

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**VITOR REINALDO BORDIGNON**

**EFEITOS DA ADIÇÃO DA CAL HIDRATADA NA ESTABILIZAÇÃO DE  
UM SOLO SEDIMENTAR PARA PAVIMENTAÇÃO URBANA NA  
REGIÃO DE CURITIBA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2015**

**VITOR REINALDO BORDIGNON**

**EFEITOS DA ADIÇÃO DA CAL HIDRATADA NA ESTABILIZAÇÃO DE  
UM SOLO SEDIMENTAR PARA PAVIMENTAÇÃO URBANA NA  
REGIÃO DE CURITIBA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Francisco Kuster Puppi

Co-orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz dos Santos Izzo

**CURITIBA**

**2015**

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

B729 Bordignon, Vitor Reinaldo  
2015 Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização  
de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região  
de Curitiba / Vitor Reinaldo Bordignon.-- 2015.  
126 f.: il.; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil, Curitiba, 2015.  
Bibliografia: p. 108-114.

1. Solos - Compactação. 2. Cal. 3. Pavimentos. I.Puppi,  
Rogério Francisco Küster. II.Izzo, Ronaldo Luis dos  
Santos. III.Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV.  
Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 624

**Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO Nº \_\_\_\_\_/2015

**EFEITOS DA ADIÇÃO DA CAL HIDRATADA NA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO  
SEDIMENTAR PARA PAVIMENTAÇÃO URBANA NA REGIÃO DE CURITIBA**

por

**VITOR REINALDO BORDIGNON**

Esta Dissertação foi apresentada às **9** horas e **00** minutos do dia **26** de **agosto** de **2015**, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, com área de concentração em Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO.**

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rogério Francisco Kuster Puppi - (UTFPR)  
Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ronaldo Luiz dos Santos Izzo - (UTFPR)  
Co-orientador e Coordenador do PPGE

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira - (UFPR)  
Membro

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann - (UTFPR)  
Membro

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE  
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS CURITIBA

A minha formação como profissional não poderia ter sido concretizada sem a ajuda de meus amáveis e eternos pais Oscar Bruno (*in memoriam*) e Iole Gusso, que, no decorrer da minha vida, proporcionaram-me, além de extenso carinho e amor, os conhecimentos da integridade, da perseverança e de procurar sempre em Deus à força maior para o meu desenvolvimento como ser humano. Por essa razão, gostaria de dedicar e reconhecer à vocês, minha imensa gratidão e sempre amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pelas oportunidades ao longo do caminho, pela eterna companhia e sentimento de fé com os quais enfrentei, enfrento e enfrentarei qualquer desafio.

Agradeço ao Departamento Acadêmico de Construção Civil - DACOC e aos seus ilustres professores, agradeço em especial ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC e a UTFPR pela oportunidade, confiança e respeito que possuo como servidor desta instituição, em especial os meus sinceros agradecimentos ao coordenador do programa Prof. Dr. Ronaldo Luiz dos Santos Izzo.

Agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. Rogério Francisco Kuster Puppi, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória longa, com muitos desafios ainda por superar.

Agradeço e muito ao meu co-orientador o Prof. Dr. Ronaldo Luiz dos Santos Izzo, pela confiança em mim depositada e por todo apoio e dedicação na orientação deste trabalho.

Em especial, agradeço a minha família, pelo apoio e incentivo, pela satisfação que expressam em ver minhas realizações, pelo apoio irrestrito para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A minha mãe Iole, ao meu pai Oscar (*in memoriam*) que infelizmente não pode em vida presenciar este momento tão importante da minha vida, mas sei que onde quer que esteja, nunca deixou de me amar, nem de confiar em mim.

Agradeço aos meus irmãos Marcelo, Maricélia e Marília, aos meus sobrinhos é claro, Henrique, Lucas, Giovana e Julia e aos meus cunhados André e Adriana.

O meu eterno agradecimento a minha querida esposa Lorian e minha filha Milena, que com a sua infinita paciência, sabedoria, confiança e amor soube me amparar nos momentos difíceis que passei.

Quero aqui também expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os professores do programa PPGEC, em especial ao Prof. Dr. Vsévolod Mymrine (Seva), a Profa. Dra. Celimar Azambuja Teixeira, ao Prof. Dr. Alfredo Iarozinski Neto, os professores pesquisadores credenciados pelo PPGEC Prof. Dr. Wellington Mazer

a Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann, e a Dra. Juliana Lundgren Rose os quais contribuíram significativamente para a realização desse trabalho.

O meu agradecimento ao Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira, pelas sugestões, contribuições e participação na banca.

Agradeço aos meus amigos que fiz nas aulas e nos estudos deste mestrado, bem como os colegas de profissão, são tantos que não tenho páginas suficientes para transcrever.

Agradeço a todos aqueles que sempre confiaram em mim, por isso estou aqui com a responsabilidade de escrever alguns nomes, sabendo é claro que irei esquecer-me de alguns, mas mesmo assim vamos lá, meu muito obrigado a: Paulo Sabino, Darci Gonçalves (Maninho), Rui Carlos Filho (Ruizinho), Francisco Ferreira dos Santos (Chicão), Lóris (Alemão), Eric Garcia Ribeiro, Flávio (Fuke), Ramires (Cabelo), Fábio, Liliane, Izabel (Belzinha), Maria, Lucia, Janete, Gustavo, Felipe, Rodrigo, Sandro (Sapo), Eliane, Maria Lígia, Claudia, Fernanda, Guilherme, Elizabeth (dona Beti), José Amilton Sidor (Zeca), Selma Sidor, e é claro o meu companheiro de idas e vindas nos laboratórios Roberto Pan.

Por fim, a todos que de alguma maneira, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Se você quer um ano de prosperidade,  
plante trigo.

Se você quer dez anos de prosperidade,  
plante árvores.

Agora se você quer por toda a vida,  
eduque o homem“.

*(Provérbio Chinês).*



## RESUMO

BORDIGNON, Vitor Reinaldo. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba.** 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A pavimentação urbana é de primordial importância para uma cidade, tanto socioeconômica quanto em qualidade de vida. Os pavimentos urbanos não diferentes dos chamados pavimentos rodoviários, são constituídos por um conjunto de camadas horizontais, sobrepostos ao solo, os quais possuem a função principal de suportar as ações induzidas pelos veículos redistribuindo as tensões transmitidas ao solo. Os solos são importantes materiais para a execução de pavimentação, principalmente por fazerem parte da estrutura básica do pavimento e na sua grande maioria se encontrar disponível em abundância, com um custo muito baixo, entretanto, as suas propriedades normalmente não cumprem os requisitos necessários à execução do pavimento. A estabilização de solos para a execução de bases e sub-bases de pavimentos urbanos constitui um aspecto cada vez mais importante no panorama atual, pelo fato de existir sempre a preocupação com o meio ambiente, existindo hoje a clara consciência de que todos os esforços devem ser feitos no sentido de minimizar os efeitos causados pela exploração de jazidas e deposição do material. Neste sentido este trabalho apresenta os efeitos da adição de diferentes proporções da cal para a estabilização de uma amostra de solo sedimentar da região urbana da cidade de Curitiba. Foi selecionada uma quantidade de amostra de solo da região, para o estudo da estabilização com inserção da cal hidratada do tipo (CHIII) em pó. As duas variáveis analisadas no estudo estão relacionadas com os teores da cal misturada ao solo nas porcentagens de 0%, 3%, 6%, 8% e 16%, e os tempos de cura em que estas misturas foram submetidas a (0, 7, 14, 28 e 56 dias). As misturas testadas foram elaboradas a partir de dosagens definidas por dois métodos: um verificando o comportamento químico das amostras, por meio da evolução dos valores de pH, e o segundo analisando o comportamento mecânico através dos valores de RCS. Verificou-se que a estabilização química analisada por meio de adição da cal, proporcionou um aumento médio de RCS na maioria das amostras do solo estudado, em função de algumas características físicas e químicas das mesmas. Para as misturas com 6%, 8% e 16%, da cal aos 28 dias de cura, a média da RCS foi de 0,57 MPa, 1,06 MPa e 2,37 MPa, respectivamente, para o proctor normal, sendo que para o proctor intermediário, com o mesmo período de cura, e nas mesmas porcentagens, os resultados de RCS foram de 0,54 MPa, 1,04 MPa, e 2,71 MPa, respectivamente. De uma forma global, as misturas solo-cal estudadas apresentaram comportamento aceitável pelas normas vigentes para utilização como camadas de sub-base. Contudo, apenas a mistura com 16% da cal, aos 28 dias, é recomendada para utilização em bases de pavimentos. Mesmo assim, as misturas estudadas constituem uma boa alternativa econômica e sócio-ambiental.

**Palavras-chave:** Estabilização. Solo Sedimentar. Pavimentação. Cal Hidratada.

## ABSTRACT

BORDIGNON, Vitor Reinaldo. **Effects of the addition of hydrated lime to stabilize a sedimentary soil for urban paving in the region of Curitiba.** 2015. 126 f. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – Post-Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technology University of Paraná. Curitiba, 2015.

Urban paving is of paramount importance for a city, both socioeconomic and in quality of life. The urban flooring not different so-called road surface are constituted by a set of horizontal layers, overlaid on the ground, which have the main function of supporting the actions induced by the vehicle redistributing the stresses transmitted to the ground. Soils are important materials for the execution of paving, mainly because they are part of the basic structure of the floor and mostly be available in abundance, with a very low cost, however, their properties usually do not meet the requirements necessary to perform the floor. The soil stabilization for the implementation of urban pavement bases and sub-bases is an increasingly important aspect in the current situation, because always there is the concern with the environment, and there is now the clear awareness that every effort should be made to minimize the effects caused by the exploitation of deposits and deposition of material. In this sense this work presents the effects of adding different proportions of lime to stabilize a sedimentary soil sample from the urban area of the city of Curitiba. It selected a sample quantity of soil in the region to study the stabilization insertion of hydrated lime type (CHIII) powder. The two variables in the study are related to the content of lime mixed with the soil at 0% percentages of 3%, 6%, 8% and 16%, and cure times at which these mixtures were subjected to (0, 7, 14, 28 and 56 days). The tested mixtures were prepared from dosages defined by two methods: one checking the chemical behavior of the samples by means of changes in pH values, and the second analyzing the mechanical behavior through the RCS values. It has been found that the chemical stability analyzed by addition of lime, provided an average increase of RCS in most soil samples studied, because of some physical and chemical characteristics thereof. For mixtures with 6%, 8% and 16% of lime after 28 days of curing, the average RCS was 0,57 MPa, 1,06 MPa and 2,37 MPa, respectively, for the normal proctor, and as for intermediate proctor, in the same curing time and on the same percentages RCS results were 0,54 MPa, 1,04 MPa and 2,71 MPa, respectively. In global terms, the soil-lime mixtures studied showed acceptable behavior by law to use as layers of sub-base. However, only the mixture with 16% of lime, at 28 days, is recommended for use on floors bases. Even so, the mixtures studied constitute a good alternative economic and socio-environmental.

**Keywords:** Stabilization. Sedimentary soil. Paving. Hydrated lime.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Gráfico de classificação MCT (Nogami; Villibor, 1981).....	40
Figura 2	– Seção transversal típica de um pavimento flexível.....	53
Figura 3	– Vista geral da área onde foram coletadas as amostras de solo...	62
Figura 4	– Local da escavação da cisterna.....	62
Figura 5	– Embalagem da cal utilizada na pesquisa.....	63
Figura 6	– Agitador de peneiras utilizado no ensaio.....	66
Figura 7	– Detalhe do ensaio para determinação da massa específica.....	67
Figura 8	– Esquema simplificado dos limites de consistência do solo.....	67
Figura 9	– Materiais utilizados no ensaio dos limites de Atterberg.....	68
Figura 10	– Ensaio de compactação realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 1986).....	69
Figura 11	– Ensaio de CBR em tanque com relógios comparadores.....	70
Figura 12	– Molde cilíndrico e soquete utilizado na confecção dos CPs.....	72
Figura 13	– Extratora para corpo de prova com dimensões reduzidas.....	73
Figura 14	– Prensa universal utilizada nos ensaios de CBR e RCS.....	73
Figura 15	– Equipamento utilizado para o ensaio do pH.....	75
Figura 16	– Sequência de moldagem do CP reduzido executado em laboratório.....	78
Figura 17	– Curva granulométrica do solo natural ensaio de granulometria conjunta.....	80
Figura 18	– Análise gráfica do LP do solo com adição da cal hidratada.....	83
Figura 19	– Curva de compactação na energia normal solo natural.....	85
Figura 20	– Curva de compactação na energia normal solo com 3% da cal...	85
Figura 21	– Curva de compactação na energia normal solo com 6% da cal...	86

Figura 22	– Curva de compactação na energia normal solo com 8% da cal...	86
Figura 23	– Curva de compactação na energia normal solo com 16% da cal.	87
Figura 24	– Curva de compactação na energia intermediária solo natural.....	88
Figura 25	– Curva de compactação na energia intermediária solo 3% da cal.	88
Figura 26	– Curva de compactação na energia intermediária solo 6% da cal.	89
Figura 27	– Curva de compactação na energia intermediária solo 8% da cal.	89
Figura 28	– Curva de compactação na energia intermediária solo 16% da cal	90
Figura 29	– Análise do pH das amostras.....	93
Figura 30	– Gráfico do ensaio de expansão das amostras de solo-cal.....	95
Figura 31	– Resultado do ensaio de CBR.....	96
Figura 32	– Gráfico de correlação resistência à penetração (MPa) x pressão (mm).....	98
Figura 33	– Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência..	100
Figura 34	– Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência..	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação das partículas de solo segundo a: ABNT, ASTM, AASHTO, CEN.....	36
Tabela 2	– Classificação dos solos segundo a HRB.....	38
Tabela 3	– Exigências químicas e físicas da cal.....	59
Tabela 4	– Valores médios da composição das cales brasileiras.....	59
Tabela 5	– Limite de CBR para camadas de pavimento.....	71
Tabela 6	– Quantidade de CPs porcentagem de mistura e período de cura..	77
Tabela 7	– Resultado do ensaio granulométrico do solo natural.....	79
Tabela 8	– Dados do ensaio de massa específica real dos grãos.....	81
Tabela 9	– Resultado dos ensaios de LL do solo com adição da cal.....	82
Tabela 10	– Resultado dos ensaios de LP do solo com adição da cal.....	82
Tabela 11	– Resumo dos resultados dos ensaios de (LL), (LP) e do (IP).....	83
Tabela 12	– Classificação dos solos em função dos (IP) e (LL).....	84
Tabela 13	– Relação teor de umidade x peso específico aparente seco.....	90
Tabela 14	– Resultado do ensaio de pH das amostras.....	93
Tabela 15	– Resultado do ensaio de expansão.....	94
Tabela 16	– Resultado dos ensaios de CBR das amostras de solo-cal.....	95
Tabela 17	– Especificações do DNIT para CBR e expansão.....	97
Tabela 18	– Ensaio de CBR das amostras em relação à penetração, Tensão em (MPa).....	97
Tabela 19	– Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação normal.....	99
Tabela 20	– Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação intermediária.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira dos Produtores de Cal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
c'	Coeficiente de Deformabilidade da Classificação MCT
CBR	California Bearing Ratio
CEN	Comitê Europeén de Normalisation
CH	Cal Hidratada
CIC	Cidade Industrial de Curitiba
CP	Corpo de Prova
d'	Inclinação da Parte Retilínea do Ramo Seco da Curva de Compactação na Metodologia MCT
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
e'	Índice de Classificação MCT, Calculado em Função de Pi e d'
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HRB	Highway Research Board
IG	Índice de Grupo (Classificação HRB – AASHO)
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
ISSMFE	Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal

LL	Limite de Liquidez
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MCV	Moisture Condition Value
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
pH	Potencial Hidrogeniônico
PI	Parâmetros do Método MCT
RCS	Resistência à Compressão Simples
Sr	Grau de Saturação
SI	Sistema Internacional de Unidades
TRB	Transportation Research Record
USCS	Unified Soil Classification System
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
$\omega$	Teor de Umidade (%)
$\Omega_{ót}$	Teor de Umidade Ótima (%)
$\omega_L$	Índice de Liquidez
$\omega_p$	Índice de Plasticidade
X	Média
$\rho$	Massa Específica Real dos Grãos de Solo
Y	Peso Específico Natural
Y <sub>d</sub>	Peso Específico Aparente Seco
Y <sub>d Max</sub>	Peso Específico Aparente Seco Máximo
Y <sub>s</sub>	Peso Específico das Partículas Sólidas
Y <sub>w</sub>	Peso Específico da Água

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	ASPECTOS GERAIS.....	21
1.2	OBJETIVOS.....	23
1.2.1	Objetivo Geral.....	23
1.2.2	Objetivos Específicos.....	23
1.3	JUSTIFICATIVA.....	24
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>26</b>
2.1	SOLO.....	26
2.2	TIPOS DE SOLOS.....	27
2.2.1	Solos Residuais.....	27
2.2.2	Solos Sedimentares ou Transportados.....	28
2.2.3	Solos Orgânicos.....	29
2.2.4	Solos Pedogênicos.....	29
2.2.5	Solos Tropicais.....	30
2.2.6	Solos Lateríticos.....	31
2.2.7	Solos Não Lateríticos.....	33
2.3	CAMADAS DO SOLO.....	33
2.3.1	Constituição e Propriedades do Solo.....	34
2.3.2	Classificação do Solo.....	36
2.4	ESTABILIZAÇÕES DO SOLO.....	41
2.4.1	Estabilização Mecânica.....	43
2.4.2	Estabilização Química.....	44
2.4.2.1	Estabilização de solo com utilização da cal.....	45



2.4.3	Estabilização Granulométrica.....	51
2.5	PAVIMENTAÇÃO.....	52
2.5.1	Função do Pavimento.....	54
2.5.2	Classificação da Estrutura do Pavimento.....	55
2.6	CAL.....	56
2.6.1	Cal Virgem.....	56
2.6.2	Cal Hidratada.....	57
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES.....	60
3.2	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	60
3.3	VARIÁVEIS INVESTIGADAS.....	60
3.3.1	Solo.....	61
3.3.2	Cal.....	63
3.3.3	Água.....	64
<b>4</b>	<b>MÉTODOS DE ENSAIOS E EQUIPAMENTOS.....</b>	<b>65</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES.....	65
4.2	MÉTODOS.....	65
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS.....	65
4.3.1	Análise Granulométrica.....	65
4.3.2	Massa Específica Real dos Grãos.....	66
4.3.3	Limites Físicos de Consistência.....	67
4.3.4	Compactação.....	68
4.3.5	Expansão.....	69
4.3.6	Resistência à Compressão Simples.....	71
4.3.7	Caracterização Físico-Química do Solo.....	74
4.3.8	Ensaio de pH do Solo.....	74

4.3.9	Mistura Solo-Cal.....	74
4.3.9.1	Dosagem pelo método de Eades e Grim.....	74
4.3.9.2	Dosagem pelo método de Thompson.....	75
4.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS.....	76
4.4.1	Dosagem da Mistura Solo-cal.....	76
4.4.2	Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	77
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES.....	79
5.1.1	Análise Granulométrica por Peneiramento.....	79
5.1.2	Análise Granulométrica por Sedimentação.....	80
5.2	MASSA ESPECÍFICA.....	80
5.2.1	Massa Específica Real dos Grãos.....	80
5.3	LIMITES FÍSICOS DE CONSISTÊNCIA.....	81
5.3.1	Limite de Liquidez.....	81
5.3.2	Limite de Plasticidade.....	82
5.3.3	Índice de Plasticidade.....	83
5.4	COMPACTAÇÃO.....	84
5.4.1	Curvas de Compactação.....	84
5.4.2	Classificação do Solo.....	91
5.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	92
5.5.1	Análise do pH dos Materiais.....	92
5.6	CBR e Expansão.....	94
5.6.1	Expansão.....	94
5.6.2	CBR.....	95
5.7	RESISTÊNCIA.....	98
5.7.1	Resistência à Compressão Simples.....	99

5.7.1.1	RCS para a série do proctor normal.....	99
5.7.1.2	RCS para a série do proctor intermediário.....	100
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS.....</b>	<b>104</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	104
6.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS E COMENTÁRIOS FINAIS.....	106
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 ASPECTOS GERAIS

O desenvolvimento de uma cidade está ligado diretamente às contribuições objetivas do poder público que deve oferecer princípios e valores que orientem este desenvolvimento. Com isso, cada projeto de planejamento urbano, ou mesmo de melhoria de uma via de tráfego do município, representa, no fim, uma soma de centenas de projetos de vida.

Segundo o relatório do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), de dezembro de 2014, as estradas federais pavimentadas no Brasil são na ordem de 213 mil quilômetros, já as não pavimentadas são de 1.353 mil quilômetros, ou seja, seis vezes maior que as estradas pavimentadas do País.

No Paraná, a malha viária federal pavimentada é de 19.511 quilômetros, e a não pavimentada de 98.063 quilômetros. Com os dados expostos acima pode-se concluir que apenas 17% de toda a malha rodoviária federal do estado é pavimentada.

Em Curitiba, a malha viária urbana gira em torno de, aproximadamente, 4.600 quilômetros, dos quais 1.700 quilômetros são de anti-pó com mais de 30 anos de uso, segundo dados da agência de notícias da prefeitura municipal de Curitiba. Dados relativos à quantidade de ruas não pavimentadas nos bairros do município de Curitiba não foram encontrados.

Com estes dados pode-se dizer que a pavimentação é um dos mais importantes itens para o desenvolvimento dos centros urbanos, melhorando consideravelmente a qualidade de vida da população local, reduzindo, assim, alguns itens como o tempo e o custo do transporte.

Esclarecendo este preceito, deve-se entender um pouco sobre como são constituídos os pavimentos rodoviários, que são formados por um conjunto de camadas horizontais, inseridas sobre uma fundação, os quais possuem a principal função de suportar as ações induzidas pelos veículos, redistribuindo as tensões transmitidas à mesma, proporcionando, assim, uma superfície segura e confortável para a circulação destes.

Esta definição, é claro, engloba uma grande variedade de estruturas de pavimentos para as quais, em muitos casos, o solo se torna um dos componentes essenciais, conferindo importante característica no desenvolvimento da infraestrutura do pavimento rodoviário.

Evidenciam-se, assim, dois pontos importantes na concepção de um pavimento: em primeiro, que este atenda à característica de resistência, para que o mesmo não se degrade, tampouco se deforme, com a circulação de veículos; em segundo, proporcione uma superfície confortável, cômoda e segura para o tráfego ao longo de sua vida útil.

Existem diversos métodos de estabilização de solos para fins de pavimentação, e o que tem se destacado como o mais prático e eficiente é o da estabilização química. Este método compreende a mistura de um ou mais compostos ao solo, com o objetivo de estabilizá-lo. Dentre as técnicas de estabilização química pode-se destacar a estabilização com cimento, cal ou betume.

Nestas condições citadas anteriormente, uma alternativa disponível e difundida no meio técnico é o melhoramento das propriedades do solo do local pela adição de cal ou cimento ao mesmo. O tratamento de solos com cal, objeto de estudo nesta pesquisa, é uma técnica que vem sendo empregada e desenvolvida com sucesso na construção de bases para pavimentos.

Pode-se assim definir que a estabilização de solos para pavimentação compreende procedimentos que visam a melhoria e estabilização das propriedades destes como: resistência, deformabilidade e permeabilidade. A estabilidade é um processo no qual confere-se ao solo maior resistência às cargas oriundas dos veículos ou ao desgaste, por meio da correção da granulometria, da plasticidade, ou por meio da adição de materiais ou substâncias que propiciem uma maior coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos do solo.

Pelos fatos citados anteriormente, e apesar das diversas aplicações, o procedimento de dosagem do solo-cal se restringe à escolha do teor de cal necessário para estabilizar um solo, geralmente a partir de uma estimativa inicial fornecida pela literatura ou norma em vigor, seguida pela execução de uma série de ensaios em laboratório.

Partindo destes conceitos, esta pesquisa se propõe a estudar a estabilização de um solo sedimentar com a utilização da cal hidratada, determinando as vantagens, benefícios ou restrições observados com a estabilização do solo local,

para a execução de obras de base e sub-base para pavimentação urbana no município de Curitiba.

## 1.2 OBJETIVOS

Essa pesquisa possui os objetivos gerais e específicos apresentados da seguinte forma:

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o comportamento de um solo sedimentar da região de Curitiba misturado a cal hidratada em pó, em diferentes proporções, por meio de ensaios de resistência à compressão simples, e do CBR, em corpos de prova compactados com energia de compactação correspondente aos ensaios do proctor normal e intermediário, e em diferentes tempos de cura, para o uso em base e sub-base de pavimentação urbana na cidade de Curitiba.

