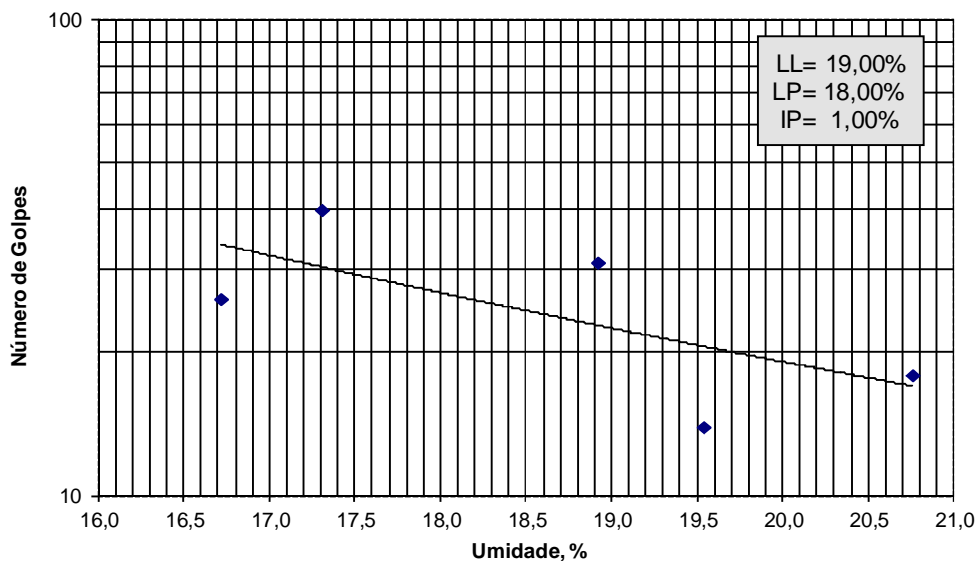


TABELA B.3
Limites de Atterberg 90%Solo + 10% Cal

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		15	2	6	20	8
S O L O	Total Úmido	14,56	16,04	12,88	14,42	12,53
	Total Seco	14,26	15,75	12,68	13,97	12,24
	Cápsula	12,05	14,01	11,52	11,16	10,55
	Água	0,30	0,29	0,20	0,45	0,29
	Solo Seco	2,21	1,74	1,16	2,81	1,69
Umidade (%)		13,57	16,67	17,24	16,01	17,16
Limite de Plasticidade		16,13				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		50		44		32		23		18	
Número da Cápsula		11	14	4	12	13	18	17	5	1	9
S O L O	Total Úmido	18,56	22,38	24,21	23,46	16,32	15,88	22,01	22,65	15,95	17,60
	Total Seco	17,33	20,75	22,86	21,95	15,32	15,10	21,04	21,45	14,94	16,50
	Cápsula	10,62	11,64	15,14	13,71	10,05	10,98	16,10	15,24	10,30	10,87
	Água	1,23	1,63	1,35	1,51	1,00	0,78	0,97	1,20	1,01	1,10
	Solo Seco	6,71	9,11	7,72	8,24	5,27	4,12	4,94	6,21	4,64	5,63
Umidade (%)		18,3	17,9	17,5	18,3	19,0	18,9	19,6	19,3	21,8	19,5
Umidade Média (%)		18,1		17,9		19,0		19,5		20,7	

