

**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS**  
**CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

**ALAN NUNES DE SIQUEIRA DE SOUZA**  
**21041437**

**Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento**  
**Rodoviário**

Brasília  
2014

ALAN NUNES DE SIQUEIRA DE SOUZA

**Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento  
Rodoviário**

Trabalho de Curso (TC) apresentado  
como um dos requisitos para a  
conclusão do curso de Engenharia Civil  
do UniCEUB - Centro Universitário de  
Brasília

Orientador: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc.

Brasília  
2014

ALAN NUNES DE SIQUEIRA DE SOUZA

## **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**

Trabalho de Curso (TC) apresentado  
como um dos requisitos para a  
conclusão do curso de Engenharia Civil  
do UniCEUB - Centro Universitário de  
Brasília

Orientador: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc.

Brasília, 04 de Dezembro de 2014

Banca Examinadora

---

Eng<sup>o</sup>. Civil: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc. UniCEUB.  
Orientador

---

Eng.<sup>a</sup>. Civil: Maruska Tatiana Nascimento da Silva, D.Sc. UniCEUB.  
Examinador Interno

---

Eng<sup>o</sup> Civil Giuseppe Miceli Júnior, M.Sc.  
Instituto de Ensino Superior Planalto – IESPLAN  
Examinador Externo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	3
2.1 Objetivo Geral .....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO TEÓRICA .....	4
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS .....	4
3.1.1 Tipos de Solos .....	4
3.1.2 Sistemas de classificação dos Solos .....	5
3.2 PAVIMENTO RODOVIÁRIO .....	8
3.2.1 Classificação dos Pavimentos .....	9
3.2.2 Camadas de um Pavimento Rodoviário.....	11
3.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA CAL.....	14
3.3.1 – Tipos de Cal.....	16
3.3.2 – Propriedades importantes da cal para a estabilização de solos .....	19
3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	21
3.4.1 Evolução histórica da estabilização de solos .....	22
3.4.2 Estabilização de solos através da cal .....	23
4. MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO.....	25
4.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS .....	25
4.1.1 Localização da amostra do solo ensaiado .....	25
4.1.2 Caracterização da cal .....	26
4.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS .....	27
4.2.1 Análise Granulométrica.....	27
4.2.2 Limites de Atterberg.....	30
4.2.3 – Massa específica real dos grãos.....	32
4.2.4 – Ensaio de Compactação.....	34

4.2.5 – Expansão.....	36
4.2.6 – Ensaio de Compressão Simples.....	37
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	38
5.1 GRANULOMETRIA.....	38
5.2 LIMITES DE ATTERBERG .....	40
5.2.1 Índice de Plasticidade.....	42
5.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS .....	42
5.4 COMPACTAÇÃO.....	43
5.3 ENSAIO DE EXPANSÃO.....	46
5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	47
6. CONCLUSÃO.....	49
6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	50
7. REFERÊNCIAS.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país .....	1
Figura 2 – Estrutura tipo de um pavimento flexível .....	9
Figura 3 – Estrutura tipo de um pavimento rígido.....	10
Figura 4 – Corte longitudinal de um pavimento de concreto cimento.....	10
Figura 5 – Pavimento semirrígido com uma sub-base de solo-cimento .....	11
Figura 6 – Camadas do Pavimento .....	11
Figura 7 – Rocha calcária antes (1) e depois da calcinação (2).....	15
Figura 8 – Exemplo de uma rocha calcária dolomítica.....	15
Figura 9 – Exemplo de cal aérea.....	16
Figura 10 – Cal hidratada ou apagada .....	18
Figura 11 – Exemplo de cal hidráulica .....	19
Figura 12 – Etapas da estabilização de solos com cal.....	24
Figura 13 – Localização da amostra deformada de um solo arenoso siltoso .....	25
Figura 14 – Vista superior do local da obra.....	25
Figura 15 – Retirada de amostra deformada de um solo arenoso .....	26
Figura 16 – Cal Hidratada Supercal CH III .....	26
Figura 17 – Preparação da amostra de solo a ser ensaiada.....	27
Figura 18 – Peneiras para granulometria grossa .....	28
Figura 19 – Sequência de procedimentos para a sedimentação.....	29
Figura 20 – Aparelho de Casagrande .....	30
Figura 21 – Sequência do ensaio de determinação do limite de liquidez .....	30
Figura 22 – Amostras imersas em água destilada .....	32
Figura 23 – Aparelho de Dispersão.....	32
Figura 24 – Picnômetros em banho-maria .....	33
Figura 25 – Amostras na bomba de vácuo.....	33
Figura 26 – Parâmetros dos cilindros.....	34
Figura 27 – Compactação dos corpos de prova.....	35
Figura 28 – Amostra imersa em água .....	36
Figura 29 – Prensa de Compressão EMIC PCE 100 C.....	37
Figura 30 – Curva Granulométrica com e sem defloculante.....	39
Figura 31 – Curva do Limite de Liquidez.....	41
Figura 32 – Curva de compactação – Solo Natural.....	43

Figura 33 – Curva de compactação – Solo com adição de 6% cal .....	44
Figura 34 – Curva de compactação – Solo com adição de 8% cal .....	44
Figura 35 – Curva de compactação – Solo com adição de 10% cal .....	45
Figura 36 – Comparação entre as curvas de compactação .....	45
Figura 37 – Contração do solo natural .....	46