Assim para verificar o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar a influência do procedimento de dosagem nas porcentagens definidas da cal hidratada em pó ao solo em questão;

Identificar e classificar geotécnicamente a amostra do solo em laboratório;

Analisar alguns procedimentos do ensaio de compactação de solos em laboratório, utilizados também na compactação de solos com a adição da cal hidratada em pó, que podem interferir no processo de estabilização criando uma situação diferente da de campo;

Verificar a correlação entre o emprego de corpos de prova de dimensões reduzidas, e o proctor padronizado que possibilitam melhor desenvolvimento dos trabalhos em laboratório.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O solo brasileiro é constituído, em sua grande maioria, de múltiplas camadas, dependendo da região em que este se localiza, com uma vasta diversidade de tipos, forma, cor, granulometria, composição química e mineralógica, dentre outras.

A construção civil, no Brasil, muitas vezes utiliza o solo da região como matéria prima, na maioria dos casos, como base para estruturas de grande porte, como pontes, aeroportos, túneis, hidroelétricas, estradas, etc.

São encontrados em várias regiões do país, solos do tipo sedimentar, ou transportados, os quais não possuem características adequadas para a utilização como bases e sub-bases de pavimentos. Neste caso, é necessário a remoção total ou parcial do material existente, instalando no local um material granular compactado em camadas distintas, fornecendo, assim, a resistência adequada descrita em projeto.

O conhecimento das potencialidades de determinados materiais da região onde é construída a obra, ou mesmo as limitações destes materiais na natureza pode ajudar a solucionar este problema, fornecendo, assim, a possibilidade de escolha de soluções mais viáveis economicamente para a execução dessas camadas.

Em muitos projetos rodoviários, ou mesmo em pavimentação urbana, são utilizados solos granulares para a execução das camadas de sub-base, e até mesmo da base, do pavimento, mas devido a grande procura e pouca oferta desses materiais, ou mesmo a distância de transporte, acabam por inviabilizar a sua utilização.

Desta forma, existe como alternativa para a solução deste problema, a utilização do solo existente no local da obra com cal, descrito tecnicamente como mistura solo-cal. É neste contexto que a estabilização do solo adquire suma importância para a realidade da pavimentação urbana em uma cidade ou município.

Com a realização desta pesquisa, espera-se contribuir para a melhoria dos trabalhos de pavimentação urbana do município de Curitiba. Espera-se, também, que este estudo permita agregar, significativamente, um avanço nos processos de execução de pavimentações, pois o momento atual exige que os projetos de

asfaltamentos urbanos sejam mais bem estudados quanto ao uso dos materiais locais.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho de pesquisa em laboratório com o título: “Efeito da adição da cal hidratada na estabilização de solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba”, foi dividida em 6 capítulos, como descrito a seguir:

Capítulo 1- Introdução: é relatada uma breve introdução sobre o tema estudado, salientando a importância da utilização da cal hidratada no solo da região. Os objetivos gerais e específicos também foram abordados neste capítulo, bem como a justificativa e estrutura do trabalho.

Capítulo 2- Fundamentação teórica: neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto pesquisado.

Capítulo 3- Programa experimental: é apresentada neste capítulo a metodologia empregada no trabalho, bem como as etapas da pesquisa realizada em laboratório.

Capítulo 4- Métodos de ensaios e equipamentos: neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, salientando os equipamentos, ferramentas e procedimentos de laboratório.

Capítulo 5- Apresentação e análise dos resultados: é apresentado neste capítulo os resultados obtidos dos ensaios do solo natural e de suas misturas com a cal hidratada, bem com uma breve análise e discussão das misturas nas porcentagens estabelecidas de solo-cal.

Capítulo 6- Conclusões e sugestões: é descrito neste capítulo uma análise referente aos resultados obtidos em laboratório, bem como sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SOLO

O termo solo, que vem do latim "solum", é a porção da superfície terrestre sobre a qual se caminha, se produz e se constrói. Material da crosta terrestre, não consolidado, que ordinariamente se distingue das rochas, cuja decomposição, em geral, provém, por serem suas partículas desagregáveis pela simples agitação dentro da água (DNIT, 2006).

O solo é uma coleção de materiais naturais, constituídos, em sua grande maioria, por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, tendo sua formação composta por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte da camada superficial das extensões continentais do nosso planeta, possuem também matéria viva e podem ser constituídos de vegetais existentes na natureza, podendo, eventualmente, ter sido modificados por interferências do homem (EMBRAPA, 2006).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas através da NBR 6502 (ABNT, 1995), define solo como sendo um material originário da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. Sua decomposição é decorrente de agentes físicos e químicos. Suas variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais. O congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, exercem elevadas tensões, do que decorre maior fragmentação dos blocos. Já a presença da fauna e flora promove o ataque químico, através de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros. O conjunto destes processos, que são muito mais atuantes em climas quentes do que em climas frios, leva à formação dos solos que, em consequência, são misturas de partículas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química. A maior ou menor concentração de cada tipo de partícula em um solo depende da composição química da rocha que lhe deu origem.

Segundo Neves *et al.* (2005), solo é o material da crosta terrestre proveniente da decomposição de rochas, constituído por elementos minerais e/ou

orgânicos, que dependem da composição química e mineralógica da rocha de origem, das características do relevo, dos diferentes climas e do tempo de exposição às intempéries.

Já para o âmbito da engenharia rodoviária, é considerado solo como sendo todo o tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, o qual é facilmente encontrado em toda a superfície terrestre. Em outros termos, pode-se considerar como solo qualquer material que possa ser escavado com pá, picareta, escavadeiras, sem que haja a necessidade de material explosivo (DNER, 1996).

Os solos são materiais naturais não consolidados, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem. O solo ainda terá estrutura artificial quando transportado ou compactado mecanicamente, como em aterros, barragens de terra, reforços do subleito de pavimentos, dentre outros (NOGAMI *et al.* 2000).

## 2.2 TIPOS DE SOLOS

Na superfície terrestre pode-se encontrar diversos tipos de solos, cada tipo possui características próprias, tais como densidade, formato, cor, consistência e formação química.

A formação ordinária do solo depende de pelo menos cinco fatores: a natureza da rocha mãe, o clima da região, o agente de intemperismo de transporte, a topografia da região e os processos orgânicos. Além disso, os processos de formação dos solos podem atuar sucessivamente sobre um mesmo solo, sendo assim, os solos podem ser divididos em solos residuais, transportados, orgânicos e pedogênicos (VARGAS, 1978).

### 2.2.1 Solos Residuais

Os solos denominados residuais podem ser aqueles em que os resíduos do intemperismo das rochas permanecem no local e na posição da rocha que lhes deu

origem, constituindo assim o manto do intemperismo. As profundidades dos solos residuais dependem principalmente das condições climáticas e tempo de exposição (TERZAGHI; PECK, 1962).

A característica de um solo residual pode ser relacionada ao seu agrupamento na categoria geral de sua composição. A composição refere-se ao material de que é feito o solo, e inclui o tamanho e forma das partículas e, especialmente, a composição mineralógica da fração fina. Também a composição pode ser dividida em composição física, a qual se caracteriza pela porcentagem da rocha não meteorizada, distribuição do tamanho das partículas, entre outras, e pela composição mineralógica (BLIGHT; LEONG, 2012).

### 2.2.2 Solos Sedimentares ou Transportados

São solos sedimentados por um agente transportador. São formados, geralmente, por depósitos mais inconsolidados e fofos que os solos residuais, têm profundidades variáveis, de uma forma geral são menos homogêneos que os solos residuais, ocorrem somente em áreas mais restritas enquanto que os residuais são mais comuns e de ocorrência generalizada (DNER, 1996).

Os solos sedimentares ou solos transportados são solos que foram levados de seu local de origem por algum agente de transporte e lá depositados. Os solos sedimentares formam geralmente depósitos mais inconsolidados e fofos que outros solos, e com profundidade variável. Dependendo do agente responsável pelo transporte dos materiais resultantes do intemperismo, os solos transportados podem ser divididos em quatro tipos: aluviais, coluviais, sedimentares e eólicos (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Solos aluviais são solos transportados pelas águas e depositados quando a corrente sofre uma diminuição da sua velocidade, ou quando o transporte é feito por grandes volumes de água, os primeiros a serem depositados são os grandes blocos e depois os pedregulhos, e ao se reduzir a velocidade, também vai se reduzindo a capacidade de carrear os sedimentos, com isso os rios passam a depositar as camadas de areia, em seguida os grãos de menor diâmetro formando leitos de areia

fina e silte, ao final, somente os microcristais de argila permanecem em suspensão na água (VARGAS, 1978).

Para os solos coluviais o agente transportador é a gravidade, que faz cair massas de solo e rochas ao longo dos taludes. Ocorrem, normalmente, ao pé de escavações e encostas, já sua composição depende do tipo de rocha existente nas partes mais elevadas. Este solo é descartado e não recomendado para projetos de engenharia, pois são materiais inconsolidados, permeáveis e sujeitos a escorregamentos (DNER, 1996).

Solos eólicos são aqueles transportados pelo vento, normalmente encontrados nas regiões litorâneas ou em desertos. Os ventos sopram sobre as areias e, assim, as carregam ou mesmo as empurram, indo depositar seus grãos aís além, formando as chamadas dunas. Uma das características deste tipo de formação é a uniformidade dos grãos, pois a força do vento seleciona os pesos dos grãos que podem ser transportados a elevadas alturas e depositadas a grandes distâncias (VARGAS, 1978).

### 2.2.3 Solos Orgânicos

Segundo VARGAS (1978), a formação dos solos orgânicos é decorrente da impregnação de matéria orgânica em sedimentos já existentes ou pela transformação carbonífera de materiais, geralmente, de origem vegetal contida no material sedimentado. Uma parte dos produtos da decomposição da matéria orgânica é um produto escuro e relativamente estável que impregna os solos orgânicos, chamado húmus, este húmus só impregna, permanentemente, nos solos finos como as argilas e siltes. Geralmente são solos de cor escura provenientes das baixadas litorâneas ou das várzeas dos rios.

### 2.2.4 Solos Pedogênicos

Os solos de evolução pedogênica são solos superficiais e porosos. Os solos superficiais são aráveis para a agricultura, já os porosos recobrem uma vasta área do planalto central brasileiro (VARGAS, 1978).

Segundo a descrição de Vargas (1978), dá-se o nome de evolução pedogênica, há uma complexa série de processos físico-químicos e biológicos que governam a formação dos solos da agricultura. Compreendem a lixiviação do horizonte superficial e concentração de partículas coloidais no horizonte profundo e impregnação com húmus do horizonte superficial. Na engenharia, esta camada recebe o nome de "solo superficial" existindo pouco interesse técnico por este tipo de solo a não ser para a própria agricultura.

#### 2.2.5 Solos Tropicais

Todo solo que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos demais solos, em decorrência da atuação de processos geológicos ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas, é denominado de solo tropical (WOLLE, 1985).

Para Nogami e Villibor (1995), os solos tropicais possuem comportamentos bem diversos daqueles previsíveis pelas metodologias tradicionais de classificação, devido, principalmente, a sua macro e microestrutura advindos da rocha que os originou.

O solo não pode ser considerado como tropical apenas por se encontrar em regiões de clima tropical úmido, mas deve apresentar aspectos geotécnicos que o caracterizem como solo tropical, ou não, destacando-se duas classes principais: solos de comportamento laterítico e não laterítico (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Nogami *et al.* (2009), observam que solos de regiões de clima tropical apresentam uma série de particularidades decorrentes das condições ambientais sendo, portanto, necessário conceituar os tipos genéticos de solos dessas regiões específicas. Dentre os solos típicos de regiões tropicais úmidas, destacam-se os solos Lateríticos e os solos Saprólíticos.

Com isso, se faz necessário avaliar se o material a ser utilizado possui características de solo tropical, para que, na sua classificação, represente corretamente seu comportamento em campo, evitando-se, assim, falhas no dimensionamento (BRANDÃO *et al.* 2009).

Batista (2007), comenta em seu estudo a cronologia da evolução nos estudos relacionados às peculiaridades dos solos tropicais para fins de pavimentação rodoviária. O autor comenta sobre a implementação, do plano de pavimentação no governo Jânio Quadros, no final da década de 50, considerado para a época como um marco notável no desenvolvimento de uma tecnologia de pavimentação mais adequada aos solos e condições tropicais do país. Este plano, contrariamente às normas vigentes da época da constituição das bases rodoviárias de macadame hidráulico ou betuminoso e revestimentos betuminosos do tipo usinado a quente, enfatizou a utilização de pavimentos de menor custo, os quais incluíam as bases de solo cimento, bases estabilizadas granulometricamente, revestimentos do tipo tratamento superficial e reforço de subleito com solos existentes da própria região.

O uso de materiais naturais tropicais levou a uma drástica diminuição das distâncias de transportes dos materiais granulares, com eliminação dos custos de aquisição destes materiais estabilizantes, resultando assim em pavimentos significativamente mais econômicos que os tradicionais, viabilizando a implantação de uma extensa malha de rodovias vicinais (FORTES; VILLIBOR; BLASSIOLI, 1999).

#### 2.2.6 Solos Lateríticos

Schellmann (1982), definiu laterita como sendo acumulações artificiais ou sub superficiais de produtos provenientes do intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica, e imobilização de ferro e de alumínio. Apesar de serem formadas a partir de um único processo, as lateritas podem englobar vários tipos de produtos que se diferenciam, por exemplo, pela intensidade e tempo de atuação deste processo e pelo tipo de material de origem. Sendo assim, as lateritas apresentam propriedades físicas, químicas, físico-químicas e mineralógicas diferentes.

Solo laterítico é um tipo de solo definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes "A" (camada mineral rica em matéria orgânica) e "B" (apresenta máxima proporção na sua cor, estrutura e/ou que

possuem materiais translocados), com seus perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido. Possuem a fração de argila constituída, essencialmente, de argilominerais do grupo das caulinitas, de óxidos e hidróxidos de ferro ou alumínio, o que confere sua estrutura, poros e agregações altamente estáveis (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Segundo Nogami e Villibor (1995), estes solos possuem em sua formação uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro, e em alguns locais podem apresentar, inseridos em sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de laterita. Estes pedregulhos, por sua vez, são massas consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos os quais têm sido utilizados como materiais de construção rodoviária.

Ainda segundo Nogami *et al.* (2009), os solos superficiais lateríticos apresentam uma mineralogia relativamente simples, sendo o quartzo um mineral encontrado com muita freqüência e, quase sempre, de maneira predominante nas frações areia e pedregulho desses solos, como acontece também em solos não tropicais. Outros minerais, resistentes á ação das intempéries, podem ocorrer nesses solos, dentre eles podemos destacar: a magnetita, ilmenita, rutilo, turmalina e zircão.

Os solos lateríticos são considerados pela engenharia como materiais de construção. Em rodovias, estes compõem as camadas estruturais do pavimento (subleito, sub-base, base, capa asfáltica), para tanto, devem apresentar certas propriedades para que sejam capazes de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas a que serão submetidos durante a vida útil do pavimento, sem que este venha a sofrer desgaste precoce pelo intemperismo, sobrecargas, falhas na execução de suas bases e sub-bases, ou mesmo pelo tempo de exposição do tráfego (AZEVEDO *et al.* 1998).

Dadas as particularidades químicas, mineralógicas e estruturais dos solos lateríticos, eles são, na engenharia rodoviária, considerados como aqueles que quando devidamente compactados, ao perderem umidade, adquirem condição de baixa perda de resistência ou até nenhuma perda, mesmo na presença de água. Ainda que em estado natural, quanto maior seu grau de laterização, menor será a sua susceptibilidade à erosão (GODOY; BERNUCCI, 2000).

### 2.2.7 Solos não Lateríticos

Para Viana (2007), solos conhecidos como não lateríticos são aqueles que possuem uma grande quantidade de silte, mas que se apresentam, diferentemente dos siltes típicos dos solos das regiões de clima temperado, constituídos de partículas inertes. Contém macrocristais de caulinita e mica, apresentando plasticidade mesmo sem possuir partículas de argila, entretanto, muitos solos de comportamento não laterítico podem possuir quartzo como material predominante, há também a possibilidade destes solos possuírem graus de intemperização.

Os solos de comportamento não laterítico, em condições normais, são constituídos de camadas subjacentes às lateríticas, com espessuras que podem atingir vários metros. Possui aparência macroscópica e, em geral, caracterizada pela presença de camadas com xistosidades e vazios, que, em sua grande maioria, foram oriundas da rocha matriz (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Ainda segundo os autores Nogami e Villibor (1995), com relação aos solos não lateríticos, sua composição mineralógica é bem variada podendo apresentar mica, acarretando efeitos como: aumento no limite de liquidez, aumento da expansividade pelo aumento da umidade, diminuição da massa específica aparente seca máxima quando compactada, aumento da umidade ótima de compactação, redução da capacidade de suporte e no módulo de resiliência.

## 2.3 CAMADAS DO SOLO

O solo brasileiro em geral possui divisões em sua formação denominadas pela literatura como: camadas, horizontes ou perfis. Estas camadas, assim denominadas, são formadas basicamente por material mineral ou orgânico em estado mais ou menos intemperizado, podendo variar em seus constituintes secundários também para mais ou para menos, ou ainda de constituintes inatos da rocha de origem. Encontram-se parcialmente expostos quando se observa o perfil do solo, sendo integrantes deste, caso possuam uma relação que compõem o perfil do solo (EMBRAPA, 1983).



O solo é dividido em três camadas: a primeira camada, ou camada de horizonte “A”, é mineral e apresenta mais matéria orgânica, tendo uma coloração mais escura e, em regiões mais quentes, uma coloração mais clara. Já a segunda camada de solo, também conhecida como horizonte “B”, possui menos matéria orgânica que o horizonte “A”, e uma coloração mais avermelhada ou amarelada, que caracteriza este tipo de camada, e, por fim, a terceira camada, também conhecida como horizonte “C”, é um horizonte de transição entre a rocha e o solo, mas também existem solos que possuem apenas uma ou duas camadas até a rocha propriamente dita, bem como solos com horizontes “A” e “C” ou horizontes “A” e “B” (EMBRAPA, 2006).

Desta forma, pode-se afirmar que os solos não são iguais, possuem características diferentes entre si, pois são formados por diferentes rochas, climas, relevos e vegetações. Existem, também, outras denominações de solos, como o cambissolo, solo este pouco profundo com um pequeno horizonte “B”, constituído de três camadas ou horizontes. Já o latossolo, é um solo mais profundo o qual sua segunda camada ou horizonte “B” é mais desenvolvido. O organossolo é um solo que possui muita matéria orgânica, muita água e poucos nutrientes, também conhecido como solo turfa ou banhado, e, por fim, o espodossolo, conhecido como solo arenoso, o qual possui muita areia, água e pobre em nutrientes, possui apenas duas camadas, ou até em algumas regiões do país uma única camada ou horizonte (EMBRAPA, 2006).

### 2.3.1 Constituição e Propriedades do Solo

Os solos são constituídos por misturas de partículas sólidas de natureza mineral, orgânica, ar e água, formando um sistema trifásico: sólido, gasoso e líquido. As partículas da parte sólida variam em tamanho, forma e composição química, sendo sua combinação o que forma a matriz básica do solo. A distribuição quantitativa das partículas de areia, silte e argila, desta composição da matriz, formam a textura do solo, que é uma das características físicas predominantemente mais estáveis. Esta fase sólida mineral do solo, composta por estas partículas, normalmente, estão reunidas pela ação de agentes cimentantes, formando as

unidades estruturais do solo, sendo os principais agentes os minerais de argila, a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Entre as partículas maiores como a areia, ou entre agregados, predominam poros grandes (macroporos); entre partículas pequenas como a argila, predominam poros pequenos (microporos) (VIEIRA et al, 1988). Os macroporos são responsáveis pela aeração, movimentação de água e penetração de raízes, e os microporos pela retenção de água no solo (LIMA; LIMA, 1996).

Para Reinert e Reichert (2006), a porosidade é responsável por um conjunto de fenômenos e desenvolve uma série de mecanismos de importância na física de solos, tais como a retenção e fluxo de água e ar.

Segundo Reichardt (1990), como o solo é um material poroso, por compressão, a mesma massa de material sólido pode ocupar um volume menor, isto afeta sua estrutura, definindo a quantidade, o tamanho, o formato e a orientação de espaços vazios no solo e, conseqüentemente, a relação entre macro e microporos e a continuidade da macroporosidade.

Para Lepsch (2002), a matéria orgânica do solo é formada por resíduos vegetais e animais que são decompostos por microorganismos, formando o húmus, o mesmo material que participa da estruturação do solo e da retenção de água.

A transformação de uma rocha em pequenos fragmentos, ao longo do tempo por ação de processos físicos, químicos e biológicos, não é, em sua maioria, uniforme. Outras transformações, muitas vezes, são ocasionadas pelo intemperismo e, principalmente, pela adição de restos vegetais, ocorrendo com maior intensidade na parte superior, escurecendo com o húmus (LEPSCH, 2002).

A fração orgânica do solo ocorre em diferentes estágios de decomposição, contando, ainda, com organismos vivos e em atividade, por fim a matéria mineral, a qual é constituída de fragmentos de rochas, como partículas de formas e dimensões diversas, de minerais primários como o feldspato o quartzo a mica, dentre outros, e de minerais secundários como argilas, carbonatos de cálcio, os óxidos de ferro, etc. (REICHARDT, 1990).

Em sistemas naturais como a matéria orgânica presente na maioria dos solos, nas turfas e nos sedimentos consiste em uma mistura de produtos, em vários estágios de decomposição, estágios estes resultantes da degradação ou da

decomposição química e biológica dos resíduos vegetais e minerais, e da atividade sintética de microorganismos existentes no solo (STEVENSON, 1994).

### 2.3.2 Classificação do Solo

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do material existente no local.

Segundo Das (2007), o solo pode ser classificado quanto à sua origem. Os solos formados por produtos do intemperismo no seu lugar de origem são chamados de solos residuais. Já os solos que são transportados durante a sua formação podem ser classificados em vários grupos, dependendo do seu modo de transporte e de deposição, como: os solos glaciais, os solos aluviais, os solos lacustres, os solos marinhos, os solos eólicos e os solos coluviais, (como citado anteriormente).

Pode-se ter outras formas de classificação do solo, sendo que para a engenharia rodoviária a classificação básica dos solos é feita em termos da dimensão das suas partículas. O solo pode conter grãos de argila, silte e areia, e, por vezes, agregados maiores, como cascalho e pedras. Para determinar a percentagem de cada fração presente no solo é feita a análise granulométrica.

No Brasil, adota-se a norma NBR 6502 (ABNT, 1995) para a realização da análise granulométrica do solo. A Tabela 1 apresenta, em resumo, as classificações adotadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing Materials) e CEN (Comité Européen de Normalisation).

**Tabela 1 - Classificação das partículas de solo segundo a: ABNT, AASHTO, ASTM, CEN**

Partícula	ABNT (mm)	AASHTO (mm)	ASTM (mm)	CEN (mm)
Pedregulho	2 – 6	2 – 60	4,75 – 60	2 – 20
Areia	0,06 – 2	0,075 – 2	0,075 – 4,75	0,02 – 2
Silte	0,002 – 0,06	0,005 – 0,075	0,005 – 0,075	0,002 – 0,02
Argila	< 0,002	0,001 – 0,005	0,001 – 0,005	< 0,002

**Fontes: NBR 6502, (1995); ASTM D2486, (1983); AASHTO M145, (1973); CEN, (1990).**

A Classificação USCS (*Unified Soil Classification System*), é um sistema unificado de classificação de solos (SUCS), surgiu como uma evolução do *Airfield Classification System*, denominado de classificação ACS. A classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) ou USCS (*Unified Soil Classification System*) foi desenvolvida, originalmente, pelo professor Arthur Casagrande, na Universidade de Harvard, EUA, entre os anos de 1942 e 1944, visando à aplicação na seleção de materiais para projetos de pavimentos de aeroportos, sendo conhecida também como sistema de classificação de aeroportos. Esta classificação apresenta uma tabela onde se identificam três principais divisões de solos:

- solos de granulometria grossa;
- solos de granulometria fina e;
- solos altamente orgânicos.

Essas três divisões são ainda subdivididas em 15 grupos básicos. Os parâmetros determinantes para a classificação são a granulometria e os limites de Atterberg. Os solos são classificados quanto ao tamanho das partículas em pedregulho, areia, silte ou argila:

- Os pedregulhos e as areias subdividem-se em bem graduados, mal graduados, siltosos ou argilosos.
- Os siltes subdividem-se em siltes de baixa plasticidade, orgânicos de baixa plasticidade, orgânicos de alta plasticidade.
- As argilas subdividem-se em pouco plásticas, orgânicas e de alta plasticidade.