GRÁFICO B.3
Limites de Atterberg 90%Solo + 10% Cal

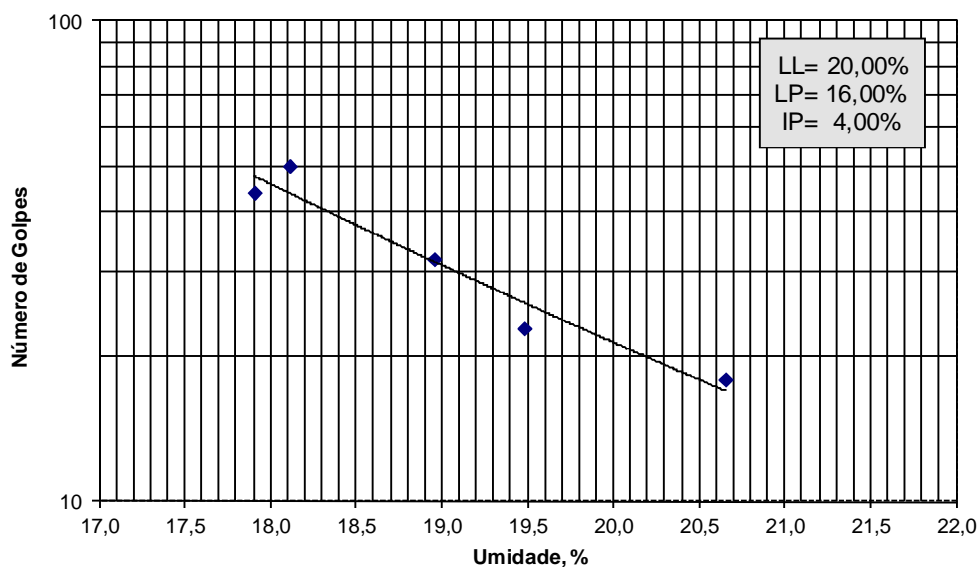


TABELA B.4
Limites de Atterberg 87%Solo + 13% Cal

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		161	168	175	2	1
⑥ O S L P	Total Úmido	19,76	18,18	14,48	9,46	9,20
	Total Seco	19,26	17,73	14,15	9,08	8,89
	Cápsula	16,18	14,71	12,07	6,56	6,87
	Água	0,50	0,45	0,33	0,38	0,31
	Solo Seco	3,08	3,02	2,08	2,52	2,02
Umidade (%)		16,23	14,90	15,87	15,08	15,35
Limite de Plasticidade		15,49				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		42		37		28		20		17	
Número da Cápsula		117	158	160	157	171	120	166	154	159	152
⑥ O S L P	Total Úmido	21,32	17,17	17,89	22,12	21,10	22,20	24,04	23,60	23,44	23,44
	Total Seco	20,56	16,36	16,88	20,79	20,01	20,96	22,45	22,27	21,66	21,97
	Cápsula	16,05	11,60	11,14	13,79	14,07	14,25	13,91	15,22	12,37	14,31
	Água	0,76	0,81	1,01	1,33	1,09	1,24	1,59	1,33	1,78	1,47
	Solo Seco	4,51	4,76	5,74	7,00	5,94	6,71	8,54	7,05	9,29	7,66
Umidade (%)		16,9	17,0	17,6	19,0	18,4	18,5	18,6	18,9	19,2	19,2
Umidade Média (%)		16,9		18,3		18,4		18,7		19,2	