O processo para a classificação, segundo a USCS, inicia-se determinando se o solo é orgânico, de graduação grossa ou fina, em seguida, com os dados da granulometria e dos limites de Atterberg, define-se a que grupo pertence, consultando-se a tabela de classificação USCS. Ainda, para a classificação da fração fina, utilizam-se os valores dos limites de Atterberg e o chamado gráfico de plasticidade.

Recomendada pela AASHTO, a classificação HRB (*Highway Research Board*), é a classificação tradicionalmente mais empregada na caracterização de solos para uso em pavimentação de estradas, tem sido aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários em todo o mundo.

A Tabela 2 apresenta a classificação segundo a HRB. Os solos são separados em grupos e subgrupos através do processo de eliminação a partir do lado esquerdo para o lado direito, da referida tabela. O primeiro grupo, a partir da esquerda, com o qual os valores encontrados coincidirem, será a classificação correta do solo (DNER, 1996).

**Tabela 2 - Classificação dos solos segundo a HRB**

Classificação geral	Materiais granulares (35% ou menos passa pela peneira nº 200)							Siltos argilosos (mais de 35% passa pela peneira nº 200)				
	A1	A1	A3	A2	A2	A2	A2	A4	A5	A6	A7	A7
Grupos	A1	A1	A3	A2	A2	A2	A2				A7	A7
Subgrupos	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	A4	A5	A6	A7-5	A7-6
Porcentagem passando nas peneiras:												
2 mm	50 máx.											
0,42 mm	30 máx.	50 máx.	51 mín.									
0,074 mm	16 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira 0,42mm												
Limite de liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	41 mín.
Índice de plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	LL-30 max.	LL-30 mín.
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	20 máx.
Constituintes usuais	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulho e areia, argilosos ou siltosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Funcionamento como sub-base	Excelente a Bom							Fraco a Pobre				

O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o LL menos 30; se maior será A-7-6.

**Fonte: DNIT - manual de pavimentação, (2006).**

Os critérios de classificação segundo a HRB, baseia-se na granulometria e na plasticidade do solo com:

- Menos de 35% de material passando pela peneira de número 200 (0,074 mm), o solo é classificado como material granular, compreende, segundo a Tabela 2, os grupos A-1, A-2 e A-3.

- Mais de 35% de solo passando pela peneira de número 200 (0,074 mm), o solo é classificado como material argiloso ou siltoso, compreende os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, da Tabela 2.
- Deve-se, também, ser determinado o índice de grupo (IG), aplicando-se a (equação 1). Com os resultados dos ensaios granulométricos e ensaios de plasticidade:

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d \quad (1)$$

Onde:

(a) é a porcentagem de material que passa pela peneira 200 menos 35. Se a porcentagem for maior que 75, adota-se (a) igual a 40, caso esta porcentagem seja menor que 35, adota-se (a) igual a 0, sendo que (a) varia de 0 a 40;

(b) é a porcentagem de material que passa pela peneira de número 200 menos 15. Se a porcentagem for maior que 55, adota-se (b) igual a 40, se a porcentagem for menor que 15, adota-se (b) igual a zero, sendo que (b) também varia de 0 a 40;

(c) é o valor do limite de liquidez LL menos 40. Se o LL for maior que 60% adota-se (c) igual a 20, e se o LL for menor que 40%, adota-se (c) igual a zero; (c) varia de 0 a 20;

(d) é o valor do índice de plasticidade IP menos 10, se o IP for maior que 30%, adota-se (d) igual a 20, se o IP for menor que 10%, adota-se (d) igual a zero; (d) também varia de 0 a 20.

O IG é um número inteiro, variando de 0 a 20, e define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Quanto menor IG, melhor será o solo. O IG igual a 0 indica que o material é excelente, e o IG igual a 20 indica um péssimo material para subleito.

Com a finalidade de melhorar a classificação e caracterização dos solos tropicais, no início da década de 80, Nogami e Villibor (1981), propuseram uma nova forma de classificação, denominada de MCT (Miniatura Compactado Tropical).

O método consiste em utilizar corpos de prova compactos de dimensões reduzidas, 20 mm de diâmetro por 5 mm de altura, permitindo, assim, avaliar as propriedades fundamentais dos solos como: contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração de água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação (NOGAMI; VILLIBOR, 1981).

Na classificação apresentada na Figura 1, Nogami e Villibor (1981), estabeleceram dois grupos de solos que podem apresentar comportamento laterítico (L) ou comportamento não laterítico (N), subdivididos em sete grupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA'), solos argilosos lateríticos (LG'), areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA'), solos siltosos não lateríticos (NS'), e solos argilosos não lateríticos (NG') (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

O gráfico de classificação MCT possui os seguintes parâmetros de entrada, a abscissa é o coeficiente ( $c'$ ) (inclinação da curva de deformabilidade para mini-MCV = 10), e a ordenada, o coeficiente ( $e'$ ), definido por: ( $d'$ ) é o coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação, referente à energia de 12 golpes no ensaio de mini-MCV, e ( $P_i$ ) é a perda por imersão fornecida em (%), (equação 2).

$$e' = \sqrt[3]{P_i/100 + 20/d'} \quad (2)$$

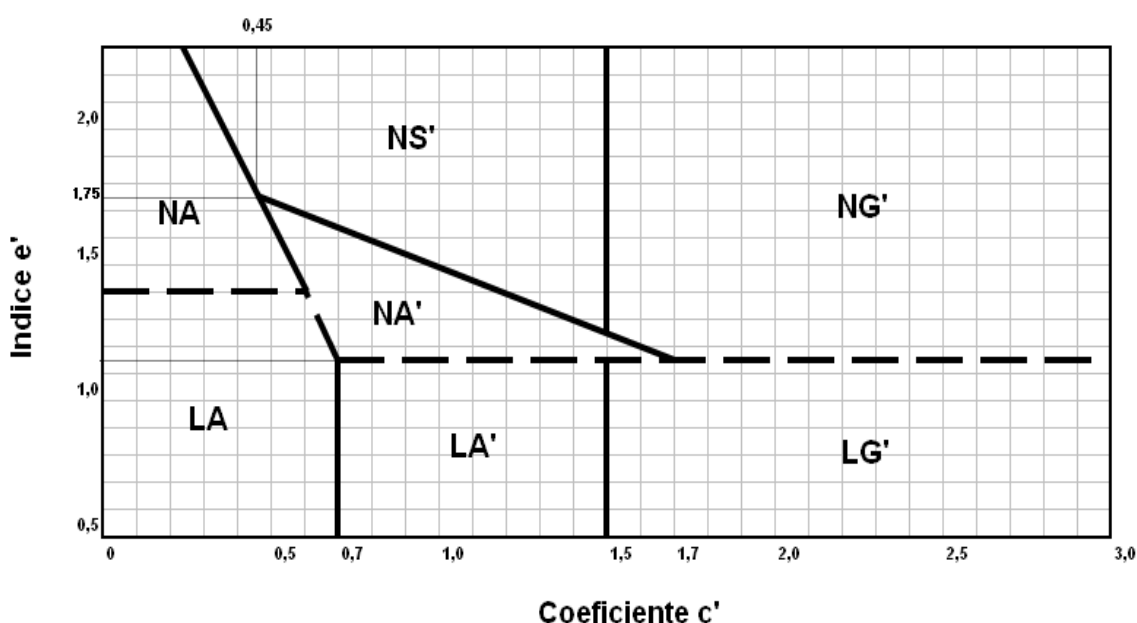


Figura 1 - Gráfico da Classificação MCT (Nogami; Villibor, 1981)

Fonte: Nogami; Villibor (1995).

A classificação MCT, no entanto, possui algumas limitações, uma vez que só pode ser aplicável à solos passantes na peneira 10 (2mm), e os ensaios são relativamente demorados e trabalhosos quando visam somente a classificação dos solos. Esta classificação não foi aplicada neste trabalho.

## 2.4 ESTABILIZAÇÕES DO SOLO

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

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

A estabilização é um método utilizado a fim de se aumentar a resistência e tornar mais durável o material para que este possa resistir aos esforços do tráfego e aos efeitos das intempéries (VOGT, 1971).

Vargas (1978), define como estabilizações de solos o processo pelo qual é conferido ao solo uma maior resistência a cargas ou à erosão, por meio de compactação, da correção granulométrica e da sua plasticidade ou da adição de substâncias que possam permitir uma coesão proveniente da cimentação ou mesmo da aglutinação de suas partículas.

Para Van Impe (1989), os processos de estabilização são classificados como: temporários, permanentes sem adição e permanentes com adição de novos materiais.

Ainda segundo Van Impe (1989), a estabilização temporária consiste em processos limitados a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo de execução de uma determinada fase de obra, sendo que o congelamento de solos, o rebaixamento do nível do lençol freático por drenos ou eletro-osmose são alguns exemplos deste tipo de estabilização.

Já a estabilização permanente sem adição, consiste, basicamente, em processos de compactação e de tratamento térmico, pode-se citar a compactação



superficial, a compactação profunda e a compactação com uso de explosivos (VAN IMPE, 1989).

A estabilização permanente de solos com adição de novos materiais, normalmente, se unem a compactação com a adição de um novo material, podemos citar: a injeção de material estabilizante, colunas de brita ou areia, uso de drenos verticais, reforço com tiras metálicas ou geossintéticos, estabilização com cal e cimento (VAN IMPE, 1989).

Palmeira (1990), considera que estabilizar ou reforçar um solo, é utilizar algum método físico ou químico com a intenção de melhorar as condições do solo. O reforço está associado a inclusões no interior da massa do solo, enquanto que a estabilização seria a técnica de melhorar as características de uma massa de solo por modificações na sua própria estrutura.

Segundo Lopes (2002), quantitativamente, a estabilização está associada a valores numéricos de resistência e durabilidade.

Para que um determinado tipo de solo seja capaz de ser utilizado como base de uma pavimentação, ou até mesmo como subleito, ele deve ser melhorado para que possa suportar o tráfego, mesmo em condições desfavoráveis de umedecimento ou mesmo de secagem. E esta melhoria pode ser realizada através de alguns métodos de estabilização como: compactação, alteração granulométrica ou mesmo nas propriedades intrínsecas ao solo (SESSIONS, 2007).

Para Senço (2007), a estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições que permitam ao mesmo resistir a deformações e rupturas durante o seu estado ou processo de vida útil.

A estabilização de um solo envolve as propriedades de resistência mecânica do mesmo, e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos físicos, químicos, e mecânicos. A escolha de um método em bases econômicas e práticas para o estudo dos materiais necessários à suplementação desejada à construção, que consiste, normalmente, em pulverização na mistura dos materiais, na compactação, e nas considerações de ordem econômica com relação ao custo de cada material (CORDEIRO, 2007).

A estabilização de solos são todos os processos naturais e artificiais que venham a melhorar as características como resistência e durabilidade, e que

possam garantir a manutenção destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia rodoviária (PINTO, 2008).

Para os pavimentos rodoviários, os solos granulares são os mais utilizados para construção, por apresentarem um índice de resistência maior, podendo suportar grandes solicitações de carga. Atualmente, o uso de solos finos estabilizados com aditivos tem substituído esses materiais, seja pela carência de jazidas de solos mais apropriados para pavimentação, ou mesmo pelas restrições ambientais (BRANDÃO *et al.* 2009).

Estabilizar um solo pode ser entendido como alterar suas propriedades a fim de melhorar seu desempenho mecânico e de engenharia, usando para obter esta mudança um processo artificial que pode ser: mecânico, químico, físico ou físico-químico. O resultado final é um material estável onde mesmo exposto a cargas externas e situações de mudanças de clima é capaz de resistir (VIZCARRA, 2010).

Pinto e Preussler (2002), comentam que a estabilização pode ser obtida através de várias técnicas, e podem ser divididas basicamente em três grupos:

- O primeiro grupo utiliza meios mecânicos, como a correção da granulometria com a adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes até a obtenção de parâmetros estabelecidos por norma;
- O segundo, emprega meios químicos utilizando aditivos orgânicos tais como: materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, cal, cimento portland e cinzas;
- O terceiro, emprega meios que alterem granulometricamente a textura do solo, dentre as quais é possível citar a correção granulométrica ou a adição de fibras metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais.

#### 2.4.1 Estabilização mecânica

A correção granulométrica usando a estabilização mecânica traz melhoria ao solo através da adição de um ou mais solos com a finalidade de obter um novo material com propriedades aceitáveis para uso em pavimentação (SANTOS; LIMA; BUENO, 1995).

Santos, Lima e Bueno (1995), relatam que a estabilização mecânica faz uso do processo de compactação do solo, no qual há uma redução da porosidade, reduzindo o volume de vazios, que possui uma relação direta com o ganho de resistência do material compactado.

Para Pinto e Preussler (2002), em campo, na construção do pavimento, a densificação do solo é feita camada por camada, quer seja ou não usado outro processo, utilizando-se, para isso, alguns tipos de equipamentos mecânicos como: rolos compactadores, moto niveladoras, caminhões e compactadores manuais.

A estabilização mecânica de um solo é, na realidade, fazer uso de uma simples compactação até um rearranjo das partículas deste material, ou seja, estabilizando granulometricamente o material em camadas. A estabilização mecânica deve conferir ao solo as características requeridas de atrito interno, de modo que não ocorram deformações excessivas ou ruptura por cisalhamento no material compactado (SOLIZ, 2007).

#### 2.4.2 Estabilização Química

Para Oliveira (2000), quando se mistura cal ao solo são processados, simultaneamente, vários tipos de reações que modificam as suas características. Admite-se, geralmente, que as mais importantes são a troca catiônica, floculação, ação de cimentação por reações pozolânicas e carbonatação.

A cal pode ser utilizada na estabilização de um solo com baixa capacidade de suporte, permitindo a este solo condições para resistir a carregamentos e intempéries, tornando-o impermeável e aplicável na construção de bases e sub-bases de pavimentos urbanos e rodoviários (MINASCAL, 2012).

Tanto a cal virgem quanto a hidratada, podem ser utilizadas na estabilização de solos, no entanto é de preferência o uso da cal extinta por ser menos insalubre à saúde dos operários que a manuseiam (MINASCAL, 2012).

A estabilização química é definida, então, como sendo a adição de substâncias que melhoram as propriedades do solo, empregando-se normalmente a cal ou o cimento. É uma técnica muito interessante pela sua facilidade de aplicação, por sua versatilidade e, principalmente, pelos resultados apresentados em campo,

como o aumento na resistência à compressão simples, ao cisalhamento e à impermeabilidade (OLIVEIRA, 2000).

A adição da cal em solos, em especial nos solos argilosos, provoca variações em muitas de suas propriedades mecânicas, podendo destacar: o aumento de sua granulometria, devido à aglomeração ou floculação das partículas de argila, a redução da plasticidade, o aumento da resistência mecânica, a redução da compressibilidade tornando-o mais estável, a diminuição da contração e expansão linear e o aumento do coeficiente de permeabilidade, devido às reações de floculação (CORDEIRO, 2007).

Em uma estabilização química de solo, os ligantes mais utilizados são o cimento portland, a cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, cinzas volantes dentre outros. Em solos argilosos (coesivos), encontra-se estruturas floculadas e dispersas que são mais sensíveis à presença de água, influenciando na resistência ao cisalhamento. É comum a adição de agentes químicos que provoquem a dispersão ou floculação das partículas, ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes, seguida de uma adição de cimento (MARQUES, 2009).

A estabilização química de um solo, em uma matriz descontínua, o agente estabilizador não preenche totalmente os poros, podendo então ocorrer três ações: modificação das características das superfícies das partículas, vedação inerte dos poros, e a interconexão entre as partículas do solo formando uma espécie de solda entre elas (VIZCARRA, 2010).

Para Van Impe (1989), a estabilização química utilizando a cal, em solos coesivos, tais como as argilas, decorre da reação da cal sobre os minerais da argila, criando um gel de silicato de cálcio insolúvel em água, o qual mantém as partículas de solo juntas.

#### 2.4.2.1 Estabilização de solo com utilização da cal

A estabilização com a cal pode ser alcançada com o uso de hidróxido de cálcio (cal hidratada) ou pelo óxido de cálcio (cal viva ou cal virgem). O efeito da estabilização vai depender do ataque químico da cal sobre os argilominerais, para ocasionar a formação de compostos cimentantes, como os silicatos de cálcio. A cal

hidratada é a mais utilizada para este fim, pois a cal virgem apresenta maior dificuldade de estoque e manipulação, principalmente em regiões mais úmidas (INGLES; METCALF, 1972).

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

O solo-cal possui muitas vantagens quando aplicado como base de pavimentos semi-rígidos: é resistente e econômico, minimiza pressões no subleito, é pouco deformável quando submetido à carregamento e não perde resistência na presença de água. Entretanto, é necessário que se leve em consideração o aspecto da reflexão de trincas no revestimento betuminoso, fator este que tem desmotivado o uso deste tipo de material em pavimentos (KUHLMAN, 1994).

Mendonça *et al.* (1998), estudaram a diferença de comportamento de dois solos com graus de intemperização diferentes, que, devido à composição mineralógica distinta, apresentaram comportamentos satisfatórios para diferentes teores de cal e tempos de cura. Os solos estudados pelos autores são da microrregião de Viçosa, em Minas Gerais. Um latossolo vermelho amarelo, cujo resultado apresentou uma considerável melhora para um teor de cal de 6%, e um tempo de cura de 90 dias. O segundo solo analisado de classificação saprolítico, em que o melhor desempenho foi para um teor de cal de 10% e o tempo de cura de 180 dias.

Segundo Prusinski e Bhattacharja (1999), a dosagem do estabilizante vai determinar até que ponto a adição de cal nos solos modificará suas propriedades. A quantidade de estabilizante necessário vai depender do objetivo específico da obra, modificação ou estabilização. Para um menor grau de tratamento, são adicionados estabilizantes suficientes para alterar apenas algumas propriedades do solo como a textura e a capacidade de rolamento, sendo que a resistência, bem como a durabilidade não são critérios atendidos neste tipo de dosagem, ou seja, a dosagem é tão somente a necessária para que ocorra a fase rápida das reações, não havendo assim a ocorrência da formação de materiais cimentantes.

A quantidade de estabilizante é baseada em testes, projetos e técnicas apropriadas de construção, produzindo, desta forma, mudanças permanentes na

estrutura do solo tratado, ou seja, permite desenvolver as reações pozolânicas. Para isso deve-se observar que a quantidade do estabilizante necessário para que haja esse tipo de reação no solo é em função do tipo de solo, de seus componentes minerais, bem como o tipo de estabilizante que será utilizado, sendo que as reações desenvolvidas entre eles vão depender principalmente da interação entre estes dois elementos: o solo e o seu estabilizante (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999).

Brandão Filho, Correia e Nobre Júnior (2001), analisaram o comportamento de um solo areno siltoso, em dois trechos experimentais executados em uma rodovia estadual de Limoeiro do Norte (CE). Estes trechos são constituídos de bases de solo-cal e possuem baixo volume de tráfego. Esta análise restringiu-se aos ensaios de limites de consistência e resistência à compressão simples, para teores de cal de 3%, 5% e 7%, com tempos de cura de 7, 28 e 63 dias, e ainda para as três energias de compactação: normal, intermediária e modificada. Com a análise dos resultados, concluiu-se que os valores de resistência da mistura solo-cal foram maiores com a influência da energia de compactação, do que com o aumento do teor de cal. Porém, para os limites de consistência com a adição de cal, os índices de plasticidade diminuíram, melhorando a trabalhabilidade.

Para Guimarães (2002), quando a cal é misturada ao solo, o pH do solo que em geral é de 4,5 e 6,5, é elevado para 11 a 12. São criadas condições de alcalinidade nas quais os minerais da fração argila, e até o próprio quartzo, podem reagir com a cal, formando aluminatos, silicatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados, em números bem significativos, todos com influência no processo de estabilização pelas suas características cimentícias. Ainda segundo o autor, a troca iônica é uma ação imediata, promovendo, após alguns minutos de contato, mudanças nas seguintes propriedades físicas do solo:

- 1) a granulometria, pela floculação ou agregação das partículas originais, isso se caracteriza pelo deslocamento da curva granulométrica para a parte mais grossa do material;

- 2) os limites de Atterberg, cuja alteração mais importante se relaciona ao limite de plasticidade, em que este valor é elevado. Com isso, o índice de plasticidade tende a reduzir, em face às variações dos limites de liquidez e plasticidade;

3) na compactação são observados que, para uma mesma energia, existe uma redução do valor da massa específica máxima seca, e uma elevação da umidade ótima;

4) Na expansão/contração, há uma redução dos valores de suas expansões e contrações, e diminuição da variação volumétrica;

5) o aumento da capacidade de suporte, com a reação da cal na cimentalização da mistura, da compactação e da cura.

Para a estabilização de um solo de fundação ou subleito com cal, as proporções são estabelecidas por dosagem experimental. A cal empregada deve ser a hidratada cálcica ou dolomítica, com teor mínimo de 50% de cal solúvel ( $\text{CaO} + \text{CaOH}_2$ ), determinado conforme a norma NBR 6473 (ABNT, 2003) e a NBR 7175 (ABNT, 2003).

Dias (2004), destaca que o processo de modificação precisa de um teor baixo de cal adicionado ao solo, sendo suficiente apenas para desenvolver as reações imediatas, ou da fase rápida, sem desenvolver as reações lentas cimentantes, ou pozolânicas. Já em relação ao processo de estabilização, o autor relata que o teor da cal adicionado é tal que propicia a ocorrência das reações da fase rápida e da fase lenta.

Serafini *et al.* (2004), realizaram um estudo comparando a influência do tempo e da temperatura de cura no processo de desenvolvimento das reações pozolânicas. Neste estudo, foi utilizada uma cal dolomítica e solos oriundos das regiões de Passo Fundo e Ijuí, ambos no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados concluíram que a resistência das misturas solo-cal aumentou, significativamente, com o tempo de cura. Foi sugerido, então, pelos autores, um tempo de cura de pelo menos 28 dias para solos das duas regiões estudadas. Os autores, ainda, citam que para a temperatura, foram registrados aumentos de resistência para a cura dos corpos de prova acima de 30° C.

Foram analisadas por Pessoa, Camapum e Gouveia (2005), as propriedades físicas, químicas, mecânicas e a microestrutura de um solo da região Amazônica estabilizada com cal. Além de comprovarem as modificações no teor de umidade ótima e na massa específica aparente seca do solo, os autores comprovaram, também, a influência da adição da cal na sucção e no CBR do solo.

Oliveira *et al.* (2005), em sua pesquisa, comprovou que a adição de 4% de cal em um solo granular da região de Anápolis, no estado de Goiás, possibilitou um aumento no valor do CBR a um nível considerado aceitável para pavimentação, além de reduzir os limites de consistência, credenciando a composição desta mistura para ser usada em pavimentação daquela região.

Rosa, Ferreira e Guimarães (2006), estudaram o comportamento de três tipos de solos finos, sendo dois siltosos e um argiloso, estabilizados com os teores de 3% e 6% de cal hidratada cálcica, para uso em rodovias e barragens. Os solos e as misturas de solo-cal foram submetidos aos ensaios de caracterização física, mini-proctor, mini-CBR, na energia normal e intermediária, e de expansão. Nos resultados dos ensaios de CBR, o aumento de resistência permitiu o uso das misturas na execução de sub-base de pavimentos rodoviários, com algumas das misturas atingindo valores de CBR compatíveis para uso em bases destes pavimentos. Quanto aos valores de expansão, foram obtidos resultados considerados também satisfatórios e aceitáveis, comparando-se com os padrões estabelecidos, para uso em base e sub-base de pavimentos.

Little e Epps (2006), realizaram um estudo misturando a cal hidratada no asfalto quente, ainda em fase de execução deste material na pista de rolamento. A pesquisa revelou, através dos ensaios de laboratório e testes realizados em campo, que a cal hidratada, quando misturada com o asfalto ainda quente, reduz, substancialmente, a sensibilidade à umidade. A cal aumenta a liga entre o material betuminoso e o agregado, melhora a resistência do asfalto, e permite uma maior impermeabilização da camada mais superficial induzida pela água. O estudo também revelou que a cal reduziu o envelhecimento oxidativo do asfalto, melhorando as propriedades mecânicas, aumentando a resistência à fadiga, bem como a deformação permanente.

Lopes Junior (2007), em sua pesquisa, analisou misturas de um solo residual de arenito Botucatu do estado do Rio Grande do Sul, com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal hidratada. Nessas misturas foram utilizados 10%, 12%, 14% e 16% de umidade de moldagem. Os resultados demonstraram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão simples para os tempos de cura de 28 e 90 dias. Os resultados apresentaram, também, que não existe uma relação entre a resistência à



compressão simples e a relação água/cal. As amostras curadas com 90 dias apresentaram, em média, resistência 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura. Os ensaios revelaram, também, que para o solo-cal estudado, a relação água/cal não é a melhor forma de se prever a resistência em solos no estado não saturado.

A utilização da cal como agente estabilizante é mais eficaz quando adicionada a materiais finos (siltes ou argilas), quando o índice de plasticidade (IP) varia entre 10% a 50%, e sua estabilização química se dá em duas fases: a fase inicial rápida, podendo durar horas ou dias, e a fase lenta, que pode levar meses ou anos (CORRÊA, 2008).

Na pesquisa realizada por Araújo *et al.* (2008), com um solo fino situado na região do Agropólo do Baixo Jaguaribe no estado do Ceará, e cal do tipo CH-I, foi verificado que houve um aumento do valor do CBR, em (%), com a elevação do teor de cal na mistura. A amostra contendo somente solo teve um CBR de 4%. Após adição de 5% de cal em pasta o CBR chegou a 75%, aproximadamente. Já no ensaio de compressão simples, a amostra de solo natural apresentou o valor de resistência de 226,5 kN/m<sup>2</sup>, e a de solo com adição de 7% de cal em pasta apresentou, aos 90 dias de cura, uma resistência de 1373 kN/m<sup>2</sup>. A adição de cal também melhorou o comportamento resiliente deste solo.

No estudo de Rufo *et al.* (2009), foram analisados dois tipos de solos em duas regiões do estado de Goiás, um solo do município de Catalão e outro de Goiânia. Em relação ao CBR, apresentaram melhorias à medida que aumentou o teor de cal, sendo este maior no solo de Catalão, coincidindo com a constatação realizada por meio dos ensaios de caracterização, nos quais as misturas de cal com o solo de Catalão ocorreu maior agregação. A adição da cal também aumentou a capacidade de troca catiônica, responsável pela redução na plasticidade dos solos e no aumento da fração areia devido à flocculação e aglomeração das partículas.

Nas misturas de um solo residual de arenito Botucatu, material localizado no estado do Rio Grande do Sul, adicionado 25% de cinza volante e 3%, 5%, 7% e 9% de cal hidratada, Dalla Rosa (2009) verificou que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal. Verificou-se, também, que as amostras curadas no período de 90 dias apresentaram 35% a mais de resistência, em média, em relação às amostras curadas aos 60 dias, e estas

amostras ensaiadas aos 60 dias apresentaram resistências 65% superiores às amostras ensaiadas com 28 dias de cura.

O trabalho realizado por Oliveira (2010), com o emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão, determinou que a adição de apenas 3% de cal, o material já atendia aos critérios de CBR e Expansão, pelos órgãos controladores, podendo ser empregado como camada de sub-base. O autor, ainda, destaca que a mistura de 4% e 6% de cal ao solo transformou solos não lateríticos em solos de comportamento laterítico.

Azevedo (2010), realizou um estudo com solo argiloso adicionando 2%, 3%, 4%, e 5% de cal. O material, misturado na usina, foi moldado em corpos de prova para rompimento ao 1, 3, 7 e 14 dias de cura. Os resultados mostraram que é possível realizar a mistura prévia na usina, e, posteriormente, aplicar o material na pista. Foi possível verificar, também, o ganho em resistência, pois mesmo o material estando em repouso ocorre reações entre solo e cal, como floculação e cimentação pozolânica. O autor destaca, ainda, que existe viabilidade na execução de camadas de pavimentação com solo estabilizado com cal.

Guérios (2013), em sua pesquisa estudou um solo da região de Curitiba (PR), adicionando 2%, 5% e 10% de cal hidratada, visando, com isso, o melhoramento do solo para uso como sub-base de pavimentação. Dentre as três porcentagens analisadas pelo autor, a que melhor resultado obteve foi a com 10% de adição de cal, com um aumento considerável na resistência à compressão simples, na resistência ao cisalhamento, melhor trabalhabilidade, maior coesão, e melhora na saturação da mistura do material.

#### 2.4.3 Estabilização Granulométrica

Segundo DNIT (2010), o conceito de estabilização granulométrica nada mais é do que o processo de melhoria da capacidade de resistência dos materiais em seu estado natural ou em mistura de materiais, mediante o emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade.

Na estabilização granulométrica, procura-se obter um material bem graduado e de fração fina plástica limitada, com a mistura de dois ou mais solos e

sua posterior compactação. É possível encontrar material natural que possa ser utilizado sem mistura ou adição de outros materiais ou componentes, para assim ser misturado, este novo material formado pode então ser aplicado em bases e sub-bases de pavimentos, respeitando sempre o contido nas especificações técnicas de projeto (MEDINA; MOTTA, 2004).

Solos arenosos estabilizados granulométricamente são, de um modo geral, facilmente destruídos por ações abrasivas, devido à falta de um ligante, já para os solos argilosos, também analisados separadamente, são muito deformáveis, com baixa resistência ao cisalhamento, quando absorvem água. Na prática, é necessário misturar estes dois tipos de solos, ou seja, solos com características granulares e solos com características coesivas, para poder obter uma mistura com propriedades ideais de resistência, coesão e trabalhabilidade, melhorando a estabilidade e durabilidade do material no serviço de terraplanagem ou pavimentação (MARQUES, 2009).

## 2.5 PAVIMENTAÇÃO

De acordo com a NBR 7207 (ABNT, 1982), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança, e resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Pode-se definir um pavimento como sendo toda a estrutura apoiada sobre a camada final de terraplanagem e destinada a receber o tráfego proporcionando ao usuário comodidade, conforto e segurança (MERIGHI, 2004).

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinado tecnicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos, às condições do clima e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.* 2008).

Pavimento é a superestrutura constituída por uma combinação de camadas finitas, assentadas sobre um terreno ou fundação o qual é designado subleito,

assim, cada camada de um pavimento possui funções específicas, e estão divididas, normalmente, em: sub-base, base e revestimento. As camadas mais externas ao subleito vão ganhando melhores propriedades mecânicas, por terem que suportar maiores cargas (DNIT, 2006).

A estrutura, construída sobre a camada final de terraplenagem, é constituída de várias camadas e vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura assim constituída apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações (MERIGHI, 2004).

Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), define-se pavimento de uma rodovia como superestrutura: estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito. Sendo que a infraestrutura, ou terreno de fundação, recebe o nome de subleito.

As camadas de um pavimento, apresentadas na Figura 2, são denominadas e divididas em: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito, regularização do subleito e subleito.

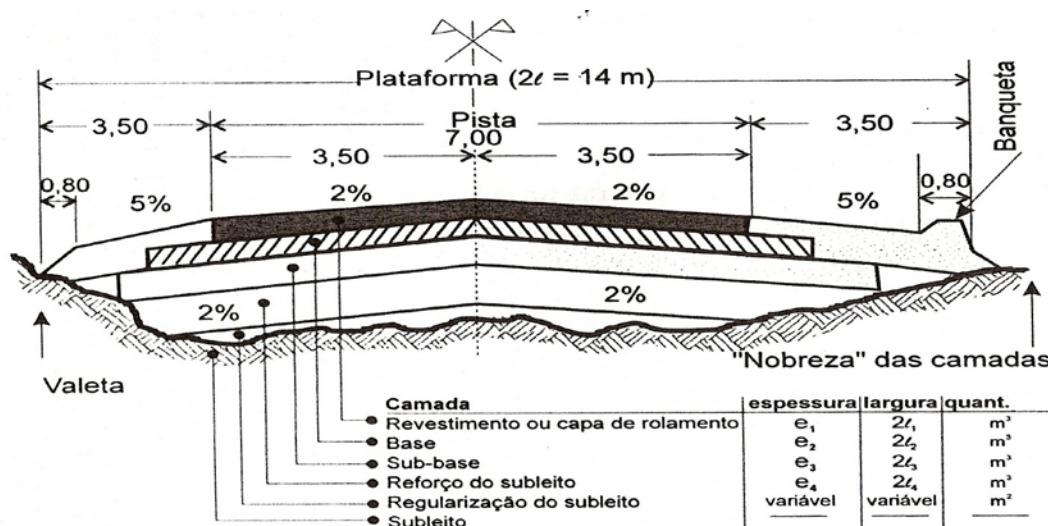


Figura 2 - Seção transversal típica de um pavimento flexível

Fonte: Senço, (2007).

Para iniciar um projeto de pavimentação rodoviária é necessário conhecer, principalmente, a região de localização da construção, as características e parâmetros dos materiais que serão empregados na obra e o volume de tráfego que a rodovia deve suportar, logo, é preciso adotar uma série de procedimentos que correspondam à realização de ensaios de laboratório e de investigação de campo, bem como às avaliações durante a construção e ao longo da vida útil da obra (DNIT, 2005).

### 2.5.1 Função do Pavimento

A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que possibilite a circulação de veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de vida deste pavimento, sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram (Branco *et al.* 2008).

Segundo Pais, Pereira e Azevedo (2000), a comodidade e segurança de circulação dos veículos nas rodovias, são asseguradas pelo papel estrutural e funcional das camadas constituintes do pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às ações climáticas, sem sofrer degradações que ponha em risco a funcionalidade do pavimento. O papel funcional do pavimento está relacionado às características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento.

Segundo Kumar (2013), um revestimento flexível deve possuir determinadas características a fim de ser resistente à abrasão, compressão, tensão, ações repetidas de carga de roda, e de intemperismos, sem sofrer ruptura por fadiga. A base como camada componente do pavimento, deve suportar as cargas recebidas e transferi-las a uma área maior na sub-base e no subleito, devendo ser dimensionada do ponto de vista estrutural. A sub-base deve proteger o subleito, além de evitar a ascensão capilar de água do solo e, também, servir como uma camada de drenagem. Já o subleito pode ser de material natural ou estabilizado e a espessura do pavimento dependerá de sua resistência, se for baixa, a espessura do pavimento será maior e vice-versa.

## 2.5.2 Classificação da Estrutura do Pavimento

Merighi (2004), salienta que, de uma maneira geral, pode-se classificar a estrutura de um pavimento em:

- Pavimentos flexíveis: são pavimentos constituídos por camadas as quais não trabalham à tração, exceção feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte do revestimento é em função das características de distribuição de suas cargas por sistema de camadas superpostas, onde as mais resistentes encontram-se na parte superior da estrutura do pavimento.
- Pavimentos rígidos: são revestimentos definidos como sendo uma estrutura cuja camada de revestimento trabalha essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes destas camadas as quais são constituídas, basicamente, de concreto, sendo estas apoiadas em uma sub-base de transição.
- Pavimentos semi-rígidos: é todo o pavimento definido na sua execução como sendo aquele em que a base da estrutura é executada com adição de cimento. Devido ao aumento de rigidez e, conseqüentemente, módulo de elasticidade, o mesmo absorve parte dos esforços de tração.

Os revestimentos das estruturas de pavimento, em geral, são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas, principalmente, à compressão. Em certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar a rigidez, podendo resistir a esforços de tração. Embora possuam coesão, as camadas de solos finos apresentam baixa resistência à tração, diferentemente dos materiais estabilizados quimicamente (BERNUCCI *et al.* 2008).

Assim, a estrutura de um pavimento destina-se basicamente a resistir às cargas impostas a ele, transferindo, continuamente, estes carregamentos ao terreno de fundação sem gerar danos ao mesmo nem à estrutura.

## 2.6 CAL

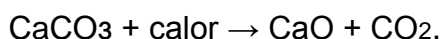
A cal possui um importante papel no desenvolvimento da nação, pela multiplicidade de seus usos e também pela abundância da matéria prima no Brasil. Dada a diversidade de utilização da cal e as grandes reservas de calcários, o país possui grande intensidade de uso ainda incipiente se comparado aos países mais desenvolvidos. A cal é usada para melhorar a funcionalidade e características do solo para a construção de estradas, elevando, substancialmente, sua estabilidade, impermeabilidade e capacidade de suporte (ABPC, 2008).

Na metade do século passado, V. J. Azbe, mestre da ciência e na arte de fabricar cal, fazia o seguinte comentário sobre o produto: a cal participa diariamente de nossa vida, de nossas construções, dos produtos químicos e agrícolas, as atividades e a salubridade das indústrias e das cidades dependem dela em grande parte, de modo que, pode ser considerado o mais importante produto químico inorgânico à disposição na atualidade, sendo que o volume de consumo de cal pode ser considerado como um índice de desenvolvimento de um Estado (GUIMARÃES, 2002).

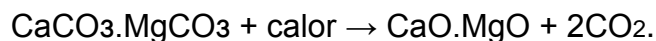
A cal diminui a plasticidade, reduz a expansão e aumenta a resistência do solo, por ser constituído de um material fino. Conseqüentemente, produz uma reação química na mistura com outros materiais e ligantes, apresentando um aumento da superfície específica do material, proporcionando um considerável aumento na capacidade de saturação, diminuindo, assim, o peso específico aparente seco máximo (ARAUJO *et al.* 2008).

### 2.6.1 Cal Virgem

A cal viva, ou cal virgem, é composta por óxidos de cálcio ou cálcio-magnésio. O processo de calcinação do calcário, onde o carbonato de cálcio da rocha é reduzido a óxido de cálcio, é descrito na seguinte reação:



Quando ocorre a calcinação do dolomito, ou calcário dolomítico, que contem carbonatos de cálcio e magnésio em sua formação a calcinação ocorre conforme a seguinte reação:



O produto de cada reação recebe um nome diferenciado, sendo que o óxido de cálcio da primeira reação recebe o nome de cal calcítica e o produto misto deste com o óxido de magnésio, é denominado de cal dolomítica (GUIMARÃES, 2002).

Para Guimarães (2002), a cal é obtida através de uma reação química simples, denominada calcinação, mas que requer conhecimento e habilidade para alcançar o padrão de qualidade ideal. Outra característica do produto são as amplas possibilidades da escala de fabricação que se apresentam, normalmente, em fornos rudimentares, de pequena produção até fornos de alta tecnologia com uma produção volumosa, o que a tornou reconhecida mundialmente.

O principal produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, também denominada cal viva e cal ordinária. O termo cal virgem é o consagrado, na literatura brasileira e nas normas NBR 6453, NBR 6473, NBR 7175 (ABNT, 2003) para designar o produto composto, predominantemente, por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 a 1200 °C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

A qualidade comercial de uma cal depende das propriedades químicas do calcário e da qualidade da queima. É classificada conforme o óxido predominante, em: Cal virgem cálcica (com óxido de cálcio entre 100% e 90% do óxido total presente); cal virgem magnesia (com teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% do óxido total presente); e cal virgem dolomítica (com óxido de cálcio entre 65% e 58% do óxido total presente) (MINASCAL, 2012).

### 2.6.2 Cal Hidratada

Segundo a descrição dada pela NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação da cal virgem, constituída essencialmente de



hidróxido de cálcio ou uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

Foi editada, em maio de 2003, a última versão da NBR 7175 a qual manteve a denominação dada em 1992 para os tipos de cal presentes no mercado: cal hidratada CH-I, CH-II e CH-III. Deve-se esclarecer que antes da reforma desta norma, em 1992, só existia a cal comum CH-II, mas com o avanço tecnológico, houve a necessidade, e exigência por parte dos consumidores, de uma cal mais pura, que estabelecesse melhor sua finalidade quando aplicada.

A cal hidratada é resultante da hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio e é obtida na forma de pó branco e seco, com 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002).

Segundo Guimarães (2002), a cal na forma hidratada utilizada na estabilização ou melhoria de solos de baixa capacidade de suporte deve obedecer, no mínimo, às exigências da norma NBR 7175 (ABNT, 2003).

O uso da cal como aglomerante, no Brasil, deve-se principalmente à dispersão geográfica das suas usinas de fabricação, face às ocorrências de calcários e dolomitos por quase todo o território nacional, à facilidade e abundância da sua oferta ainda que para cales especiais, o suprimento às vezes implique em transporte mais longo, e ao seu baixo custo, o menor entre os reagentes químicos alcalinos e os aglomerantes cimentantes (MINASCAL, 2012).

A cal hidratada é utilizada como aglomerante na indústria da construção civil e é muito difundida, principalmente em argamassas para assentamento de tijolos e revestimento de paredes, devido a algumas características da cal, como à trabalhabilidade, plasticidade e durabilidade das argamassas. A cal hidratada tem características aglomerantes assim como o cimento, sendo que, enquanto o cimento reage com água em uma reação de hidratação, o endurecimento da cal hidratada ocorre pelo contato com o ar. Essa reação transforma a cal num carbonato tão sólido quanto o calcário que a originou (MINASCAL, 2012).

A NBR 7175 (ABNT, 2003), especifica que a cal hidratada deve ser designada de acordo com os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, de exigências químicas e físicas mínimas, sendo caracterizadas conforme indicado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Exigências químicas e físicas da cal**

QUÍMICAS				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub> )		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%
FÍSICAS				
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira Ø 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
Finura (% retida acumulada)	Peneira Ø 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		

Legenda: CH-I, CH-II, CH-III – tipos de cales

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003).

A Tabela 4 apresenta as cales do mercado brasileiro e as suas propriedades regidas pelos seus valores médios, segundo a ABPC (GUIMARÃES, 2002).

**Tabela 4 - Valores médios da composição das cales brasileiras**

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
Cal Virgem Cálctica	90 a 98	0,1 a 0,8	0,5 a 3,5	0,2 a 1,0	0,5 a 5,0	0,2 a 3,8	0,1 a 0,6	96,0 a 98,5	-
Cal Hidratada Cálctica	70 a 74	0,1 a 1,4	0,5 a 2,5	0,2 a 0,8	23 a 27	1,5 a 3,5	0,1 a 0,0	96,0 a 98,5	0,5 a 1,8
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnesiana	39 a 61	15 a 30	0,5 a 18,2	0,2 a 1,5	19 a 27	3,0 a 6,0	0,02 a 0,20	76 a 99	5 a 25
Cal Virgem Dolomítica ou Magnesiana	51 a 61	30 a 37	0,5 a 4,5	0,2 a 1,0	0,5 a 4,5	0,5 a 4,8	0,05 a 0,10	76 a 99	-

Fonte: Guimarães, (2002).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES

O programa experimental da presente pesquisa contempla duas etapas de estudos em laboratório: uma primeira etapa são os ensaios do solo laterítico em seu estado natural; e a segunda etapa, os ensaios com adições de cal hidratada em pó no solo em quatro porcentagens distintas, visando, através de uma comparação com o solo sem adição, investigar e identificar o efeito causado pela mistura.

Para as duas etapas foram realizados ensaios de resistência a compressão simples, CBR e determinação do teor de umidade ótima, nas energias de compactação normal e intermediária, com a utilização de um cilindro pequeno.

#### 3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O planejamento do presente estudo foi realizado da seguinte forma: inicialmente foi selecionado o solo a ser analisado, após esta etapa foram pesquisados alguns tipos da cal usualmente empregados que, segundo a literatura, poderiam proporcionar a estabilização, ou mesmo o melhoramento, do solo em questão.

Na seqüência, buscou-se verificar, na bibliografia existente, algumas dosagens de cal já estudada, métodos de utilização e ensaios que poderiam ser realizados com o solo sedimentar e a cal hidratada em pó.

#### 3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis analisadas neste estudo foram classificadas como fixas e controláveis, sendo o tipo de solo e o tipo de aditivo químico como variáveis fixas, já a dosagem, a quantidade de teor da cal hidratada e o tempo de cura das misturas como sendo variáveis controláveis. A variável fixa é uma variável que não podemos

alterar ou o material a ser estudado não se altera por si, e a variável controlável é aquela que podemos definir como tempo, quantidade, teor, temperatura etc.

### 3.3.1 Solo

Como já citado anteriormente, para este estudo, elegeu-se utilizar um tipo de solo sedimentar coletado em um bairro da região de Curitiba, capital do estado do Paraná. Este solo foi coletado em uma escavação na região, aproveitando-se, assim, um material que seria descartado pela empresa construtora.

O critério de adoção desse solo para o estudo se deu pelo fato de aproveitar um material já disponível, por existir em grande quantidade, estar visivelmente sem contaminações, possuir uma uniformidade na textura e cor e se encontrar próximo ao local dos ensaios.

Um segundo fator na escolha deste tipo de solo se deu em função da necessidade de produzir uma mistura de solo mais a cal, que viesse a se tornar um material economicamente viável, para uma futura utilização em programas de pavimentação urbana de Curitiba, considerando principalmente a distância de transporte.

E, um terceiro fator, é em decorrência da escassez de jazidas de materiais granulares e saibros na região, que são utilizadas em estruturas de base e sub-base de pavimentos.

O solo foi coletado em março de 2014, quando da escavação para a execução de uma cisterna no local. A uma profundidade entre 35 cm e 4 m. Foi coletado cerca de 400 Kg de solo que foram acondicionados em tambores plásticos com tampa e capacidade de 50 Kg, cada. Em seguida, os mesmos foram enviados ao laboratório de mecânica dos solos do campus Ecoville da UTFPR.

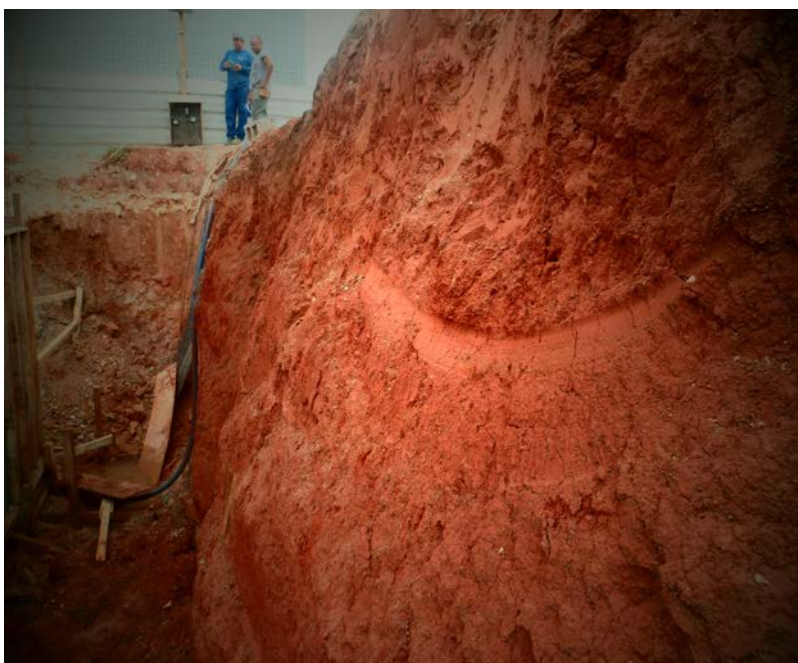
As amostras de solo sedimentar estudado foram coletadas em um terreno localizado na rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, número 4722, no bairro CIC (Cidade Industrial de Curitiba). Na Figura 3 é apresentada uma vista geral do local.

Este terreno se encontra em propriedade da união, e sob administração da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Sede Ecoville.



**Figura 3 - Vista geral da área onde foram coletadas as amostras de solo**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 4 apresenta a montagem da cisterna e o local exato de coleta do solo. Este solo é representativo dos solos típicos da região de Curitiba. Imediatamente após a coleta foram retiradas amostras para determinação da umidade natural.



**Figura 4 - Local da escavação da cisterna**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após coletado, o solo foi seco ao ar, desagregado e peneirado na peneira ABNT nº 4 (4,8 mm). Foram realizados ensaios buscando conhecer suas propriedades e características para poder estabelecer alguns parâmetros fundamentais no processo de melhoramento da estabilização do solo analisado. Assim sendo, a determinação da curva granulométrica, a densidade real dos grãos e a curva de compactação determinando o teor ótimo de umidade, foram ensaios indispensáveis para dar prosseguimento ao programa experimental.

### 3.3.2 Cal

A cal utilizada é do tipo dolomítica hidratada CH-III, da marca ITABRANCA, fabricado pela EB indústria e comércio de cal Ltda. Na Figura 5 é apresentada a embalagem na qual está acondicionada a cal utilizada nesta pesquisa. A sua fabricação e nomenclatura está em conformidade com a norma NBR 7175 (ABNT, 2003), segundo o que se encontra escrito na embalagem, e conforme determina a norma ES-P 14 (DER/PR, 2005), a qual recomenda a cal hidratada CH-III. A cal hidratada CH-III foi escolhida, também, por ser o tipo de cal mais comercializada e utilizada na região de Curitiba.



**Figura 5 - Embalagem da cal utilizada na pesquisa**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.3 Água

A água utilizada na execução dos ensaios, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova, foi uma água potável fornecida pela empresa de abastecimento do estado do Paraná. Sendo que para os ensaios de caracterização foi utilizada água destilada, quando os mesmos eram solicitados pela respectiva norma.