GRÁFICO B.4
Limites de Atterberg 87%Solo + 13% Cal

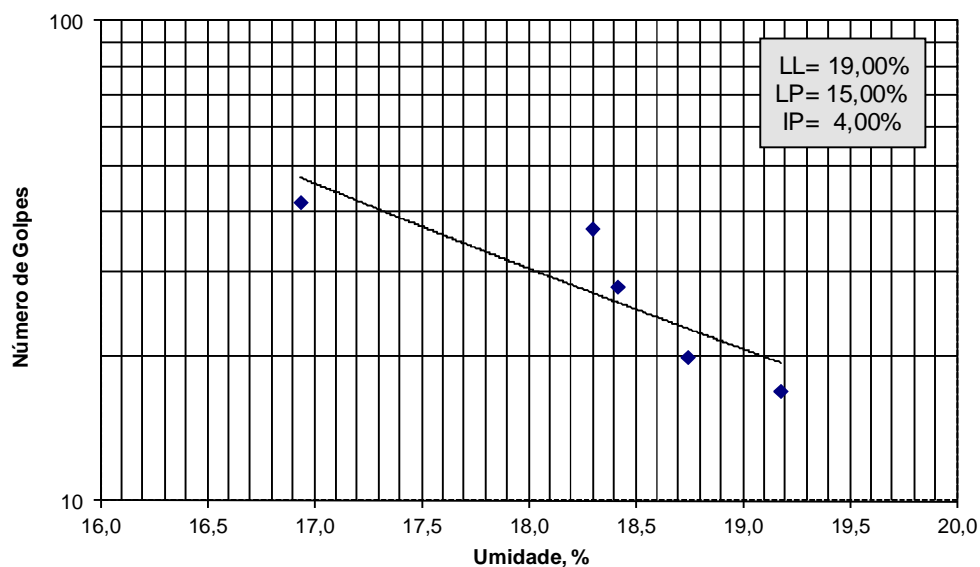


TABELA B.5
Limites de Atterberg 85% Solo + 10% Cal + 5% CCA

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula	5	61	95	98	29	
⊕	Total Úmido	21,28	21,60	21,71	20,45	24,40
	Total Seco	20,92	21,05	21,14	20,08	24,01
⊖	Cápsula	19,07	18,15	18,68	18,15	22,11
⊗	Água	0,36	0,55	0,57	0,37	0,39
⊘	Solo Seco	1,85	2,90	2,46	1,93	1,90
Umidade (%)		19,46	18,97	23,17	19,17	20,53
Limite de Plasticidade		20,26				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes	57		43		33		24		13		
Número da Cápsula	11	21	39	89	71	16	91	83	26	25	
⊕	Total Úmido	25,01	27,20	24,23	25,64	25,60	25,93	25,33	27,34	24,81	26,08
	Total Seco	23,72	25,61	23,10	24,45	24,10	24,55	23,93	25,89	23,37	24,72
⊖	Cápsula	18,26	18,77	18,18	19,40	18,11	18,93	18,18	20,01	17,54	19,08
⊗	Água	1,29	1,59	1,13	1,19	1,50	1,38	1,40	1,45	1,44	1,36
⊘	Solo Seco	5,46	6,84	4,92	5,05	5,99	5,62	5,75	5,88	5,83	5,64
Umidade (%)		23,6	23,2	23,0	23,6	25,0	24,6	24,3	24,7	24,7	24,1
Umidade Média (%)		23,4		23,3		24,8		24,5		24,4	

GRÁFICO B.5
Limites de Atterberg 85% Solo + 10% Cal + 5% CCA

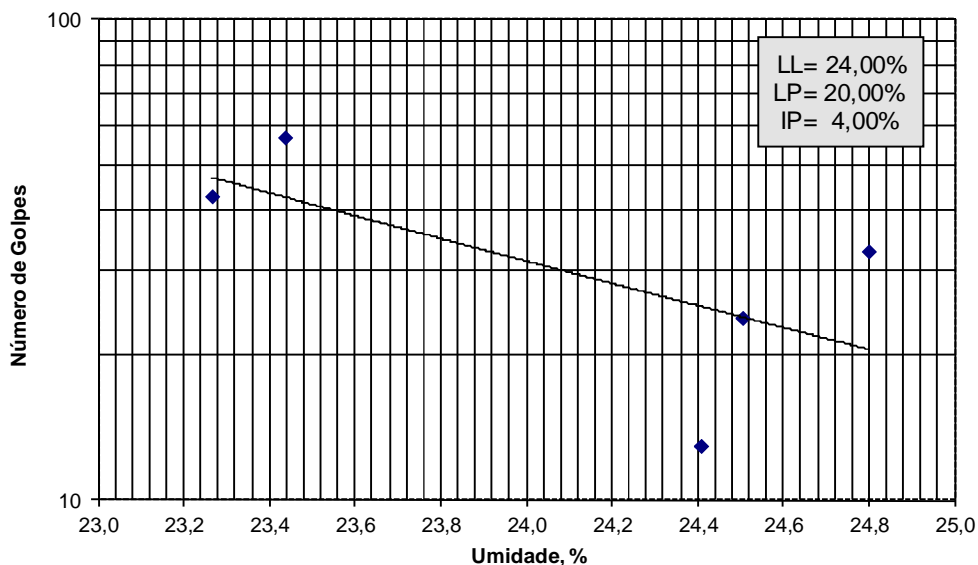


TABELA B.6
Limites de Atterberg 80% Solo + 10% Cal + 10% CCA

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		3	20	12	1	11
① O S L L	Total Úmido	18,02	13,80	16,05	13,31	13,13
	Total Seco	17,66	13,33	15,65	12,79	12,69
	Cápsula	15,91	11,15	13,70	10,29	10,60
	Água	0,36	0,47	0,40	0,52	0,44
	Solo Seco	1,75	2,18	1,95	2,50	2,09
Umidade (%)		20,57	21,56	20,51	20,80	21,05
Limite de Plasticidade		20,90				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		42		30		21		17		13	
Número da Cápsula		7	5	2	17	8	4	10	16	15	18
① O S L L	Total Úmido	18,46	22,42	20,63	22,37	17,91	22,76	19,20	16,50	21,14	21,94
	Total Seco	17,27	21,00	19,34	21,10	16,42	21,21	17,77	15,41	19,28	19,69
	Cápsula	12,40	15,23	13,98	16,04	10,53	15,12	12,08	11,13	12,04	10,96
	Água	1,19	1,42	1,29	1,27	1,49	1,55	1,43	1,09	1,86	2,25
	Solo Seco	4,87	5,77	5,36	5,06	5,89	6,09	5,69	4,28	7,24	8,73
Umidade (%)		24,4	24,6	24,1	25,1	25,3	25,5	25,1	25,5	25,7	25,8
Umidade Média (%)		24,5		24,6		25,4		25,3		25,7	

GRÁFICO B.6
Limites de Atterberg 80% Solo + 10% Cal + 10% CCA

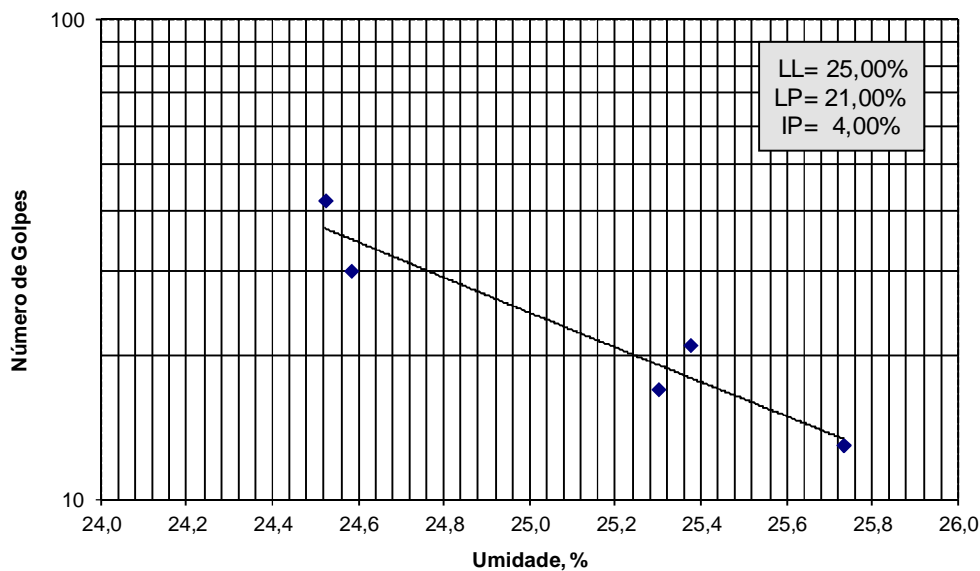
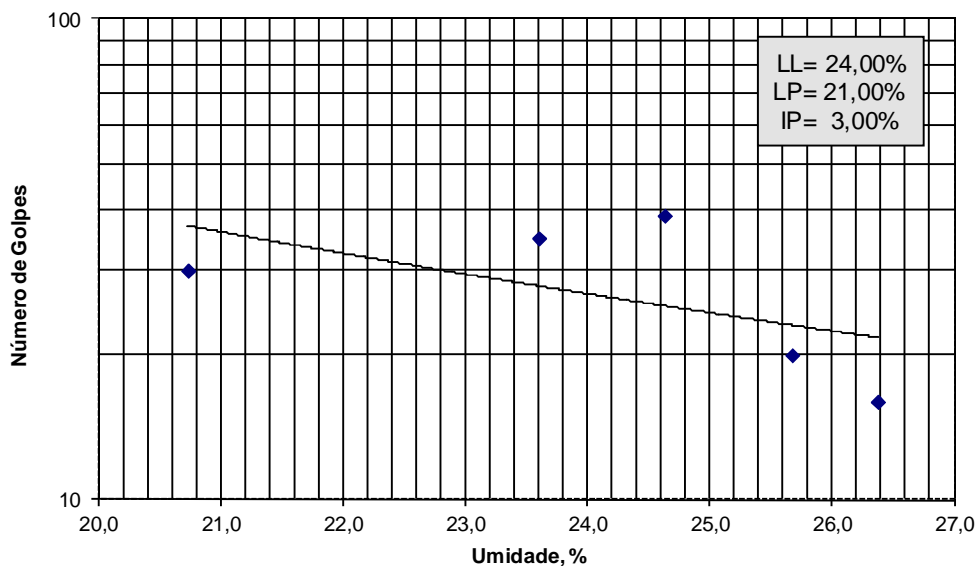