## 4 MÉTODOS DE ENSAIOS E EQUIPAMENTOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas informações gerais com relação ao procedimento do estudo, o qual se deu exclusivamente em laboratório, como alguns ensaios de caracterização dos materiais empregados na pesquisa, os critérios adotados para a escolha desses materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais.

### 4.2 MÉTODOS

É de conhecimento que a descrição clara dos métodos utilizados nos trabalhos científicos e acadêmicos possui uma grande importância na validação dos resultados obtidos, a fim de que seja possível a reprodução ou até mesmo a continuidade dos estudos. Sendo assim, a seguir, são apresentados os métodos utilizados na pesquisa, bem como, a escolha das misturas analisadas, os equipamentos e a programação realizada.

### 4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica do solo natural, bem como alguns ensaios que se fizeram necessários para as misturas do solo com a cal hidratada em pó. Na sequência, foram executados os ensaios de análise do pH da cal, do solo e das misturas.

#### 4.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos solos é um ensaio de caracterização rotineiro realizado por peneiramento e sedimentação. O ensaio granulométrico foi executado



conforme a NBR 7181 (ABNT, 1988), no qual foi utilizado um agitador de peneiras eletromecânico da marca Lucadema. A Figura 6 apresenta o equipamento utilizado no peneiramento do solo.



**Figura 6 - Agitador de peneiras utilizado no ensaio**  
**Fonte: Autoria própria.**

Seu procedimento foi dividido em três etapas: primeiro o peneiramento grosso, em segundo a sedimentação e na terceira etapa o peneiramento fino. Na etapa de ensaio de sedimentação foi utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio, para poder, assim, se obter uma melhor desagregação das partículas de solo.

#### 4.3.2 Massa Específica Real dos Grãos

O procedimento para a determinação da massa específica real dos grãos ( $\delta$ ) foi realizado conforme preconiza a NBR 6508 (ABNT, 1984), através do procedimento do picnômetro. O detalhe do ensaio sendo realizado pode ser observado na Figura 7.

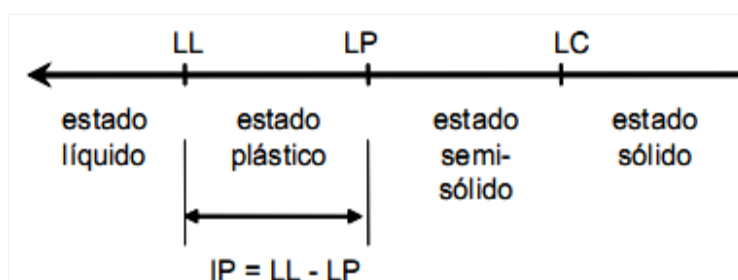


**Figura 7 - Detalhe do ensaio para determinação da massa específica**

**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.3.3 Limites Físicos de Consistência

Os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, chamados de limites de Atterberg, nos fornecem informações sobre o material quanto à sua trabalhabilidade, variação de volume e absorção de água, conforme apresentado na Figura 8. Nesta pesquisa, os limites de Atterberg (ou de consistência) do solo, foram determinados de acordo com as metodologias propostas pelas normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1988).



**Figura 8 - Esquema simplificado dos limites de consistência do solo**

**Fonte: Greco, (2007).**

O Limite de Liquidez (LL), apresentado em porcentagem, é: o teor de umidade do solo com o qual se unem, em um centímetro de comprimento, os bordos inferiores de uma canelura, feita em uma massa de solo colocada na concha de um

aparelho normalizado, sob a ação de 25 golpes desse aparelho. Sendo assim, o limite de liquidez marca a transição do estado plástico ao estado líquido. O Limite de Plasticidade (LP), também representado em porcentagem, é: o teor de umidade com o qual se submete uma pequena porção de solo à rolagem sobre uma placa de vidro porosa com a palma da mão, formando um cilindro de solo em que este começa a torcer ou a partir em fragmentos, quando o diâmetro do cilindro atinge 3mm. A Figura 9 apresenta os materiais e equipamentos necessários para as determinações dos limites físicos de Atterberg.



**Figura 9 - Materiais utilizados no ensaio dos limites de Atterberg**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.3.4 Compactação

O ensaio de compactação é um procedimento que visa à densificação do material, a obtenção do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$  máx) e da umidade ótima ( $W_{ót}$ ) de um solo. Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), para a amostra de solo natural bem como para as misturas de solo com adição da cal hidratada em pó, nas quantidades de 0%, 3%, 6%, 8% e 16%. Neste item, foram utilizadas dois tipos de energia de compactação: a energia normal e a energia intermediária.

Na realização do ensaio do Proctor normal, a amostra de solo é compactada em três camadas, que recebem 26 golpes por camada com um soquete pequeno de

2500 g de massa e altura de queda de 305 mm. Para o Proctor intermediário o solo é moldado também em três camadas, sendo que cada camada recebe 21 golpes do soquete grande, com 4536 g de massa e uma altura de queda de 457 mm.

O molde cilíndrico utilizado para a compactação dos corpos de prova encontrava-se com as seguintes dimensões: 100 mm de diâmetro por 127 mm de altura. Este procedimento foi adotado a fim de determinar as características das amostras de solo natural e solo misturado com a cal hidratada. A Figura 10 apresenta o ensaio de compactação do solo sendo realizado conforme as especificações da norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

O resultado obtido neste ensaio fornece o peso específico aparente seco máximo do material e sua umidade ótima de compactação. O objetivo deste ensaio é determinar o fator água-aglomerante para a correta moldagem dos corpos de prova.



**Figura 10 - Ensaio de compactação realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 1986)  
Fonte: Autoria própria.**

#### 4.3.5 CBR e Expansão

Para o solo natural, bem como para as respectivas misturas com a cal hidratada, a capacidade de suporte e expansibilidade foram avaliadas utilizando o ensaio de CBR, medindo a resistência à penetração da amostra saturada

compactada, constituída de cinco camadas com 26 golpes por camada, soquete de 4536 g de massa e altura de queda do soquete de 457 mm.

Foram confeccionados, e ensaiados, dois corpos de prova por série: solo natural, 3%, 6%, 8% e 16% de cal hidratada, com a umidade ótima e seu respectivo peso específico aparente seco máximo, obtidos nos ensaios de compactação, moldados nas energias dos proctor normal e intermediário. Sendo apresentado da seguinte forma: um corpo de prova moldado no cilindro de CBR na umidade ótima do Proctor normal, e um corpo de prova confeccionado em molde de CBR na umidade ótima do Proctor intermediário.

Imediatamente após a moldagem, os corpos de prova foram imersos em um tanque com água potável, por um período de 96 horas, sendo que a cada 24 horas eram realizadas as medições das expansões, com extensômetro de 0,01 mm de precisão. Na Figura 11, é apresentado o ensaio de expansão com os CPs imersos no tanque com água potável, e seus respectivos relógios comparadores.



**Figura 11 - Ensaio de CBR em tanque com relógios comparadores**  
**Fonte: Aatoria própria.**

Após o tempo do ensaio de expansão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de penetração em uma prensa Universal, da marca EMIC modelo DL 30000N, com célula de carga calibrada e velocidade de carga de 1,24 mm por minuto, determinando, assim, os valores de CBR das amostras. Os ensaios foram

realizados com base nas normas ME-049 (DNER, 1994) e a NBR 9895 (ABNT, 1997).

O valor obtido no ensaio de CBR, apresentado em porcentagem, é utilizado como um parâmetro de limite de aceitação do manual de pavimentação do DNER IPR-719 (DNIT, 2006), como especificação para dimensionamento de pavimentos flexíveis. A Tabela 5 apresenta os limites para cada camada de pavimento segundo o DNIT (2006).

**Tabela 5 - Limite de CBR para camadas de pavimento**

Camada do Pavimento	Expansão	ISC / CBR
Subleito	$\leq 2\%$	$\geq 2\%$
Reforço de Subleito	$\leq 1\%$	Maior que o CBR do Subleito
Sub-Base	$\leq 1\%$	$\geq 20\%$
Base	$\leq 0,5\%$	$\geq 80\%$

**Fonte: IPR-719 (DNIT, 2006).**

#### 4.3.6 Resistência à Compressão Simples

Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização de solos, determinar aspectos relativos à importância de fatores que influenciam sobre a resistência de solos tratados ou mesmo de solos melhorados com outros aditivos.

Os ensaios de RCS foram executados com corpos de prova modificados, nas dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura obedecendo à relação de 2:1. Foi proposto o cilindro modificado, pelo fato do mesmo possuir um volume reduzido, proporcionando assim uma menor quantidade de material para a confecção e moldagem dos corpos de prova, pela facilidade de movimentação do material de moldagem, uma melhor agilidade e velocidade na execução dos corpos de prova, menor esforço físico do operador, maior precisão nos corpos de prova em relação a sua massa.

A energia de compactação utilizada para a confecção dos corpos de prova de dimensões reduzidas é calculada pela energia de compactação do proctor

(normal ou intermediário) padronizado multiplicado pelo seu volume. Na Figura 12, é apresentado o molde cilíndrico bem como o soquete de compactação, confeccionados para a moldagem dos corpos de prova modificados.



**Figura 12 - Molde cilíndrico e soquete utilizado na confecção dos CPs**

**Fonte: A autoria própria.**

A compactação dos corpos de prova foi dividida em três camadas devido a altura limitada do colarinho do molde, sendo que para a compactação na energia normal foram aplicados 10 golpes por camada, e para a energia de compactação intermediária foram aplicados 12 golpes por camada, atentando sempre para os teores de umidade ideais em cada série de ensaios, atendendo aos requisitos das energias de compactação realizadas nas séries normal e intermediária. Os ensaios foram realizados baseando-se nas normas NBR 6457 (ABNT, 1986) e a NBR 12770 ((ABNT, 1992).

Os corpos de prova para os ensaios de RCS foram moldados nas condições ótimas de compactação, com variação de peso específico de  $\pm 0,5\%$  e de teor de umidade de  $\pm 0,5\%$ , para as duas formas de energia de compactação, normal e intermediária. Os ensaios de RCS foram executados no laboratório de materiais da UTFPR Campus sede Ecoville.

A Figura 13 representa a extratora utilizada nos procedimentos de extração dos corpos de prova do cilindro, também confeccionada exclusivamente para este fim.





**Figura 13 - Extratora para corpo de prova com dimensões reduzidas**  
**Fonte: Aatoria própria.**

Para os ensaios de RCS e CBR utilizou-se, a prensa universal, da marca EMIC, modelo DL 30000N, com célula de carga modelo TRD-29 calibrada, velocidade de deformação de 0,20 mm por minuto, e capacidade máxima de 30.000 Kgf. A Figura 14 apresenta a prensa utilizada nos ensaios de CBR e RCS.



**Figura 14 - Prensa universal utilizada nos ensaios de CBR e RCS**  
**Fonte: Aatoria própria.**



#### 4.3.7 Caracterização Físico-Química do Solo

A caracterização da propriedade química do solo auxilia na interpretação dos dados, e compreensão dos possíveis processos que possam ocorrer no solo estabilizado quimicamente durante os ensaios de CBR e de RCS. A caracterização química do solo natural e as adições com a cal hidratada foi executado o ensaio que determina o pH dos materiais conhecido como o método do pH.

#### 4.3.8 Ensaio de pH do Solo

O pH é a medida mais simples feita no solo, mas, sem dúvida, de grande importância. Ele reflete um conjunto complexo de reações no sistema solo versus solução, é muito útil quando associado à propriedades do solo, como o estado em que se encontram as suas bases, e a solubilidade de micronutrientes (NÚÑEZ, 1991).

A determinação do pH do solo foi realizada segundo Camargo *et al.* (2009), através dos ensaios de pH do solo suspenso em água e em cloreto de potássio a um mol (1N), em uma proporção de 1:2,5. Com isso, a diferença entre as leituras de pH define a variação do potencial hidrogeniônico ( $\Delta\text{pH}$ ), conforme a seguinte (equação 3):

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{KCl}) - \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) \quad (3)$$

O valor do  $\Delta\text{pH}$  indica, através do sinal e magnitude, a carga existente na superfície das partículas.

#### 4.3.9 Mistura Solo-Cal

##### 4.3.9.1 Dosagem pelo método de Eades e Grim

O método do pH preconizado por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), fundamenta-se no pH da mistura solo + cal. Sendo que o princípio básico deste procedimento é adicionar uma quantidade suficiente de cal de modo a assegurar um

pH de 12,4, para a ocorrência das reações pozolânicas que proporcionam resistência à mistura. Este método foi desenvolvido para solos de climas temperados.

Para alguns tipos de solos tropicais o limite de pH de 12,4 é muito difícil de ser atingido pelo método preconizado por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), pois em estudos realizados no Brasil demonstram que os teores da cal determinados pelo método de pH não são suficientes para estabilizar solos tropicais e subtropicais.

#### 4.3.9.2 Dosagem pelo método de Thompson

O método de Thompson (1966 *apud* Núñez, 1991), define que um solo é reativo quando for adicionada cal suficiente para que a sua resistência à compressão simples atinjam, pelo menos, 345 kN/m<sup>2</sup>, ou 0,345 MPa, após 28 dias de cura a 22,8 °C, precedidos por uma imersão prévia de 24 horas, em água potável, antes do rompimento do material.

Os ensaios de pH do solo natural e das adições com a cal hidratada, foram realizados no laboratório de mecânica dos solos e no laboratório de saneamento da UTFPR, Campus Curitiba, sede Ecoville. Na Figura 15 é apresentado o equipamento utilizado no ensaio do pH das amostras de solo natural e das adições do solo com a cal hidratada, o equipamento é denominado peagâmetro da marca PHTEH.



**Figura 15 - Equipamento utilizado para o ensaio do pH**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nesta pesquisa, foram utilizados os métodos propostos por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), e Thompson (1966 *apud* Núñez, 1991), apenas como referência, devido às limitações destes dois métodos para utilização em solos tropicais.

#### 4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS

O método empregado e seguido nesta pesquisa para a mistura da cal hidratada em pó ao solo realiza-se da seguinte forma: adiciona-se, inicialmente, o aditivo em pó nas devidas porcentagens estabelecidas ao solo seco e, em seguida, é realizado a mistura e homogeneização do material para, posteriormente, ser adicionada água à mistura, sendo a massa da água a ser adicionada calculada pelos teores de umidade ideais fornecidos pelos ensaios de compactação.

##### 4.4.1 Dosagem da Mistura Solo-cal

A dosagem das misturas do solo natural com a cal hidratada em pó, foi executada com a aplicação do conceito idealizado por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), conhecido como método do pH, em consonância com o método de Thompson, sendo que os corpos de prova não foram imersos em água, por 24 horas, antes do ensaio de resistência à compressão simples.

Das amostras de solo natural, bem como das amostras com adição da cal hidratada, foram confeccionados corpos de prova em quantidade de quatro por porcentagem (0%, 3%, 6%, 8%, e 16% de mistura) e por período de rompimento, para os períodos compreendidos (0, 7, 14, 28 e 56 dias), perfazendo um total de cem amostras na energia de compactação do proctor normal. Para a energia de compactação do proctor intermediário, o período de rompimento dos corpos de prova foram (0, 7, 14 e 28 dias), dando um total de oitenta moldes. Com as duas séries de CPs moldados a quantidade de peças se somou a exatos cento e oitenta moldes. A Tabela 6 apresenta a quantidade de CPs, porcentagem utilizada de mistura e períodos de cura das amostras.

**Tabela 6 - Quantidade de CPs, porcentagem de mistura e período de cura**

Energia de compactação do proctor normal						
Solo + Cal	1º dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	Total
0%	4	4	4	4	4	20
3%	4	4	4	4	4	20
6%	4	4	4	4	4	20
8%	4	4	4	4	4	20
16%	4	4	4	4	4	20
Total de CP	20	20	20	20	20	100
Energia de compactação do proctor intermediário						
Solo + Cal	1º dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	Total
0%	4	4	4	4	0	16
3%	4	4	4	4	0	16
6%	4	4	4	4	0	16
8%	4	4	4	4	0	16
16%	4	4	4	4	0	16
Total de CP	20	20	20	20	0	80

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.2 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

A confecção dos CPs foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, embalagem, acondicionamento, armazenagem e cura. Após a aferição da massa dos materiais (solo, cal e água), com precisão de 0,01 g, o solo e a cal hidratada em pó, nas suas respectivas porcentagens, eram misturadas em uma bandeja plástica com o auxílio de uma concha metálica, em formato de colher, até que a mistura atingisse coloração uniforme. Em seguida, era adicionada água, executando, assim, todo o processo de mistura até que o material se tornasse homogêneo.

A quantidade de cal hidratada em pó para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo natural seco utilizado, e a quantidade de água (teor de umidade ótimo em relação a cada porcentagem, nas energias de compactação do proctor normal e intermediário), em relação à soma das massas de solo seco, mais a adição da cal hidratada em pó nas porcentagens estabelecidas para esta pesquisa. Sendo assim para a confecção de um CP reduzido na energia de compactação normal do proctor, a quantidade de mistura (solo+cal+água) é de 372 g, e para a confecção de um CP na energia de compactação intermediária do proctor, a soma das misturas em massa é de 375 g.

Em todo o processo de mistura, três pequenas porções de material eram retiradas e colocadas em cápsulas, para se estabelecer o teor de umidade da mistura.

Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova era imediatamente extraído do molde, medido sua massa, seu diâmetro, sua altura anotando seus valores com precisão de 0,01 g e 0,1 mm, respectivamente. Em seguida, foram embalados em plástico filme e colocados dentro de um saco plástico amarrado com elástico, adequadamente identificado. Esta vedação se fez necessária para se evitar variações significativas nos teores de umidade dos CPs. Os corpos de prova foram, então, acondicionados em câmara úmida pelos períodos estabelecidos no programa de ensaios. A Figura 16 apresenta uma sequência básica de moldagem dos CPs.



**Figura 16 - Sequência de moldagem do CP reduzido executado em laboratório**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar maior que 95%, por todo o período de ensaio. Foi utilizado para este procedimento uma câmara úmida do laboratório de materiais da UTFPR Campus sede Ecoville.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES

Os resultados dos ensaios realizados, cujas metodologias foram detalhadas no capítulo anterior, serão apresentados e analisados neste capítulo de maneira conjunta, sendo mostrados os ensaios do solo natural, bem como os obtidos com a adição da cal hidratada em pó. Ressalta-se que as análises foram realizadas considerando o comportamento de um solo da região de Curitiba, em condições naturais, associado com porcentagens pré-definidas da cal hidratada.

Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização granulométrica e sedimentação, realizados para as amostras de solo natural.

#### 5.1.1 Análise Granulométrica por Peneiramento

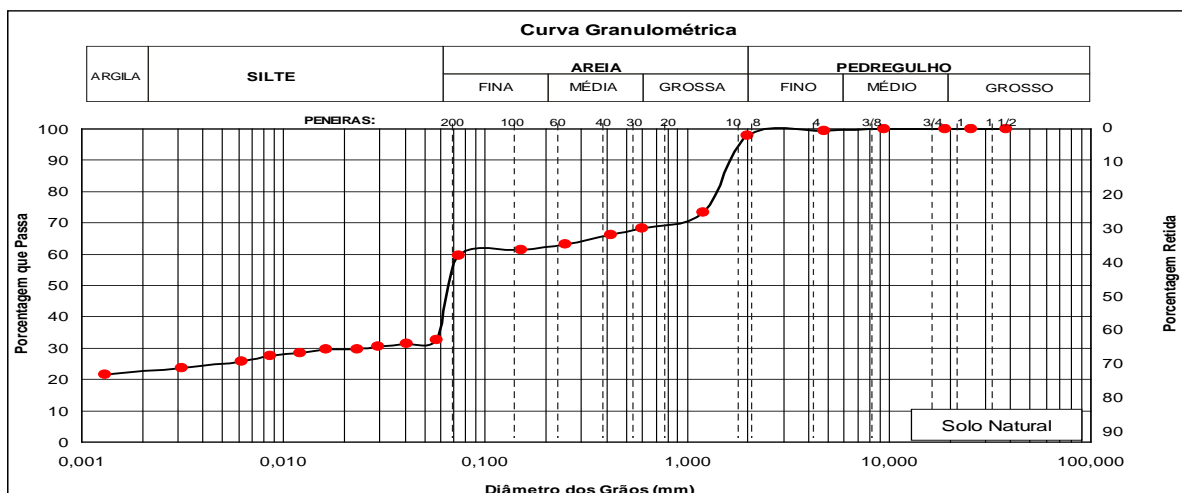
Os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento do solo natural estão apresentados na Figura 17, a amostra do solo estudado indica um solo com as seguintes composições: 2% de pedregulho (2,0 a 60 mm), 77% de areia (de 0,06 a 2,0 mm), 9% de silte (de 0,06 a 0,002 mm) e 12% de argila (inferior a 0,002 mm) de material retido.

Analisando granulometricamente o solo natural, quando observado pela metodologia preconizada pela NBR 7181 (ABNT, 1988), pode-se dizer que, esta amostra de solo é classificada como uma areia de granulometria grossa, com presença de silte e argila. A Tabela 7 apresenta um resumo do ensaio granulométrico do solo natural.

**Tabela 7 - Resultado do ensaio granulométrico do solo natural**

Composição Granulométrica Pela Escala da ABNT					
Argila	Silte	Fina	Areia Média	Grossa	Pedregulho
12%	9%	19%	16%	42%	2%

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 17 - Curva granulométrica do solo natural ensaio de granulometria conjunta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Ainda com relação ao ensaio granulométrico apresentado na Figura 17, se verifica a existência de frações siltosas e argilosas com uma uniformidade e nivelamento entre estas duas frações, perfazendo uma diferença de apenas 3% entre elas.

### 5.1.2 Análise Granulométrica por Sedimentação

Considerando a distribuição granulométrica conjunta obtida através do ensaio de granulometria por peneiramento, foi realizado o ensaio de sedimentação do solo natural utilizando o defloculante hexametáfosfato de sódio com água destilada.

Para o ensaio de granulometria por sedimentação foi utilizado material que passa na peneira número 10 ou de 2,0 mm, observando a NBR 7181 (ABNT, 1984), este ensaio foi realizado apenas com amostras de solo natural.

O resultado demonstra que o uso do defloculante aumenta as porcentagens de partículas finas retidas, correspondendo assim às frações de silte e argila.

## 5.2 MASSA ESPECÍFICA

### 5.2.1 Massa Específica Real dos Grãos

Este método prescreve o procedimento de determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm (# 40), por meio de picnômetro, através da realização de pelo menos dois ensaios, neste caso foram realizados três ensaios. Para a determinação da massa específica dos grãos, foram utilizadas apenas as amostras deformadas do solo natural, seguindo os procedimentos da NBR 6508 (ABNT, 1984).

O material permaneceu em repouso por pelo menos 24 horas, em seguida foi realizada a desaeração da mistura através da aplicação de vácuo, até que não fossem mais detectadas bolhas de ar. A Tabela 8 apresenta os dados do ensaio de massa específica real dos grãos de solo.

**Tabela 8 - Dados do ensaio de massa específica real dos grãos**

Massa Específica Real dos Grãos de Solo			
Temperatura (°C)	20		
Picnômetro nº	1	2	3
Picnômetro (g)	63,63	69,30	68,46
Pic + Solo Seco (g)	83,63	89,30	88,46
Pic + Água (g)	163,30	168,98	168,27
Pic + Solo + Água (g)	175,72	181,37	180,56
Solo Seco (g)	20,00	20,00	20,00
Fator de Correção (K)	0,9982		
Massa Específica ( $\rho$ )	2,634	2,623	2,589
Média ( $\rho$ )	2,616 g/cm <sup>3</sup>		

**Fonte: Autoria própria.**

A massa específica real dos grãos de solo é de ( $\rho$ ) 2,616 g/cm<sup>3</sup>, pela média de três ensaios realizados apenas com o solo em seu estado natural, não sendo necessária a realização deste com as respectivas adições da cal hidratada.

### 5.3 LIMITES FÍSICOS DE CONSISTÊNCIA

Os limites físicos de consistência do solo são determinados pelos seus limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, ensaios estes realizados com a fração fina do solo, conforme preconizam as normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1988).

#### 5.3.1 Limite de Liquidez



Os ensaios de limites de liquidez foram realizados com as amostras de solo natural bem como, com amostras misturadas com a cal hidratada nas porcentagens estabelecidas por este estudo. Para cada amostra foram realizados cinco ensaios de Limites de Liquidez (LL). Este ensaio foi realizado conforme preconiza a NBR 6459 (ABNT, 1984). A Tabela 9 apresenta o resumo dos valores obtidos com os ensaios de Limite de Liquidez das amostras de solo, e suas respectivas adições de cal hidratada.