TABELA B.7
Limites de Atterberg 75% Solo + 10% Cal + 15% CCA

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		107	104	115	119	106
⑨ O S E L	Total Úmido	12,89	18,58	19,19	17,76	16,43
	Total Seco	12,52	18,23	18,75	17,23	15,87
	Cápsula	10,49	16,49	16,76	14,71	13,21
	Água	0,37	0,35	0,44	0,53	0,56
	Solo Seco	2,03	1,74	1,99	2,52	2,66
Umidade (%)		18,23	20,11	22,11	21,03	21,05
Limite de Plasticidade		20,51				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		39		35		30		20		16	
Número da Cápsula		123	121	11	116	122	113	109	112	125	114
⑨ O S E L	Total Úmido	20,83	22,57	21,57	22,80	23,37	22,50	22,19	22,45	20,80	21,33
	Total Seco	19,47	21,16	20,29	21,34	21,99	20,93	20,59	20,96	19,43	20,01
	Cápsula	14,00	15,38	15,08	14,89	13,59	14,66	14,32	15,19	14,26	14,98
	Água	1,36	1,41	1,28	1,46	1,38	1,57	1,60	1,49	1,37	1,32
	Solo Seco	5,47	5,78	5,21	6,45	8,40	6,27	6,27	5,77	5,17	5,03
Umidade (%)		24,9	24,4	24,6	22,6	16,4	25,0	25,5	25,8	26,5	26,2
Umidade Média (%)		24,6		23,6		20,7		25,7		26,4	

GRÁFICO B.7
Limites de Atterberg 75% Solo + 10% Cal + 15% CCA



ANEXO C – Planilhas Ensaio Densidade Real dos Grãos

TABELA C.1
Densidade Real dos Grãos Solo Natural

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:			A
Capsula N°	84	90	93	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	18,10	19,09	17,66	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	35,24	37,40	34,57	Temperatura (°C)	23,0	23,0	23,0
cap. + SS (g)	34,66	36,77	33,99	Pic. + água (g)	666,32	1306,25	1321,23
Umidade (%)	3,50	3,56	3,55	Pic. + água + solo(g)	696,39	1366,25	1381,72
w (%):			3,54	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,65	2,64	2,68
				G _s :			2,66

TABELA C.2
Densidade Real dos Grãos 94%Solo + 6% Cal

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:			A
Capsula N°	24	41	88	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	18,63	21,43	18,46	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	31,78	33,63	32,88	Temperatura (°C)	22,0	22,0	21,0
cap. + SS (g)	31,44	33,32	32,51	Pic. + água (g)	666,11	1303,85	1321,27
Umidade (%)	2,65	2,61	2,63	Pic. + água + solo(g)	696,47	1366,20	1382,27
w (%):			2,63	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,65	2,78	2,67
				G _s :			2,70

TABELA C.3
Densidade Real dos Grãos 90%Solo + 10% Cal

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:			A
Capsula N°	31	57	62	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	18,83	19,14	18,20	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	36,75	38,80	40,58	Temperatura (°C)	19,0	20,0	19,0
cap. + SS (g)	36,19	38,17	39,88	Pic. + água (g)	667,15	1307,19	1321,90
Umidade (%)	3,23	3,31	3,23	Pic. + água + solo(g)	697,19	1367,76	1383,53
w (%):			3,26	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,63	2,67	2,75
				G _s :			2,68

TABELA C.4
Densidade Real dos Grãos 87%Solo + 13% Cal

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula N°	30	41	88	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	17,82	21,43	18,46	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	44,30	43,37	44,64	Temperatura (°C)	20,0	20,0	20,0
cap. + SS (g)	43,51	42,73	43,89	Pic. + água (g)	666,98	1306,58	1321,98
Umidade (%)	3,08	3,00	2,95	Pic. + água + solo(g)	697,26	1367,80	1382,96
		w (%):	3,01	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,66	2,71	2,69
						G _s :	2,68

TABELA C.5
Densidade Real dos Grãos 85%Solo + 10% Cal + 5% CCA

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula N°	129	131	134	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	13,35	15,97	15,48	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	47,50	45,27	49,07	Temperatura (°C)	13,0	13,0	13,0
cap. + SS (g)	46,68	44,56	48,28	Pic. + água (g)	675,18	1307,50	1323,16
Umidade (%)	2,46	2,48	2,41	Pic. + água + solo(g)	705,56	1368,32	1384,08
		w (%):	2,45	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,65	2,65	2,66
						G _s :	2,65

TABELA C.6
Densidade Real dos Grãos 80%Solo + 10% Cal + 10% CCA

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula N°	102	133	145	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	15,82	13,78	14,63	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	49,12	50,91	49,30	Temperatura (°C)	22,0	22,0	22,0
cap. + SS (g)	48,15	49,88	48,45	Pic. + água (g)	674,18	1305,10	1320,53
Umidade (%)	3,00	2,85	2,51	Pic. + água + solo(g)	704,38	1365,88	1381,40
		w (%):	2,79	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,64	2,66	2,67
						G _s :	2,66

TABELA C.7
Densidade Real dos Grãos 75% Solo + 10% Cal + 15% CCA

Ensaio executado conforme a Norma ABT NBR 6508/94							
Umidade higroscópica				Massa específica dos grãos # 2,4mm			
				Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Capsula N°	4	29	63	Picnômetro N°	2	4	3
cap. (g)	19,18	22,10	17,81	massa do solo úm. Utilizado (g)	50	100	100
cap. + SH (g)	43,21	55,06	52,47	Temperatura (°C)	19,0	19,0	19,0
cap. + SS (g)	42,54	54,13	51,50	Pic. + água (g)	674,88	1306,31	1321,74
Umidade (%)	2,87	2,90	2,88	Pic. + água + solo(g)	704,95	1366,56	1381,50
		w (%):	2,88	Mass. Esp. Água (g/cm3)	1,00	1,00	1,00
				G (g/cm3)	2,62	2,63	2,60
						G_s:	2,62

ANEXO D – Planilhas Ensaios Compactação

TABELA D.1
Compactação Solo Natural

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica			
						1	2	3	
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5000	4960	4900	4860	cápsula			
água higr. (ml)	377,71	614,035088	684,137931	747,457627	843,4710744	C-cápsula	12,25	12,26	12,61
água adic. (ml)	322,29	87,7192982	85,5172414	124,576271	60	C+S+A	99,81	97	95,62
água total (ml)	700,00	701,75	769,66	872,03	903,47	C+S	93,79	91,22	89,5
úmido. Estimada (w%)	14	16	18	21	23	A-água	6,02	5,78	6,12
úmido. Higroscópica (w%)	7,554					S-solo sec.	81,54	78,96	76,89
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,38	7,32	7,96
Massa do cilindro (gr)	4440	4460	4440	4460	4480	w% méd.	7,554		
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camadas e 21 golpes por camada			
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4				
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180				
Determinações	1	2	3	4	5				
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6420	6600	6660	6660	6620				
Massa do solo úmido (g)	1980	2140	2220	2200	2140				
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	2,00	2,16	2,24	2,22	2,16				
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5				
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,866	1,998	2,046	1,984	1,911				
teor de umidade medido (%)	6,97	7,93	9,37	11,77	12,89				

TABELA D.2
Compactação 94% Solo + 6% Cal

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica			
						1	2	3	
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5020	4980	4880	4800	cápsula			
água higr. (ml)	399,83	537,857143	611,578947	673,103448	766,386555	C-cápsula	17,63	17,55	21,45
água adic. (ml)	200,17	89,6428571	87,3684211	126,206897	80,6722689	C+S+A	59,99	58,55	65,59
água total (ml)	600,00	627,50	698,95	799,31	847,06	C+S	56,86	55,5	62,33
úmido. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	3,13	3,05	3,26
úmido. Higroscópica (w%)	7,997					S-solo sec.	39,23	37,95	40,88
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,98	8,04	7,97
Massa do cilindro (gr)	4420	4420	4420	4420	4420	w% méd.	7,997		
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada			
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4				
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180				
Determinações	1	2	3	4	5				
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6440	6500	6560	6540	6500				
Massa do solo úmido (g)	2020	2080	2140	2120	2080				
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	2,04	2,10	2,16	2,14	2,10				
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5				
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,865	1,897	1,934	1,879	1,824				
teor de umidade medido (%)	9,14	10,51	11,54	13,72	14,92				