**Tabela 9 - Resultado dos ensaios de LL do solo com adição da cal**

Solo + Teor de Cal (%)	0 %	3 %	6 %	8 %	16 %
Limite de Liquidez Médio (%)	45,54	44,77	44,79	44,93	44,60
Limite de Liquidez (com 25 golpes %)	45	44	44	43	44

**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se observar que o solo sem a adição da cal hidratada obteve um (LL) de 45,54%, sendo que para os 25 golpes obteve 45%, para os solos com as adições de 3, 6, 8 e 16% da cal na mistura os valores apresentados foram de 44,77%, 44,79%, 44,93% e 44,60% respectivamente, com os resultados apresentados conclui-se que o solo mesmo constituindo-se de mistura da cal hidratada, a média ficou em 45% de limite de liquidez, característico de um solo siltoso segundo a tabela de classificação dos solos da HRB.

### 5.3.2 Limite de Plasticidade

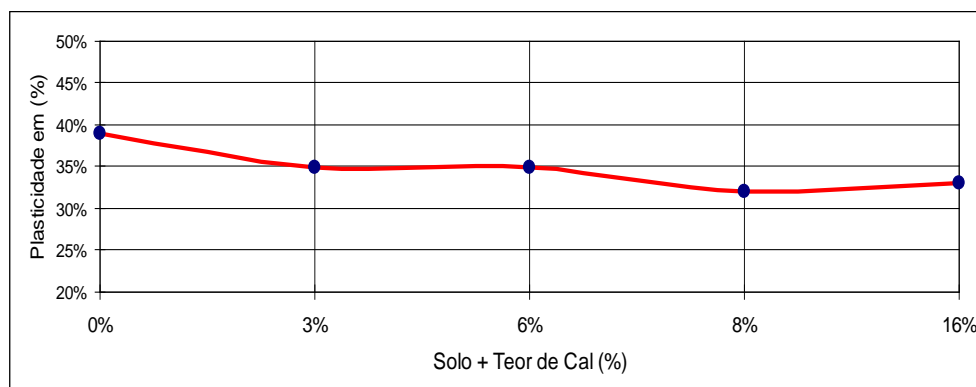
Para o limite de plasticidade do solo natural e suas adições da cal hidratada, foram realizados quatro ensaios por amostra de solo. Este ensaio foi realizado conforme preconiza a NBR 6459 (ABNT, 1984). A Tabela 10 apresenta o resumo dos valores obtidos com as amostras de solo, e suas respectivas adições de cal hidratada.

**Tabela 10 - Resultado dos ensaios de LP do solo com adição da cal**

Solo + Teor de Cal (%)	0 %	3 %	6 %	8 %	16 %
Umidade Média Parcial	39,28	35,46	35,25	32,71	33,34
Varição da Média (+5%)	41,24	37,24	37,01	34,34	35,01
Varição da Média (-5%)	37,31	33,69	33,49	31,07	31,67
Nova Umidade Média	38,58	35,24	35,16	32,44	33,47
Limite de Plasticidade (inteiro mais próximo %)	39	35	35	32	33

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se que o solo com 0% de cal apresentou um limite de plasticidade de 38,58%, já as adições com 3%, 6%, 8% e 16% apresentaram valores que correspondem a 35,24%; 35,16%; 32,44% e 33,47% respectivamente, em relação as misturas com a cal hidratada. A Figura 18 apresenta uma análise gráfica do resumo dos ensaios de limite de plasticidade.



**Figura 18 - Análise gráfica do LP do solo com adição da cal hidratada**

**Fonte: Autoria própria.**

Os resultados obtidos com a adição da cal hidratada apresentou uma média mais variada em relação ao solo natural, 34% com as respectivas adições e 38,6% sem misturas, reduzindo a plasticidade do solo em 10,53% com adição da cal hidratada nas porcentagens estabelecidas neste trabalho.

### 5.3.3 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade (IP) é o resultado dos ensaios apresentados dos limites de liquidez e dos limites de plasticidade do solo natural, bem como das suas respectivas adições da cal hidratada, sendo que os cálculos são: a diferença entre o limite de liquidez e o de plasticidade ( $IP = LL - LP$ ). A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e do índice de plasticidade.

**Tabela 11 - Resumo dos resultados dos ensaios de (LL), (LP) e do (IP)**

Solo + Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
LL (Limite de Liquidez) (%)	45	44	44	43	44
LP (Limite de Plasticidade) (%)	39	35	35	32	33
IP (Índice de Plasticidade) (%)	6	9	9	11	11

**Fonte: Autoria própria.**

O índice de plasticidade calculado para o solo com 0% de adição da cal hidratada é de 6%, os resultados das adições com 3%, 6%, 8% e 16% da cal são de: 9% de IP para as misturas com 3% e 6% e de 11% de IP para as misturas com 8% e 16% da cal. O resultado apresenta um solo pouco plástico para uma adição de 0% da cal, e de plasticidade média o solo com adições de 3%, 6%, 8% e 16% da cal hidratada, bem como para o IP e LL o solo natural e o solo com as respectivas adições é considerado como sendo um solo siltoso, segundo Vargas (1978), o qual faz referência à classificação dos solos em função dos IP e LL. A Tabela 12 apresenta a classificação dos solos tropicais em função dos limites de liquidez e índices de plasticidade.

**Tabela 12 - Classificação dos solos em função dos (IP) e (LL)**

Tipo de Solo	IP (%)	LL (%)
Arenoso	0 a 10	0 a 30
Siltoso	5 a 25	20 a 50
Argiloso	> 20	> 40
IP = 0	Não Plásticos	
1 < IP ≤ 7	Pouco Plásticos	
7 < IP ≤ 15	Plasticidade Média	
IP ≥ 15	Muito Plástico	

Fonte: Adaptado de Vargas, (1978).

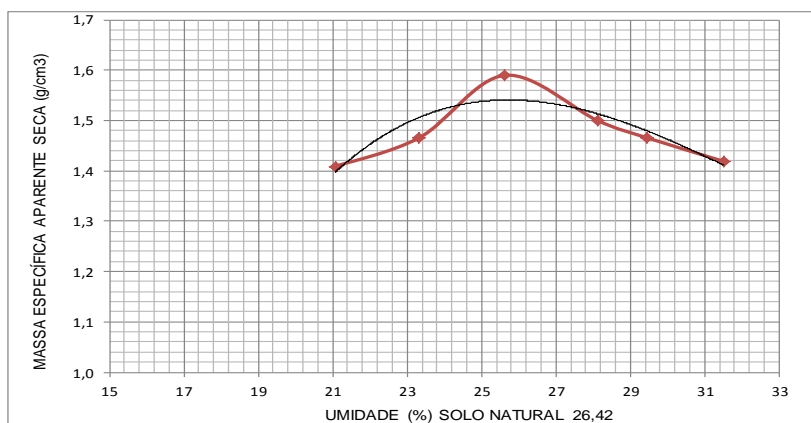
## 5.4 COMPACTAÇÃO

### 5.4.1 Curvas de Compactação

Primeiramente são apresentadas as curvas de compactação do solo natural e do solo com adição da cal hidratada nas quantidades de 3%, 6%, 8% e 16% respectivamente, foram moldados seis corpos de prova por porcentagem para se ter uma curva de compactação mais uniforme.

O ensaio foi realizado conforme preconiza a norma NBR 7182 (ABNT, 1986), com energia de compactação do proctor normal e molde cilíndrico pequeno.

Na curva de compactação do solo natural com energia normal a umidade ótima ficou em 26,42% e a massa específica aparente seca máxima igual a 1,515 g/cm<sup>3</sup>. A Figura 19 apresenta a curva de compactação do solo natural, com os respectivos valores de umidades ótimas, e das massas específicas aparentes secas máximas.



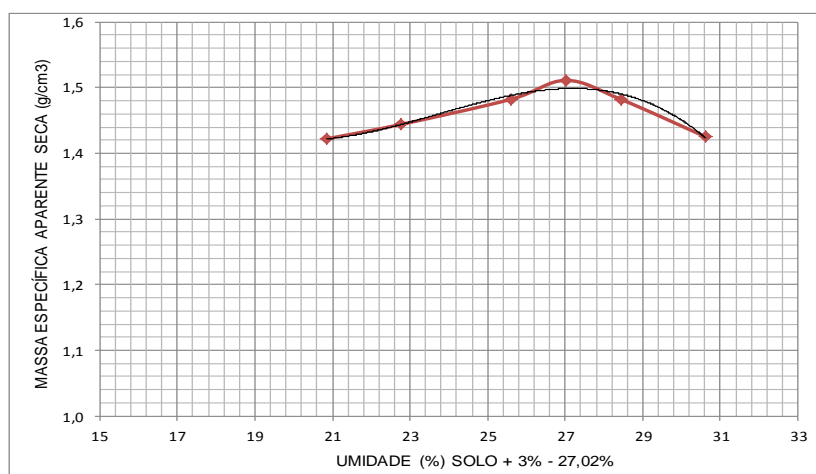
$\omega =$  21,07 23,33 25,63 28,12 29,44 31,51

$\gamma =$  1,409 1,466 1,590 1,500 1,466 1,419

**Figura 19 - Curva de compactação na energia normal solo natural**

**Fonte: Autoria própria.**

Para o solo com adição de 3% de cal hidratada, o valor da massa específica aparente seca máxima ficou em 1,510 g/cm<sup>3</sup>, e a umidade ótima em 27,02% para uma energia de compactação normal. A Figura 20 apresenta o gráfico da curva de compactação do solo com adição de 3% da cal hidratada.



$\omega =$  20,85 22,77 25,59 27,02 28,44 30,62

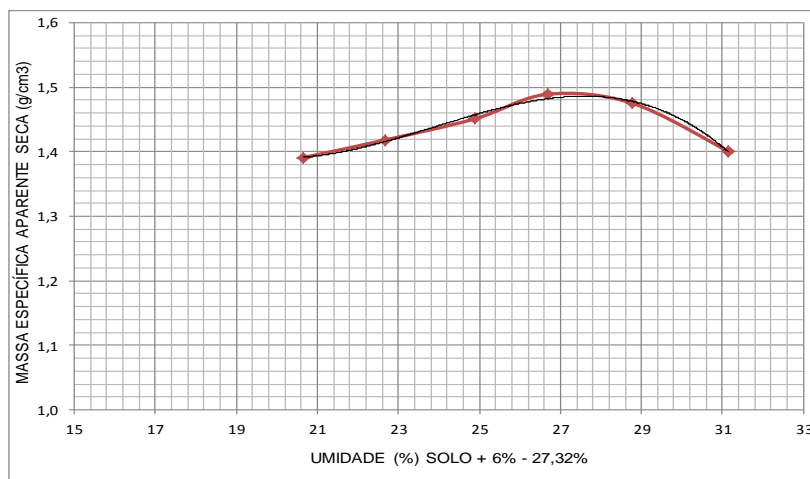
$\gamma =$  1,422 1,444 1,482 1,511 1,482 1,425

**Figura 20 - Curva de compactação na energia normal solo com 3% da cal**

**Fonte: Autoria própria.**

O solo com a adição de 6% de cal hidratada, o resultado da umidade ótima é de 27,32%, e a sua massa específica aparente seca máxima é de 1,491 g/cm<sup>3</sup>. A

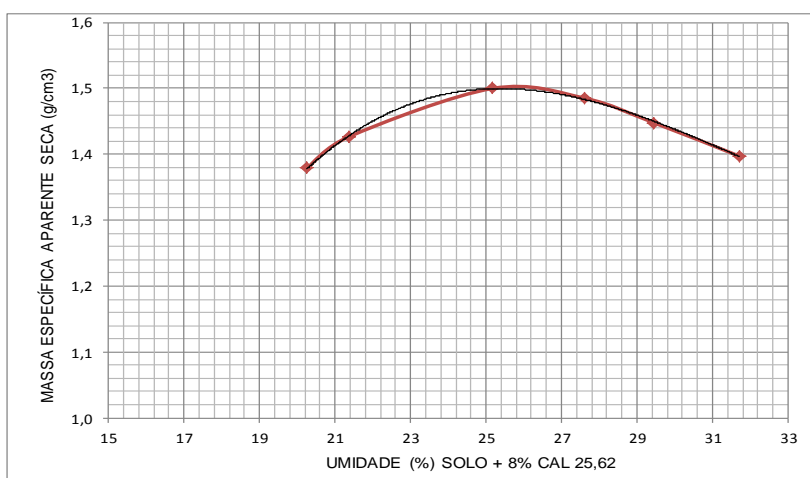
Figura 21 apresenta o resultado da curva de compactação do solo com 6% da cal hidratada, bem como os valores das massas específicas aparentes secas máximas.



$\omega =$  20,65 22,66 24,89 26,68 28,78 31,13  
 $Y =$  1,391 1,418 1,451 1,489 1,475 1,401

**Figura 21 - Curva de compactação na energia normal solo com 6% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

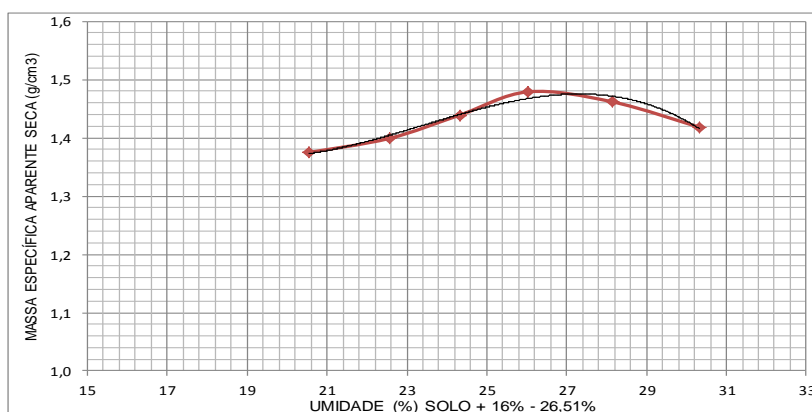
O solo com adição de 8% de cal hidratada em sua mistura, proporcionou uma umidade ótima de 25,62%, com isso a sua massa específica aparente seca máxima ficou em 1,509 g/cm³. A Figura 22 apresenta os pontos da curva de compactação do solo com 8% de cal hidratada na mistura.



$\omega =$  21,45 23,23 25,17 27,42 30,20 31,35  
 $Y =$  1,431 1,481 1,506 1,494 1,436 1,396

**Figura 22 - Curva de compactação na energia normal solo com 8% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para o solo com adição de 16% de cal hidratada os valores na representação da curva ótima de compactação foram de 26,51 para a umidade ótima e de 1,481 g/cm<sup>3</sup>, para a massa específica aparente seca máxima no ponto da curva. A Figura 23 apresenta a curva de compactação do solo com adição de 16% da cal hidratada e os valores dos seus respectivos pontos na curva.



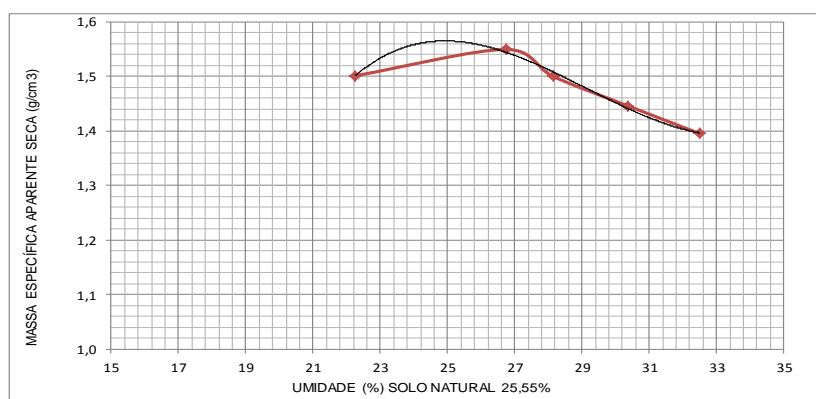
$\omega =$	20,55	22,56	24,32	26,04	28,13	30,33
$Y =$	1,375	1,399	1,439	1,479	1,462	1,418

**Figura 23 - Curva de compactação na energia normal solo com 16% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

As curvas de compactação do solo com as misturas nos teores da cal hidratada apresentam uma leve elevação no teor ótimo de umidade, em função do aumento do percentual da cal nas adições de 3% e de 6% em relação ao solo natural, com exceção da adição de 8% em que, neste ensaio a umidade ótima caiu em relação às demais adições, sendo causado por algum fator no tempo de mistura do material em relação ao tempo de execução da compactação da série, o mesmo ocorrendo com a massa específica nesta porcentagem, imprecisões intrínsecas ao ensaio, na adição de 16% em que a umidade ótima voltou a subir, mas a massa específica foi a menor de todas as massas calculadas nesta série de ensaios, o resumo dos valores dos ensaios está apresentado na Tabela 13.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados na energia de compactação do proctor intermediário, com o mesmo material de base e nas mesmas porcentagens estabelecidas, foram moldados cinco corpos de prova por série. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986), com energia de compactação do proctor intermediário, molde cilíndrico pequeno e soquete

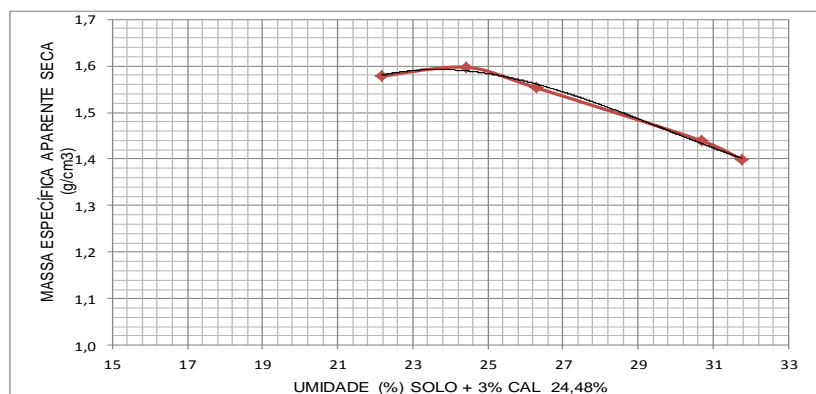
grande. Os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, na curva de compactação do solo sem adição da cal hidratada foram de 25,55% e 1,555 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A Figura 24 apresenta a curva de compactação do solo natural na energia de compactação intermediária.



$\omega =$	22,26	26,74	28,13	30,35	32,50
$Y =$	1,501	1,549	1,500	1,446	1,395

**Figura 24 - Curva de compactação na energia intermediária solo natural**  
**Fonte: Autoria própria.**

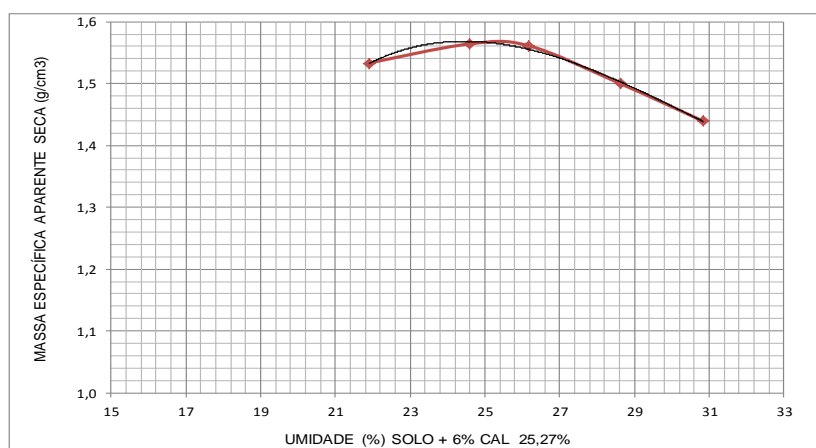
O solo com adição de 3% de cal hidratada para uma energia de compactação no proctor intermediário, o valor da massa específica aparente seca máxima é de 1,598 g/cm<sup>3</sup>, e a umidade ótima de 24,48%. A Figura 25 apresenta o gráfico da curva de compactação na energia intermediária do solo com adição de 3% da cal hidratada.



$\omega =$	22,19	24,43	26,29	30,70	31,77
$Y =$	1,578	1,597	1,553	1,439	1,398

**Figura 25 - Curva de compactação na energia intermediária solo 3% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

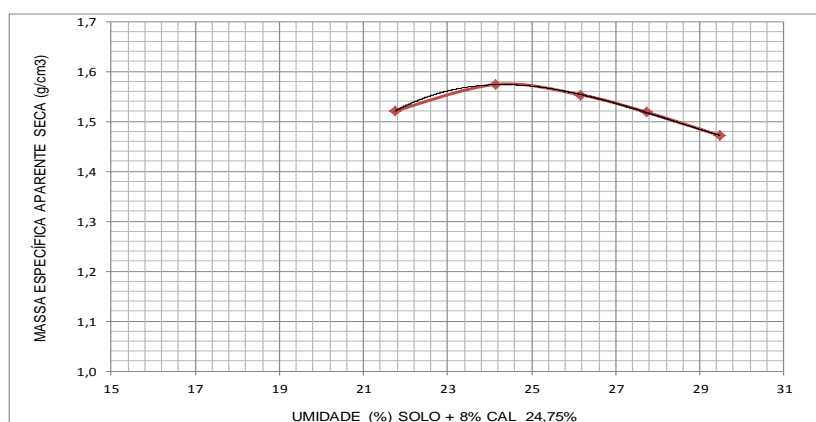
Para o solo misturado com 6% de cal hidratada o resultado do ensaio atingiu os seguintes valores; 25,27% para a umidade ótima e de 1,565 g/cm<sup>3</sup>, para a massa específica aparente seca máxima. A Figura 26 apresenta a curva de compactação do solo com adição de 6% da cal hidratada com os valores dos pontos na curva.



$\omega =$	21,89	24,58	26,18	28,62	30,85
$Y =$	1,533	1,564	1,561	1,500	1,439

**Figura 26 - Curva de compactação na energia intermediária solo 6% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

Já para a mistura de 8% da cal, a curva de compactação resultou nos seguintes valores de umidade ótima 24,75%, e de 1,578 g/cm<sup>3</sup>, para a massa específica aparente seca. A Figura 27 apresenta a curva de compactação do solo com adição de 8% da cal hidratada bem como os seus valores nos pontos da curva.

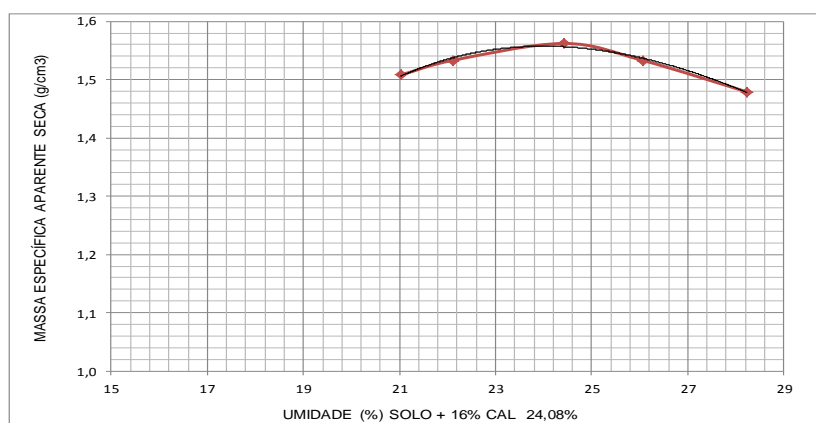


$\omega =$	21,76	24,15	26,17	27,75	29,47
$Y =$	1,521	1,574	1,553	1,518	1,472

**Figura 27 - Curva de compactação na energia intermediária solo 8% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**



E para o solo com adição de 16% de cal hidratada os valores na representação, na curva ótima de compactação do proctor intermediário foram de 1,561 g/cm<sup>3</sup>, para a massa específica aparente seca máxima e de 24,08% para a umidade ótima, em seu respectivo ponto de curva. A Figura 28 apresenta a curva de compactação do solo com adição de 16% da cal hidratada e os valores dos seus respectivos pontos na curva.



$\omega =$  21,03 22,11 24,42 26,06 28,23  
 $Y =$  1,508 1,533 1,562 1,533 1,479

**Figura 28 - Curva de compactação na energia intermediária solo 16% da cal**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 13 apresenta a relação teor de umidade x peso específico aparente seco máximo das amostras de solo, em relação às energias de compactação.