TABELA D.3
Compactação 90% Solo + 10% Cal

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica		
						1	2	3
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5060	5020	4980	4920	cápsula		
água higr. (ml)	356,06	542,142857	616,491228	686,896552	785,546218	C-cápsula	18,67	18,16
água adic. (ml)	243,94	90,3571429	88,0701754	128,793103	82,6890756	C+S+A	60,25	58,17
água total (ml)	600,00	632,50	704,56	815,69	868,24	C+S	57,46	55,49
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	2,79	2,68
úm. Higroscópica (w%)	7,121					S-solo sec.	38,79	37,33
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,19	7,18
Massa do cilindro (gr)	4480	4480	4480	4480	4480	w% méd.	7,121	
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada		
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4			
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180			
Determinações	1	2	3	4	5			
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6440	6580	6620	6560	6540			
Massa do solo úmido (g)	1960	2100	2140	2080	2060			
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	1,98	2,12	2,16	2,10	2,08			
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5			
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,801	1,903	1,910	1,817	1,776			
teor de úmidade medido (%)	9,68	11,25	12,90	15,38	16,91			

TABELA D.4
Compactação 87% Solo + 13% Cal

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica		
						1	2	3
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5060	4980	4880	4820	cápsula		
água higr. (ml)	378,13	542,142857	611,578947	673,103448	769,579832	C-cápsula	18,66	20,38
água adic. (ml)	221,87	90,3571429	87,3684211	126,206897	81,0084034	C+S+A	59,85	63,84
água total (ml)	600,00	632,50	698,95	799,31	850,59	C+S	56,99	60,74
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	2,86	3,1
úm. Higroscópica (w%)	7,563					S-solo sec.	38,33	40,36
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,46	7,68
Massa do cilindro (gr)	4500	4500	4500	4500	4500	w% méd.	7,563	
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada		
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4			
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180			
Determinações	1	2	3	4	5			
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6420	6520	6620	6540	6520			
Massa do solo úmido (g)	1920	2020	2120	2040	2020			
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	1,94	2,04	2,14	2,06	2,04			
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5			
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,770	1,834	1,898	1,787	1,751			
teor de úmidade medido (%)	9,33	11,00	12,58	15,06	16,29			

TABELA D.5
Compactação 85% Solo + 10% Cal + 5% CCA

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica		
						1	2	3
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5060	4980	4900	4840	cápsula		
água higr. (ml)	349,92	542,142857	611,578947	675,862069	772,773109	C-cápsula	18,91	18,74
água adic. (ml)	250,08	90,3571429	87,3684211	126,724138	81,3445378	C+S+A	69,09	67,72
água total (ml)	600,00	632,50	698,95	802,59	854,12	C+S	65,76	64,55
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	3,33	3,17
úm. Higroscópica (w%)	6,998					S-solo sec.	46,85	45,81
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	7,11	6,92
Massa do cilindro (gr)	4500	4500	4500	4500	4500	w% méd.	6,998	
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada		
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4			
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180			
Determinações	1	2	3	4	5			
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6340	6440	6560	6540	6500			
Massa do solo úmido (g)	1840	1940	2060	2040	2000			
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	1,85	1,96	2,08	2,06	2,02			
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5			
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,690	1,758	1,841	1,782	1,722			
teor de úmidade medido (%)	9,77	11,23	12,77	15,39	17,03			

TABELA D.6
Compactação 80% Solo + 10% Cal + 10% CCA

moldagem	1	2	3	4	5	Úmidade Higroscópica		
						1	2	3
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5040	4940	4840	4740	cápsula		
água higr. (ml)	340,65	540	606,666667	667,586207	756,806723	C-cápsula	18,05	19,1
água adic. (ml)	259,35	90	86,6666667	125,172414	79,6638655	C+S+A	59,93	63,35
água total (ml)	600,00	630,00	693,33	792,76	836,47	C+S	57,25	60,51
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	2,68	2,84
úm. Higroscópica (w%)	6,813					S-solo sec.	39,2	41,41
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	6,84	6,86
Massa do cilindro (gr)	4500	4500	4500	4500	4500	w% méd.	6,813	
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada		
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4			
Volume do cilindro (cm3)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180			
Determinações	1	2	3	4	5			
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6260	6360	6460	6500	6480			
Massa do solo úmido (g)	1760	1860	1960	2000	1980			
Massa esp. úmida compacta (gr/cm3)	1,77	1,87	1,98	2,02	2,00			
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5			
Massa esp. seca compacta (g/cm3)	1,599	1,668	1,732	1,730	1,690			
teor de úmidade medido (%)	10,92	12,40	14,03	16,53	18,06			

TABELA D.7
Compactação 75% Solo + 10% Cal + 15% CCA

moldagem	1	2	3	4	5	Umidade Higroscópica			
						1	2	3	
peso úmido da amostra (g)	5000,00	5040	4960	4840	4740	cápsula			
água higr. (ml)	319,09	540	609,122807	667,586207	756,806723	C-cápsula	17,59	18,34	17,54
água adic. (ml)	280,91	90	87,0175439	125,172414	79,6638655	C+S+A	61,85	62,95	59,34
água total (ml)	600,00	630,00	696,14	792,76	836,47	C+S	59,21	60,24	56,85
úm. Estimada (w%)	12	14	16	19	21	A-água	2,64	2,71	2,49
úm. Higroscópica (w%)	6,382					S-solo sec.	41,62	41,9	39,31
Moldes	1	2	3	4	5	úmidade	6,34	6,47	6,33
Massa do cilindro (gr)	4500	4500	4500	4500	4500	w% méd.	6,382		
Diâmetro do cilindro (cm)	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	OBS: Ensaio Proctor Intermediário Cálculos Conforme NBR 7182 Energia de Compactação Intermediária com a utilização de um cilindro pequeno e soquete grande 3 camada e 21 golpes por camada			
altura corpo de prova (cm)	127,4	127,4	127,4	127,4	127,4				
Volume do cilindro (cm ³)	992,180	992,180	992,180	992,180	992,180				
Determinações	1	2	3	4	5				
Massa do Cilindro + solo úmido (g)	6260	6320	6420	6480	6460				
Massa do solo úmido (g)	1760	1820	1920	1980	1960				
Massa esp. úmida compacta (gr/cm ³)	1,77	1,83	1,94	2,00	1,98				
Componentes (moldes)	1	2	3	4	5				
Massa esp. seca compacta (g/cm ³)	1,597	1,629	1,692	1,710	1,668				
teor de umidade medido (%)	11,07	12,60	14,34	16,67	18,40				

ANEXO E – Planilhas Ensaio Resistência à Compressão Simples

TABELA E.1
Resistência Solo Natural e Misturas (7, 14, 28 e 56 dias)

RCS (MPa) - SOLO NATURAL		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
28/abr	7	0,46
05/mai	14	0,44
19/mai	28	0,89
16/jun	56	1,17

RCS (MPa) - 85%SOLO + 10%CAL + 5%CCA		
Data Compactação: 20/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
27/abr	7	0,79
04/mai	14	0,88
18/mai	28	1,55
15/jun	56	2,32

RCS (MPa) - 94%SOLO + 6%CAL		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
26/abr	7	0,32
03/mai	14	0,33
17/mai	28	0,38
14/jun	56	0,57

RCS (MPa) - 80%SOLO + 10%CAL + 10%CCA		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
28/abr	7	1,05
05/mai	14	1,45
19/mai	28	2,16
16/jun	56	2,6

RCS (MPa) - 90%SOLO + 10%CAL		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
26/abr	7	0,7
03/mai	14	0,53
17/mai	28	0,73
14/jun	56	1,16

RCS (MPa) - 75%SOLO + 10%CAL + 15%CCA		
Data Compactação: 21/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
28/abr	7	1,23
05/mai	14	1,64
19/mai	28	2,23
16/jun	56	2,89

RCS (MPa) - 87%SOLO + 13%CAL		
Data Compactação: 19/04		
Data Romp.:	DIAS	RESISTÊNCIA
26/abr	7	0,89
03/mai	14	0,87
17/mai	28	1,15
14/jun	56	1,37