**Tabela 13 - Relação teor de umidade x peso específico aparente seco**

Medidas	Solo + adição para a energia normal de compactação				
	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
$\omega_{ót}$ (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53
$Y_d$ máx	1,515	1,510	1,491	1,509	1,481
Medidas	Solo + adição para a energia intermediária de compactação				
	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
$\omega_{ót}$ (%)	25,55	24,48	25,27	24,75	24,08
$Y_d$ máx	1,554	1,598	1,563	1,578	1,561

**Fonte: Autoria própria.**

A relação dos ensaios realizados com as energias de compactação normal e intermediária das amostras de solo natural, bem como as com adição da cal hidratada nas proporções já apresentadas demonstram claramente que, a alteração da energia de compactação gera mudanças nos teores de umidade, com menos água para preencher os vazios e lubrificar as partículas do solo, com isso é possível observar que na energia normal de compactação, e o solo com e sem as respectivas adições da cal, a umidade ótima máxima encontrada foi de 27,3% na adição de 6% da cal na mistura, e para a energia de compactação intermediária a máxima umidade ótima não passou de 25,5%.

O segundo fato apresentado, também com relação às energias de compactação é que o peso específico aparente seco máximo se eleva à medida que se reduz a umidade ótima, isso para a maioria das amostras apresentadas, sendo possível observar com a energia normal de compactação em 6% de adição da cal, a umidade ótima é 27,32% e a massa específica seca é 1,491 g/cm<sup>3</sup>, sendo que para a energia intermediária de compactação, a umidade ótima com 3% da cal é de 24,48%, e sua massa específica aparente seca máxima de 1,598 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.4.2 Classificação do solo

Pela classificação da HRB as amostras do solo natural, bem como as com adição da cal hidratada, são do tipo A2-5 esta classificação tem como constituintes usuais os pedregulhos e areias, argilosas ou siltosas, com predomínio arenoso avermelhado. Além disso, o subgrupo A2-5 inclui materiais constituídos, principalmente, de areia nas frações fina, média e grossa, (com ou sem aglutinante) de solo bem graduado, de baixa compressibilidade, com pedregulhos, com o índice de grupo (IG) igual a zero, limite de liquidez de no mínimo 41% e índice de plasticidade de no máximo 10%.

O solo com esta classificação é considerado de excelente a bom para uso em sub-base de pavimentação segundo a tabela de classificação da HRB e do manual de pavimentação do DNIT (2006), nesta mesma classificação o solo estudado é classificado também como sendo um solo arenoso fino.

Os solos definidos como orgânicos típicos da evolução de solos de clima tropical quente, normalmente com regime de chuvas moderadas a intensas,

possuem em sua fração a argila, constituída predominantemente de minérios caulíníficos, apresentando elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, os quais possuem uma cor avermelhada. Estes sais se encontram, geralmente, recobrando agregados de partículas argilosas, culminando em uma estrutura macroagregada. São considerados ainda pela literatura como solos argilosos de umidade ótima entre 25 e 30%, e sua massa específica aparente seca máxima entre 1,4 e 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

O que se confirma com os resultados dos ensaios apresentados do solo natural com as duas formas de energia, na energia de compactação normal a umidade ótima foi de 26,4% e massa específica aparente seca máxima de 1,515 g/cm<sup>3</sup>, sendo que para a energia de compactação intermediária a umidade ótima ficou em 25,5% e a massa específica aparente seca máxima de 1,555 g/cm<sup>3</sup>.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

### 5.5.1 Análise do pH dos Materiais

A análise dos materiais utilizados para a confecção das amostras, tanto para o ensaio de CBR como para o de RCS, foi de quatro amostras por material, obtendo-se desta forma uma média do pH de cada uma das amostras ensaiadas. A dosagem da mistura solo-cal foi realizada como descrito anteriormente no item 4.3.9.1, baseando-se no método preconizado por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), também conhecido como método do pH.

O método propõe que o menor teor da cal que proporcione um valor de pH de 12,4 é o suficiente para estabilizar o solo, foram utilizados teores crescentes da cal hidratada de 3, 6, 8 e 16% da cal em relação ao peso do solo seco, para assim ser determinado os valores de pH para as amostras. Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 14 e Figura 29.

Ainda com referência a Tabela 14, os valores de pH apresentam uma evolução na medida em que se acrescenta proporções a mais da cal hidratada na mistura, mas mesmo assim pode-se perceber que nenhum dos valores de pH obtidos com as misturas chegou ao valor de 12,4, especificado pelo método de

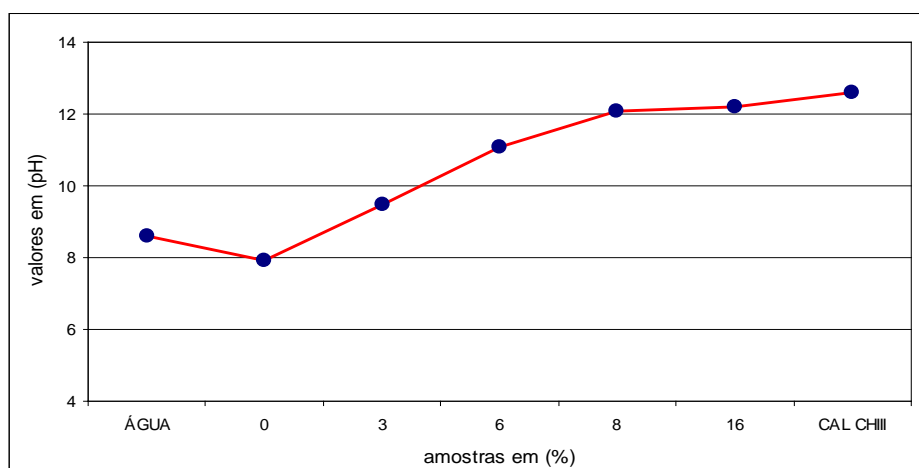
Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), como sendo o valor que determinaria o teor ótimo da cal correspondente as amostras analisadas

**Tabela 14 - Resultado do ensaio de pH das amostras**

Solo + Teor da Cal	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média dos pHs
0%	7,9	7,8	8,0	7,9	7,9
3%	9,4	9,5	9,6	9,5	9,5
6%	11,1	11,0	11,3	11,1	11,1
8%	12,1	12,0	12,1	12,1	12,1
16%	12,3	12,2	12,2	12,1	12,2
Cal Pura (CHIII)	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5
Água	8,7	8,6	8,7	8,6	8,6

**Fonte: Autoria própria.**

Nesta análise, verificou-se que todas as misturas de solo-cal ensaiadas apresentaram valores elevados de pH, em relação ao solo natural que se fixou em 7,9 elevando-se para 9,5 de pH com 3% de adição da cal, 11,1 de pH acrescentando 6% de cal na mistura, 12,1 de pH com 8% da cal sobre o solo e 12,2 de pH com 16% de cal hidratada no solo. A Figura 29 apresenta um gráfico da evolução das amostras de solo com as respectivas adições da cal hidratada.



**Figura 29 - Análise do pH das amostras**

**Fonte: Autoria própria.**

Segundo Little (1999), um valor elevado de pH favorece em um primeiro momento, ao desenvolvimento das reações de troca de cátions e floculação,

responsáveis pela melhoria da trabalhabilidade das misturas de solo-cal. Ainda segundo o autor a permanência de um valor elevado de pH beneficia a ocorrência das reações pozolânicas, responsáveis pelo ganho de resistência das misturas ao longo do tempo de cura. Com os valores apresentados de pH nas porcentagem definidas, não se pode à luz deste método, determinar com clareza o valor ótimo da cal a ser empregado para estabilização do solo.

Contudo, este é apenas um método empírico e os valores de pH apresentados são significativos para as porcentagens aqui definidas, podendo ser comprovado através dos resultados dos ensaios de RCS e CBR.

## 5.6 CBR E EXPANSÃO

Os ensaios de CBR ou Índice de Suporte Califórnia - ISC e Expansão, com solo natural e nos teores de 3, 6, 8 e 16% da cal hidratada na mistura em peso seco do material, com o intuito de verificar os reais incrementos nos valores da capacidade de suporte ocorridos após a adição da cal ao solo. Foram moldados dois corpos de prova por amostra de material, para assim se ter uma média mais precisa do ensaio, sendo que para isso foi utilizada a energia de compactação intermediária seguindo as recomendações do ME-049 (DNER, 1994) e NBR 9895 (ABNT, 1987).

### 5.6.1 Expansão

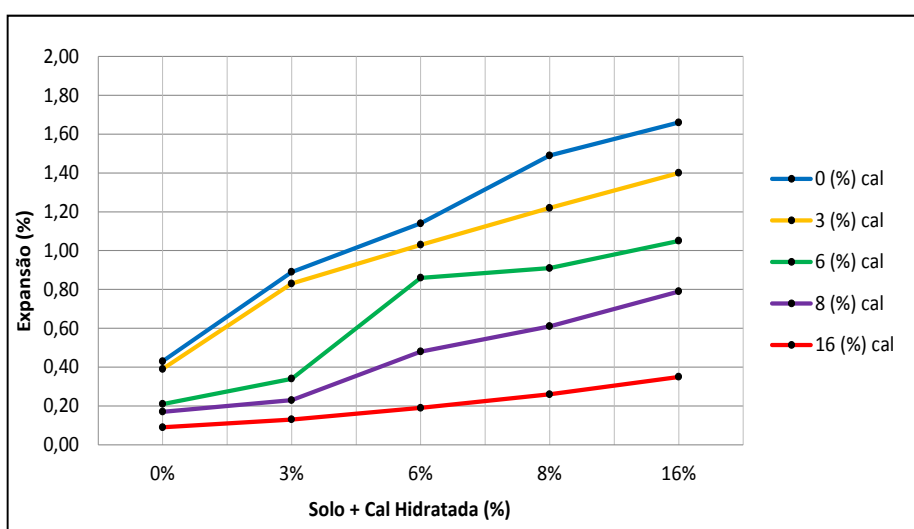
A Tabela 15 apresenta os valores médios do ensaio de expansão do solo natural e do solo com adição da cal hidratada.

**Tabela 15 - Resultado do ensaio de Expansão**

Solo + Cal	Expansão (%)
0 (%)	1,66
3 (%)	1,40
6 (%)	1,05
8 (%)	0,79
16 (%)	0,35

**Fonte: Autoria própria.**

Com relação aos valores de expansão, observa-se que esta reduz significativamente após a adição da cal, nos teores de 6, 8 e 16% com 1,05; 0,79 e 0,35% respectivamente. O resultado obtido com o ensaio de expansão apresentou apenas a amostra com adição de 16% da cal aceita como parâmetro especificado pelo DNIT (2006), para sub-base e base ( $\leq 0,5\%$ ) o que, levando-se em conta apenas este parâmetro, permitiria apenas esta porcentagem da cal para o uso nas camadas especificadas. A Figura 30 apresenta o gráfico com os ensaios de expansão realizados com as amostras de solo-cal.



**Figura 30 - Gráfico do ensaio de expansão das amostras de solo-cal**

Fonte: Autoria própria.

### 5.6.2 CBR

Os resultados de CBR para as amostras de solo natural e de solo com as respectivas adições da cal hidratada encontram-se resumidos na Tabela 16, com os respectivos parâmetros de penetração.

**Tabela 16 - Resultado dos ensaios de CBR das amostras de solo-cal**

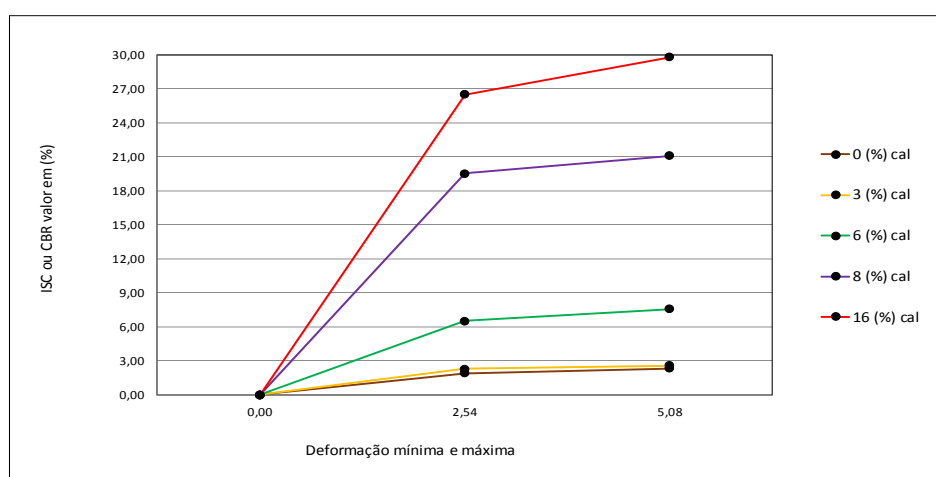
Penetração	Solo + 0% cal	Solo + 3% cal	Solo + 6% cal	Solo + 8% cal	Solo + 16% cal
2,54 (mm)	1,89 (%)	2,27 (%)	6,50 (%)	19,51 (%)	26,47 (%)
5,08 (mm)	2,32 (%)	2,57 (%)	7,56 (%)	21,07 (%)	29,80 (%)
CBR (%)	2,32 (%)	2,57 (%)	7,56 (%)	21,07 (%)	29,80 (%)

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os valores dos resultados apresentados na Tabela 16, pode-se concluir que para a amostra do solo natural o valor do CBR na penetração de 2,54 mm, foi de 1,89% e para a penetração de 5,08 mm o valor foi de 2,32%, sabendo-se que para todos os valores de aceitação do CBR apresentados na Tabela 16, seus resultados finais são em relação a penetração na faixa de 5,08 mm.

O solo com 3% da mistura mostrou 2,57% do CBR, valor este 11% superior ao do solo natural, já para a adição de 6% da cal o valor do CBR é de 7,56%, um acréscimo de 226% em relação ao valor obtido com a amostra de solo natural. Para 8% de adição da cal hidratada no solo seu CBR medido foi de 21,07% uma elevação de 908% com relação ao CBR do solo natural. Para o solo com 16% de adição da cal hidratada o valor atingido do CBR é de 29,80%, valor este 1285% superior ao do solo sem adição da cal hidratada.

Considerando os parâmetros mínimos exigidos pelo DNIT (2006), apenas as adições de 8% e 16% da cal hidratada em pó na mistura do solo são aceitas para a execução de sub-base de pavimentação. A Figura 31 apresenta em escala gráfica o resumo do ensaio de CBR com as amostras de solo-cal.



**Figura 31 - Resultado do ensaio de CBR**

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o DNIT (2006), os valores mínimos de CBR e expansão exigidos para os materiais utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentação rodoviária, são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17 - Especificações do DNIT para CBR e expansão**

Especificações mínimas de aceite do CBR e expansão pelo DNIT		
Camada	CBR (%)	Expansão (%)
Sub-Base	≥ 20	≤ 1,0
Base	≥ 60	≤ 0,5

Fonte: DNIT, (2006).

Contudo, analisando todos os resultados apresentados das amostras de solo com as respectivas adições da cal hidratada, percebe-se que os mesmos não são suficientes ao uso em camadas de base de rodovias, ficando condicionado a um processo de estabilização que venha a melhorar as propriedades físico-químicas das misturas, possibilitando assim ser utilizado como base a fim de possibilitar o seu enquadramento nas especificações exigidas pelo DNIT (2006). A Tabela 18 apresenta os valores dos ensaios de CBR, realizados com as amostras de solo-cal em relação à penetração.

**Tabela 18 - Ensaio de CBR das amostras em relação à penetração, tensão em (MPa)**

Penetração (mm)	0% de cal	3% de cal	6% de cal	8% de cal	16% de cal
2,54	0,130	0,157	0,417	1,195	1,790
5,08	0,245	0,266	0,762	2,119	3,058

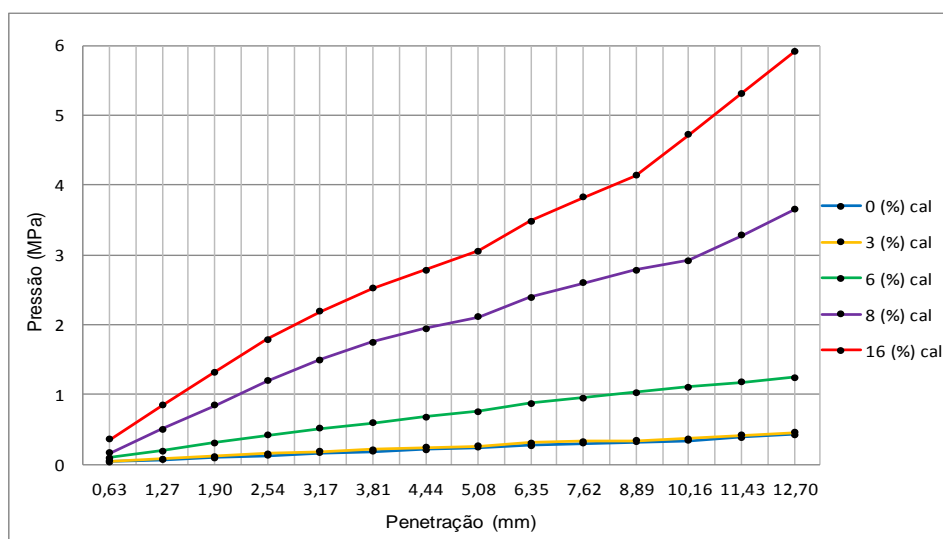
Fonte: Autoria própria.

Ainda com relação ao ensaio de CBR as amostras de solo com as respectivas adições da cal hidratada, proporcionaram um aumento linear na resistência à penetração do pistão sobre a amostra de solo-cal nas adições de 8 e 16%, sendo menores com as adições de 3 e 6%.

Para uma adição de 16% da cal com uma penetração de 5,08 mm a amostra suportou 3,06 MPa de pressão, já para 8% de mistura e com a mesma penetração a amostra resistiu 2,12 MPa de pressão.

Com 6% de adição da cal a amostra de solo obteve 0,76 MPa de pressão em 5,08 mm de penetração, e com 3% da cal como mistura sua resistência a penetração em 5,08 mm foi de 0,27 MPa, uma diferença mínima, se comparado ao valor do ensaio solo natural que apresentou 0,24 MPa de pressão. A Figura 32 apresenta o gráfico da correlação penetração (mm) x pressão (MPa).





**Figura 32 - Gráfico de correlação resistência à penetração (MPa) x pressão (mm)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as curvas de pressão-penetração resultantes dos ensaios devem possuir um primeiro trecho praticamente retilíneo, característico da fase elástica, seguido de um trecho curvo, característico da fase plástica.

Apesar de não existir uma boa correlação entre os resultados de ensaios de CBR e expansão, sabe-se que há uma tendência de aumento de CBR com a diminuição da expansão axial. Por este motivo, a expansão é empregada como fator limitante no dimensionamento de pavimentos. Solos que apresentam valores significativos de expansão no ensaio de CBR sofrem deformações consideráveis ao serem solicitados (BERNUCCI *et al.* 2008).

## 5.7 RESISTÊNCIA

Os ensaios realizados para se obter a resistência à compressão simples do solo natural, e do solo com as suas respectivas adições da cal hidratada, observando as duas séries de amostras, uma com 100 corpos de prova moldados na energia de compactação do proctor normal, com os tempos de cura seguindo-se de 0, 7, 14, 28 e 56 dias, e uma segunda série com 80 corpos de prova moldados na energia de compactação do proctor intermediário, com os períodos de cura em 0, 7, 14, e 28 dias. Nas duas séries de ensaios realizados os corpos de prova ao serem

retirados da câmara úmida não permaneceram imersos em água quatro horas antes de serem rompidos.

### 5.7.1 Resistência à Compressão Simples

#### 5.7.1.1 RCS para a série do proctor normal

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples realizado com o solo natural, bem como com as misturas pré-estabelecidas em porcentagens da cal hidratada em pó, apresentam-se descritos na Tabela 19.

**Tabela 19 - Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação normal**

Solo + Cal (%)	Ensaio de RCS em (MPa)				
	0 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
0 (%)	0,140	0,135	0,163	0,158	0,158
3 (%)	0,153	0,168	0,185	0,208	0,223
6 (%)	0,163	0,440	0,525	0,570	0,573
8 (%)	0,223	0,870	0,988	1,060	1,145
16 (%)	0,218	1,130	1,613	2,370	2,858

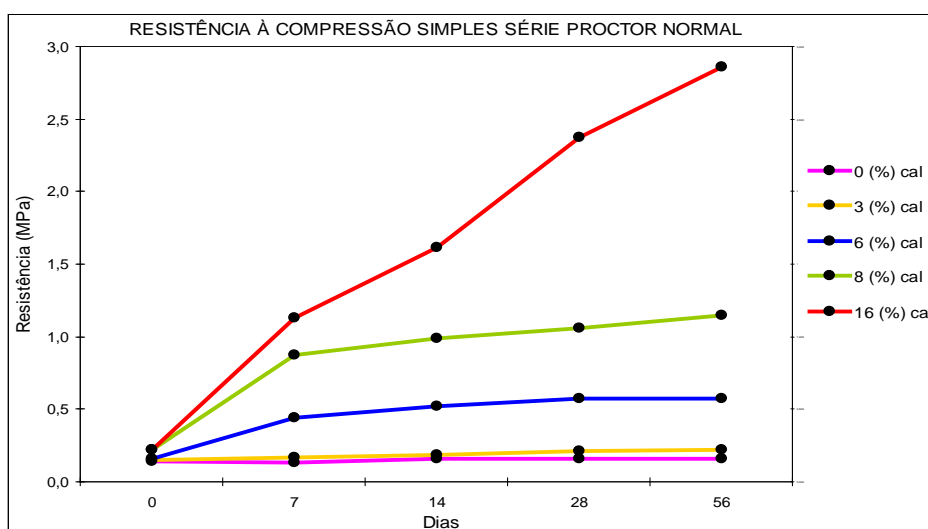
**Fonte: Autoria própria.**

Os valores de RCS das amostras de solo-cal em função do tempo de cura e do teor de cal, apresentam resultados crescentes de resistência em função da quantidade de material na mistura, pois o período de 56 dias não foi relevante para o acréscimo de resistência do solo natural e para a adição de 6% da cal, tendo uma pequena elevação de resistência a quantidade de 3% de mistura elevando-se 10% a mais seu resultado aos 56 dias, apenas a quantidade de 16% de adição da cal fez com que aos 56 dias a sua resistência superasse 20% do valor em relação aos 28 dias de cura.

Com relação à influência do tempo de cura das amostras de solo-cal, podemos observar que os resultados demonstram um aumento para todas as amostras constituídas por adições da cal hidratada. Para os percentuais de 0, 3, 6, 8 e 16%, os resultados apresentados para a RCS no primeiro dia foram de 0,14; 0,15; 0,16; 0,22 e 0,22 MPa, respectivamente, já para o período de sete dias de cura os

valores foram de 0,13; 0,17; 0,44; 0,87 e 1,13 MPa para as adições de 0, 3, 6, 8 e 16%. Aos quatorze dias de cura para as misturas de 0, 3, 6, 8 e 16% da cal, os valores foram de 0,16; 0,18; 0,52; 0,99 e 1,61 MPa respectivamente.

Em termos de resistência à compressão simples, para a energia de compactação normal somente a adição de 16% da cal foi significativa para os períodos compreendidos de 14 e 28 dias, com resultados apresentados de 1,61 MPa e 2,37 MPa respectivamente, um aumento de resistência 48% maior sobre o período de cura de quatorze dias a mais. A Figura 33 apresenta graficamente a correlação da evolução da resistência à compressão simples da série proctor normal pelo período de cura das amostras de solo-cal.



**Figura 33 - Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência**  
**Fonte: Autoria própria.**

Com base nos resultados de RCS apresentados na Figura 33, observa-se que as amostras de solo tratadas com cal hidratada (CHIII) em pó, apresentaram de um modo geral ganhos de resistência com o aumento dos períodos de cura. Contudo, verificou-se que a mistura de solo com 3% de adição da cal alcançou apenas 32% a mais no valor da resistência aos 28 dias, em relação ao solo natural com o mesmo período de cura entre as amostras analisadas, o que se diferencia da mistura de 6% da cal que no mesmo período de cura, obteve 261% a mais de RCS em relação ao solo com 0% de adição.

#### 5.7.1.2 RCS para a série do proctor intermediário

A série de ensaios para a obtenção da resistência à compressão simples, realizada com a energia de compactação do proctor intermediário se encontra resumida na Tabela 20, esta tabela apresenta o tempo de cura das amostras nos períodos de 0, 7, 14 e 28 dias, período este definido anteriormente por esta série, pois este período está relacionado com a determinação de serviço da norma de pavimentação ES-141 (DNIT, 2010), ressaltando ainda que as amostras não permaneceram imersas em água pelo período de quatro horas, antes de sua ruptura, como o recomendado pelas NBR 12024 (ABNT, 1990) e NBR 12025 (ABNT, 1990), pois se trata de corpos de prova com dimensões reduzidas.

Se as amostras forem mergulhadas em água no período relacionado haverá sucção ou absorção de água pelas amostras, com isso parte de sua umidade será modificada ou deverá ser alterada pelo material, assim o ensaio de RCS em relação à umidade ótima perderá sua precisão em relação ao material ensaiado, pois pretende-se com o ensaio laboratorial criar a condição ideal a de campo, em relação as amostras de tamanho reduzido.

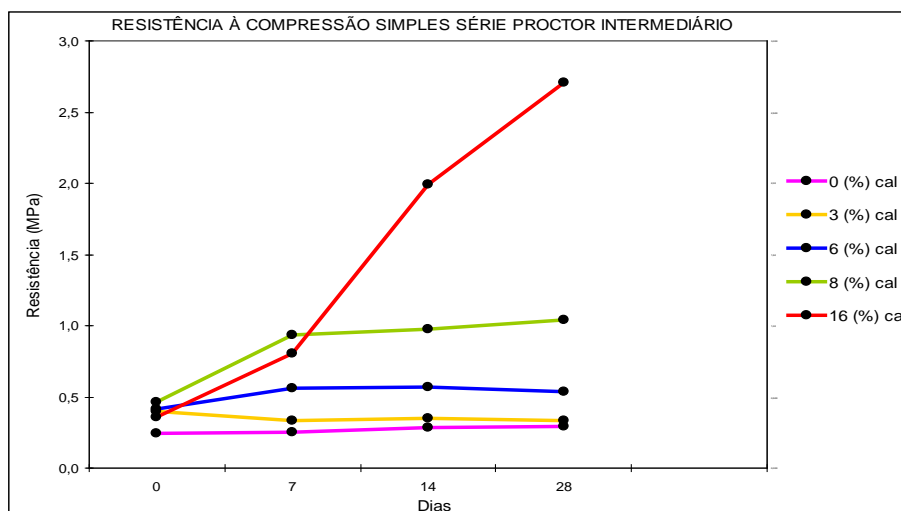
**Tabela 20 - Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação intermediária**

Solo + Cal (%)	Ensaio de RCS em (MPa)			
	0 dia	7 dias	14 dias	28 dias
-	0,243	0,255	0,283	0,295
0 (%)	0,395	0,335	0,353	0,333
3 (%)	0,418	0,563	0,573	0,540
6 (%)	0,460	0,938	0,978	1,043
8 (%)	0,355	0,805	1,988	2,708
16 (%)				

**Fonte: Autoria própria.**

O maior valor médio de RCS foi de 2,71 MPa, obtidos pela adição de 16% da cal hidratada, isso aos 28 dias de idade. Os maiores valores de resistência à compressão simples do solo sem e com adição da cal, tomando como base o mesmo período de cura foram de 0,29 MPa, 0,33 MPa, 0,54 MPa e 1,04 MPa, para as porcentagens de 0, 3, 6 e 8% da cal respectivamente.

A Figura 34 apresenta uma análise gráfica relacionando o tempo de cura das amostras com a RCS.



**Figura 34 - Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência**  
**Fonte: Autoria própria.**

A RCS com adição de 8% da cal no primeiro dia e aos sete dias de cura, foi superior ao da adição de 16%, saindo de 0,46 MPa no primeiro dia e alcançando 0,94 MPa aos sete dias de cura, sendo que com 16% do material como mistura os resultados foram de 0,35 MPa e 0,80 MPa, para os mesmos prazos respectivamente. Contudo nos períodos de 14 e 28 dias esta mesma série de corpos-de-prova, apresentaram uma inversão nos resultados com relação ao percentual de 8% de cal, sendo observado com os resultados de 0,98 MPa e 1,04 MPa para os períodos compreendidos de 14 e 28 dias respectivamente para adição de 8% da cal, já para 16% da cal esses valores atingiram 1,99 MPa e 2,71 MPa, para os respectivos períodos de cura.

Os dados apresentados nas duas séries de ensaios desenvolvidos para a resistência à compressão simples representam, tanto para o tempo de cura quanto para as porcentagens a partir de 8% de adição da cal hidratada sobre o solo, um aumento médio considerável satisfatório para aplicação prática deste material em sub-base de pavimentação, com percentuais de ganho em resistência acima de 250% sobre o solo natural, podendo atingir mais de 800% de resistência aos 28 dias de cura com adição de 16% da cal hidratada sobre o solo.

Fato confirmado por diversos autores de trabalhos relacionados com o uso da cal hidratada para estabilização de solo, Dalla Rosa (2009), que estudou um solo residual de arenito da formação Botucatu no estado do Rio Grande do Sul, relata em sua pesquisa que a RCS de uma mistura de solo-cal aumenta linearmente com o

aumento da quantidade da cal. A autora defende ainda que pequenas adições da cal são suficientes para gerar ganhos de resistência e, elevando-se a quantidade da cal de 3% a 9%, sua RCS cresce em média 55%.

Destaca-se que o DER/PR, especifica para o emprego de bases e sub-bases de pavimentações, os seguintes limites: quando sua resistência à compressão simples for superior a 1,2 MPa este material poderá ser utilizado como sub-base, a partir de 1,7 MPa este solo pode ser utilizado como base para pavimentação.

Para o DNIT nas especificações IPR-719 (DNIT, 2006) e ES-143 (DNIT, 2010), o solo estabilizado para uso em camadas de bases de pavimentos deve apresentar resistência mínima de compressão de 2,1 MPa isso aos sete dias de cura do material, neste caso o DNIT exerce uma normatização específica federal para uso de fiscalização no aceite de pavimentações de âmbito rodoviário, com uma carga de tráfego entre alta e média, e veículos normalmente com sobrepeso em seus eixos.

Para tanto a norma do DER/PR quanto à especificação do DNIT, as quais fazem referência à utilização da cal para estabilização de base e sub-base de pavimentação rodoviária, pode-se afirmar a partir dos resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão simples, para as duas energias de compactação simples e intermediária analisadas, e para um período de cura do material de pelo menos 28 dias, se faz necessário uma quantidade de 16% da cal hidratada CHIII em pó como mistura ao solo sedimentar analisado, apresentando assim as características de estabilização necessária para aplicação em camadas de sub-base e de base de pavimentação.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

São apresentadas neste capítulo, as principais conclusões deste trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas, com o objetivo de complementar as análises efetuadas nos estudos da aplicação da cal hidratada em pó, em materiais de sub-base e base para uso em pavimentação urbana.

### 6.1 CONCLUSÕES

Como conclusões gerais, os estudos realizados com o solo sedimentar da região de Curitiba misturado à cal hidratada, do tipo CH-III em pó, apontam para a possibilidade de uso deste material como sub-base para aplicação na pavimentação rodoviária, e uma alternativa como base e sub-base de pavimentação urbana. Verificou-se, também, a importância da estabilização deste solo através da adição da cal hidratada, uma vez que a adição deste material melhora as propriedades mecânicas, estruturais e de trabalhabilidade da mistura com o solo estudado.

A análise granulométrica do solo natural sedimentar apresentou através da amostra de solo uma classificação considerada como sendo de uma areia, sendo que 19% de areia fina verificando a existência de frações siltosas e argilosas com uma uniformidade entre estas duas frações, com uma diferença de apenas 3% entre ambas. A massa específica para este tipo de solo sedimentar ficou em  $2,616 \text{ g/cm}^3$ , confirmando assim a sua classificação considerada como sendo uma areia para a classe dos solos comuns.

Os limites de liquidez e limites de plasticidade diminuíram com a incorporação da cal hidratada, em todas as porcentagens analisadas. Uma média de queda de 5% em relação ao solo natural para o limite de liquidez, e de 22% de redução em média para o limite de plasticidade, ficando o índice de plasticidade do solo natural em 6%, em 9% para as adições de 3 e 6% da cal, e de 11% de índice de plasticidade nas misturas de 8 e 16% da cal sobre o solo.

Em relação aos valores obtidos nos ensaios de CBR as amostras de solo-cal que atingiram o valor mínimo de 20% de CBR estabelecido por norma foram as

amostras com adição de 8% da cal atingindo um CBR de 21%, e para a adição com 16% da cal o CBR ficou em 30%. Em nenhuma das adições da cal hidratada ou mesmo o solo natural foi possível atingir os valores mínimos de 60% de CBR para compor camadas de base para pavimentação rodoviária.

Todas as amostras de solo estabilizado pela cal hidratada apresentaram resultados de resistência à compressão simples, superiores aos obtidos pelo solo natural compactado tanto pela energia normal quanto pela energia intermediária. Entre as misturas, as amostras com 16% da cal obtiveram os melhores resultados de resistência, sendo de 2,71 MPa, aos 28 dias de cura, com a energia intermediária, e de 2,37 MPa com a energia normal, no mesmo período.

O comportamento apresentado pelas misturas com 3 e 6% da cal, permite concluir que houve uma estabilização na resistência entre os períodos de cura de 7 e 28 dias, na energia de compactação intermediária, e mantiveram-se estáveis entre 14 e 56 dias, na energia normal de compactação, demonstrando assim que a quantidade da cal hidratada adicionada como aditivo para a estabilização do solo, está relacionada diretamente com o período de cura do material bem como o valor do pH e seu efetivo aumento na resistência à compressão simples.

A presente pesquisa também poderá influenciar na utilização deste material como estrutura básica de pavimentação, uma vez que, pelos resultados dos ensaios, percebe-se uma melhora no comportamento mecânico e estrutural deste solo com adição da cal hidratada em pó.

As conclusões em relação ao estudo que foi elaborado, teve inicialmente como diferenciais os tipos de técnicas utilizadas, os materiais empregados, os teores de cal hidratada incorporada ao solo e, principalmente, as condições de ensaio, posto que fica evidente o conhecimento do comportamento dos materiais quando se comparam as variações das técnicas de ensaio.

Através das análises dos ensaios realizados, pode-se concluir que pequenas adições da cal hidratada sobre o solo permitem a melhora gradativa de sua estabilização, tanto no quesito sub-base como para base de pavimentos. Em face aos problemas constantes verificados em grande parte da malha rodoviária do país, e na grande quantidade de arruamentos com anti-pó verificados na cidade de Curitiba, vale a alternativa de buscar a utilização dos materiais existentes no local, melhorando-os a fim estarem propícios às estruturas de pavimentos.



É importante também verificar todas as alternativas de materiais, com o intuito de minimizar os impactos ambientais e proceder ao dimensionamento contemplando a mecânica dos pavimentos, mesmo demandando maiores espessuras das camadas estruturais destes pavimentos.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS E COMENTÁRIOS FINAIS

Como foi descrito no capítulo anterior, os resultados de resistência à compressão simples obtidos das misturas de solo com a cal hidratada, bem como o seu melhor desempenho sob condições de laboratório, justificam não só um estudo mais completo da inclusão deste aditivo químico, como o estudo da inclusão de outros aditivos de baixo custo.

É claro que se por um lado a resposta destas misturas foi positiva, por outro lado, nada indica que a adição deste material em diferentes teores maiores que 16% não produzam ainda melhores resultados ao nível da resistência mecânica e da sensibilidade à água.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, e também com os resultados divulgados na literatura, tudo indica que o teor da cal hidratada em pó misturada ao solo sedimentar na proporção máxima de 16% não conduz ainda à resistência máxima destas misturas. Ou seja, a resistência aumenta com o aumento do teor de cal hidratada, mas apenas até um determinado valor limite. Seria interessante conhecer, para o solo estudado, qual a quantidade da cal hidratada em pó, que conduziria ao valor máximo de resistência, para ser utilizado como sub-base de pavimentos.

Os teores da cal hidratada em pasta nas misturas do solo sedimentar estudado constituem ainda outra questão cujo desenvolvimento poderá revelar-se bem interessante, assim como a energia de compactação modificada.

Outra vertente a explorar poderá ser o efeito do melhoramento das condições de cura, através do aumento do tempo do período de cura. A margem de progressão da resistência de todas as misturas parece ser ainda considerável, podendo, inclusive, admitir a hipótese do próprio período de indução, anterior à fase dos 56 dias de evolução da resistência à compressão simples, considerada nos resultados dos ensaios realizados como a mais produtiva em termos de resistência.

Alguns ensaios adicionais como o cisalhamento direto, a tração, a permeabilidade pelo método do mini-MCT e a análise estatística para encontrar a significância de um teor da mistura para outro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO - M-145**: 1973.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2487**: Rio de Janeiro, RJ. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**: cal virgem para construção civil - requisitos, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, RJ. 1986. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: solo - determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ. 1984. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6473**: cal virgem e cal hidratada - análise química, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 31 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: rochas e solos - comitê brasileiro de construção civil. S.I. Rio de Janeiro, RJ. 1995. 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ. 1984. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas - requisitos, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo - determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ. 1988. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo - análise granulométrica, Rio de Janeiro, RJ. 1988. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: solo - ensaio de compactação, Rio de Janeiro, RJ. 1986. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação - comitê brasileiro de construção civil. S.I. Rio de Janeiro, RJ. 1982. 3 p. (cancelada em 26 de setembro de 2014, sem substituição).

\_\_\_\_\_. **NBR 9895**: solo - índice de suporte califórnia. Rio de Janeiro, RJ. 1987. 14 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12024**: solo-cimento - moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ. 1990a. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025**: solo-cimento - ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, RJ. 1990. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12770**: solo coesivo - determinação da resistência à compressão não confinada, Rio de Janeiro, RJ. 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. **ABPC** - São Paulo, SP. 2008. Acessado em 27 de novembro de 2013. [www.abpc.org.br/frame.htm](http://www.abpc.org.br/frame.htm)

ARAÚJO, A. F.; BARROSO, S. H. A.; RABÊLO, A. N.; VASCONCELOS, M. A. G. **O uso da técnica de solo-cal para melhoramento das propriedades tecnológicas de um solo da região do baixo Jaguaribe no Estado do Ceará.** Artigo, Cobramseg. Búzios, RJ. 2008.

AZEVEDO, A. L. C.; OLIVEIRA, A. JR.; PEDROSA, R. A.; RAMALHO, R. W. **Estabilização de solos com adição de cal.** Dissertação de Pós Graduação, IPC/PUC. Belo Horizonte, BH. 1998. 78 p.

AZEVEDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP. Escola de Minas, NUGEO. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 2010. 114 p.

BATISTA, L. C. M. **Determinação de parâmetros de deformabilidade de camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília - Unb, Brasília, DF. 2007. 182 p.

BLIGHT, G. E.; LEONG, E. C. Origin and Formation of Residual Soils. In, **Mechanics of Residual Soils.** Ed. CRC press/Balkema. 2 ed. Isbn 978-0-415-62120-5, Rotterdam. 2012. 357 p.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos rodoviários.** Ed. Almedina. 2 ed. Coimbra, Portugal. 2008. 388 p.

BRANDÃO FILHO, J. E.; CORREIA, J. A. B.; JÚNIOR, E. F. N. **Análise da estabilização com cal de solos do município de Limoeiro do Norte, Estado do Ceará.** In: 33º Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, Associação Brasileira de Pavimentação. Anais. Florianópolis, SC. 2001.

BRANDÃO, D. M.; LEITE, A. F.; JACINTHO, E. C.; GUIMARÃES, R. C. **Análise da mistura solo cal emulsão para fins de pavimentação rodoviária.** I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, 2009.

BERNUCCI, L. B; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro, 2008.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba, São Paulo, SP. 1997. 132 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas.** (Boletim Técnico, 106 Edição Revista e Atualizada). Instituto Agrônomo, Campinas, SP. 2009. 77 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **CEN** - 1990.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2007. 136 p.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2008. 151p.

CURITIBA, PR. GOV. <http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/211-ruas-tiveram-pavimentacao-recuperada-esta-semana/> acesso em 23/11/2014.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS. 2009. 177 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** Tradução da 6ª ed. norte-americana, Ed. Thomson Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2007. 562 p.

DER/PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. **Pavimentação: Solo-Cal-Cimento.** Especificações de Serviços Rodoviários, ES-P 14/05. Curitiba, PR. 2005. 14 p.

DIAS, C. R. C. **Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civi, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2004. 127 p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes. **Solos – Determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** DNER-ME 049. 1994. 14 p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes. **Manual de pavimentação.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias: 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 1996. 169 p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes. **Manual de pavimentação.** Divisão de Capacitação Tecnológica: Publicação 720 ed., Rio de Janeiro, RJ. 2006. 278 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de pavimentação.** 3 ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 274 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários.** – Escopos Básicos/Instruções de Serviço. 2 ed. Publ. IPR-717. Rio de Janeiro, RJ. 2005. 489 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentos flexíveis.** – Base Estabilizada Granulométricamente – Especificação de Serviço. – Norma DNIT 141/2010-ES - Revisão da Norma DNER-ES 303/97. Rio de Janeiro, RJ. 2010. 9 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Evolução da malha rodoviária.** Coordenação Geral de Planejamento. Departamento de Planejamento e Pesquisa. <http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/snv2014/> acesso em 16/12/2014.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Definição e Notação de Horizontes e Camadas do Solo,** por Humberto Gonçalves dos Santos e outros. 19 ed. Rio de Janeiro, RJ. 1983. 34 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação dos solos.** 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 306 p.

FERRAZ, R. L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Dissertação de Mestrado. UFV – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 1994. 174 p.

FORTES, F. Q.; VILLIBOR, D. F.; BLASSIOLI, P. R. F. **Aspectos técnicos de um plano gerencial de recuperação de pavimentos de baixo custo com solos tropicais**. IV Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Fortaleza, CE. 1999.

GRECO, J. A. S. **Materiais para pavimentação**. Solos – Conceitos e Ensaio de Mecânica dos Solos - Classificação dos Solos para Fins Rodoviários 2007.  
<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/notas%20de%20aula%20solos.pdf> Acesso em 21 de setembro de 2014.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B. **Caracterização de propriedades geotécnicas de solos realizados no próprio campo e de maneira expedita**. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF. 2000. 107-115 p.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2013. 70 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal - Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª ed. – Ed. Pini. São Paulo, SP. 2002. 341 p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**. Principles and Practice. Sydney – Melbourne - Brisbane, Halsted Press, New York, USA. 1972. 374 p.

KUHLMAN, R. H. **Cracking in soil cement – Cause, Effect, Control**. Concrete International. V.16, n.8, 1994. 56-59 p.

KUMAR, R. S. **Pavement design**. Publisher, Orient Blackswan. Universities Press, Hyderabad, India. 2013. 360 p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Ed. Oficina de Textos. 2 ed: Uberlândia, MG. 2002. 178 p.

LIMA, D. C. **Estabilização solo-cal**. Anais, In: 19ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro. RJ. 1984. 67-82 p.

LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. **Introdução à pedologia**. Universidade Federal do Paraná, UFPR. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Curitiba, PR. 1996.

LITTLE, D. N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates**. V. 1. Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association. 1999.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt**. Prepared For the National Lime Association. Updated by: Peter E. Sebaaly. National Lime Association the Versatile Chemical. USA. 2006. 79 p.

LOPES, W. G. R. **Solo-Cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Tese de Doutorado. UNICAMP, Campinas, SP: 2002. 158 p.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2007. 147 p.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos solos para fins de pavimentação**. Notas de Aula, Capítulo 4. UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, MG. 2009. 204 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2004. 43 p.

MENDONÇA, A. N.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; FONTES, M. P. F. (1998). **Caracterização tecnológica de misturas solo-cal**: Estudo de Caso Dirigido a Dois Solos de Viçosa – MG. XI COBRANSEG. Brasília, DF. 1998. 1175-1182 p.

MERIGHI J. V. **Estruturas de pavimento**. Escola de Engenharia Mackenzie. Curso: Estradas II. São Paulo, SP. 2004.

MME – Ministério de Minas e Energia. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral (SGM). Relatório Técnico. **Análise e avaliação da sustentabilidade na indústria mineral**. 2008. 173 p. Disponível em:

[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/estudos\\_consolidados/P56\\_RT82\\_Sustentabilidade](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/estudos_consolidados/P56_RT82_Sustentabilidade). Acesso em: 08 de maio de 2014.

MINASCAL – 2012. Acessado em: 20 de Agosto de 2013: [www.minascal.com.br](http://www.minascal.com.br)

MINEROPAR. Minerais do Paraná – **Atlas geológico do Estado do Paraná**. Unidades Estratigráficas. 2001. Acessado em: 16 de junho de 2014.  
[www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=22](http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=22)

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN, M. **Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra – Práticas de campo**. IV Seminário Ibero-americano de Construção com Terra. CYTED Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. PROTERRA – Projeto de Investigação, Monsaraz, Portugal. 2005. 31 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. V1, Rio de Janeiro, RJ. 1981. 30–41 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 1995. 240 p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. São Paulo, SP, 2000.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; CINCERRE, J. R.; NETO, A. Z.; SERRA, P. R. M. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. Bases Alternativas com Solos Lateríticos, Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. Ed. Arte & Ciência, 2 ed. - Ampliada. São Paulo, SP, 2009. 196 p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 1991.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP, 1998. 587 p.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no Município de Ribeirão das Neves/MG**. Dissertação de Mestrado. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2010. 128 p.

OLIVEIRA, J. C.; MILOGRANA, J. R. F.; CARDOSO, R. A.; VIEIRA, H. D. **O uso de cal na estabilização de solos para fins rodoviários**. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, GO. 2005. 287 – 300 p.

OLIVEIRA, J. C. **Caracterização geotécnica de materiais inconsolidados arenosos do Distrito Federal utilizados como material de construção**. Dissertação de Mestrado. Unb - Universidade de Brasília, DF, 2000.

PAIS, J.; PEREIRA, P.; AZEVEDO, M. D. **A reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis**. A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, 1º Congresso Rodoviário Português – Estradas. Lisboa, Portugal. 2000. 627-637 p.

PALMEIRA, E. M. **Melhoria de solos**. Publicação GA 001A/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Unb - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1990. 225 p.

PESSOA, F. H.; CAMAPUM, J. C.; GOUVEIA, L, A, **Análise das propriedades físico-químicas, micro-estruturais e mecânicas de um solo fino estabilizado com cal**. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, GO. 2005. 251–260 p.

PINTO, S. PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Copiarte. 2002. 269 p.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia – PUC. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils**. Transportation Research Record, Washington, D.C. 1999. nº 1652, 215-227 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Editora Manoele Ltda. São Paulo, SP. 1990. 188 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2006. 18 p.

ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R. C. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, 2006. Disponível em: [WWW.prp.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/inic.../estabilizacao\\_solo](http://WWW.prp.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/inic.../estabilizacao_solo). Acesso em : 09/04/2014.

RUFO, R. C.; REZENDE, L. R.; VARGAS, C. A. L.; GOMIDE, E.; BRITO, J. P. **Estabilização química de solos tropicais com cal para fins de pavimentação**. IV Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste de Minas Gerais. Uberlândia, MG. 2009.

SANTOS. M.; LIMA. D.; BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos, SP. Abril, 1995. 74-97 p.



SCHELLMANN, W. N. **Considerations on the definition and classification of laterites.**

International Seminar on Lateritisation Processes (Trivandrum, 1979), IBH Publish. Oxford. 1982. 10 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** Volume I, 2 ed. Ed. PINI, São Paulo, SP. 2007. 761 p.

SERAFINI, L.; ALVES, G. M.; DALLA ROSA, F.; WESSELING, D. H.; GONÇALVES, F. P.; THOMÉ, A. **Resultados de pesquisas em estabilização alcalina realizada com materiais do norte do RS.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº. 4, 2004. 11 p.

SESSIONS, J. **Estudo da divisão ideal do espaçamento ótimo entre estradas, em terrenos acidentados, para extração florestal.** Sociedade de Investigações Florestais – SIF. Forest Road Operations in the Tropics. Oregon, USA: Springer, 2007. 170 p.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

STEVENSON, F. J. **Húmus chemistry: gênese, composition and reaction.** 2 nd Ed. By. John Wiley & Sons, inc. New York, USA. 1994. 496 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia.** Traduzido por Antônio José da Costa Nunes e Maria de Lurdes Campo Campelo. Rio de Janeiro: SEDEGRA, 1962. 659 p.

VAN IMPE, W. F. V. **Soil improvement techniques and their evolution.** Rotterdam, A. A. Balkema, 1989. 125 p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1978. 509 p.

VIANA, H. M. F. **Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Paulo – SP, 2007.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. dos.; VIEIRA, N. F. **Solos: propriedades, classificação e manejo.** MEC/ABEAS. Brasília, DF. 1988.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** M.Sc. Civil Engineering Department of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, RJ. Brazil. 2010.

VOGT, J. C., **Estabilização betuminosa.** In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ. 1971.

WOLLE, C. M. **Slope stability in tropical lateritic and saprolitic soils.** ISSMFE Committee on Tropical Soils. Progress Report 1982 – 1985. ABMS, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos São Paulo, SP. Brasil. 1985. 164–221 p.

**ANEXO I – Boletins de Leituras dos Ensaio Realizados na Energia de  
Compactação do Proctor Normal**













**ANEXO II – Boletins de leituras dos Ensaios Realizados na Energia de  
Compactação do Proctor Intermediário**