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Terminologia do Sistema Unificado .....	5
Tabela 2 – Esquema de Classificação pelo Sistema Unificado.....	6
Tabela 3 – Classificação dos Solos pelo Sistema Rodoviário .....	7
Tabela 4 – Faixa de diâmetro dos grãos do solo.....	8
Tabela 5 – Propriedades do solo-cimento para compor uma base rodoviária .....	14
Tabela 6 – Classificação da cal aérea quanto ao teor de MgO .....	17
Tabela 7 – Peneiramento Grosso e Fino.....	38
Tabela 8 – Granulometria do solo ensaiado.....	40
Tabela 9 – Resultado do Limite de Liquidez.....	40
Tabela 10 – Resultado do Limite de Plasticidade.....	41
Tabela 11 – Limites de Atterberg .....	41
Tabela 12 – Classificação de Burmister para o Índice de Plasticidade .....	43
Tabela 13 – Índice de Plasticidade.....	42
Tabela 14 – Resultado do ensaio de massa específica real dos grãos.....	43
Tabela 15 – Expansão dos solos ensaiados .....	466
Tabela 16 – Resistência à compressão simples .....	47



## ÍNDICE DE SIMBOLOS

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ .....	Aluminato de Cálcio
$\text{CaCO}_3$ .....	Carbonato de Cálcio
$\text{CaO}$ .....	Óxido de Cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ .....	Hidróxido de Carbono
<i>cal</i> .....	caloria
$\text{CO}_2$ .....	Dióxido de Carbono
$\text{MgO}$ .....	Óxido de Magnésio
$\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ .....	Dolomita
$G_s$ .....	Massa específica dos grãos
LL.....	Limite de Liquidez
LP.....	Limite de Plasticidade
IP.....	Índice de Plasticidade
$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ .....	Silicato de Cálcio
w%.....	Teor de umidade
Wótimo.....	Teor de umidade ótimo
$\delta_T$ .....	Massa específica da água
$Y_d$ .....	Peso específico seco

## ÍNDICE DE ABREVIações

AASHTO.....	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM.....	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR.....	California Bearing Ratio
CNT.....	Confederação Nacional do Transporte
DNIT.....	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SNV.....	Sistema Nacional de Viação

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todas as vezes que Ele me ajudou e não me deixou só em mais uma etapa da minha vida. Agradeço ao Senhor Jesus por minha salvação sem a qual não haveria motivo de me alegrar com esta conquista. Agradeço ao Espírito Santo, presença constante em meu ser e meu amigo de todas as horas.

Aos meus pais José Antonio de Souza e Sueli Nunes de Siqueira Souza, referências em minha vida, sem eles não teria chegado até aqui. Também agradeço à minha irmã Lílian Aparecida de Souza, amiga das boas horas e também das ruins.

Agradeço também a Igreja Assembléia de Deus Ministério Brilho de Luz, ao qual eu faço parte, sei que eles sempre têm orado por mim e que esta vitória é também deles.

Agradeço ao meu orientador, Prof. M.Sc. Jairo Furtado Nogueira, pelos seus conselhos e pelas dicas valiosas, sem ele este trabalho não teria se realizado.

Também quero agradecer aos técnicos do Laboratório de Geotecnia do UniCEUB, Elizio Filho (Dida), Vanílson Gustavo, Régis e João Pedro pela sua atenção e total dedicação nos ensaios realizados.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Civil do UniCEUB que durante estes cinco anos ensinaram não só o conhecimento técnico, mas também compartilharam de conhecimentos fundamentais para a prática do engenheiro civil.

Por fim, e não menos importante, quero agradecer aos meus amigos, principalmente a Flávia Telles, Gabriel Ribeiro, Gabriel Barreto, Geraldo Oliveira, Guido Almeida, Priscilla Hiromi e Rebecca Gissoni. Vocês se tornaram mais que colegas de classe, tornaram-se companheiros para todas as horas.

## RESUMO

A presente monografia estuda o desempenho de uma mistura de solo-cal visando à estabilização de um solo arenoso siltoso e sua aptidão para compor a base de um pavimento rodoviário. Nesta pesquisa foi empregado um solo arenoso siltoso de Brasília-DF e uma cal do tipo CH III, produzida pela empresa ICAL – Indústria de Calcinação Ltda. Foram realizados ensaios de laboratório para a determinação dos parâmetros geotécnicos necessários para estabilização do solo. Na primeira etapa do trabalho foram realizados ensaios de caracterização do solo, tais como: análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica dos grãos. Também foi feita a compactação dos solos para comparar a curva de compactação de um solo natural com a curva de uma mistura solo-cal alterando-se a quantidade de cal nos respectivos teores: 6%, 8% e 10%. Na segunda etapa foram preparados corpos de prova nos teores de cal e umidade ótima específicos de cada amostra, sendo eles submetidos aos ensaios de expansão, parâmetro importante para a pavimentação, e de resistência à compressão simples para determinar a tensão de ruptura dos corpos de prova. Verificou-se que a adição de cal a um solo arenoso siltoso aumenta a resistência à compressão simples, porém não o bastante para que este seja um material constituinte da base de um pavimento rodoviário.

Palavras chave: solos, cal, pavimento rodoviário, estabilização de solos

## ABSTRACT

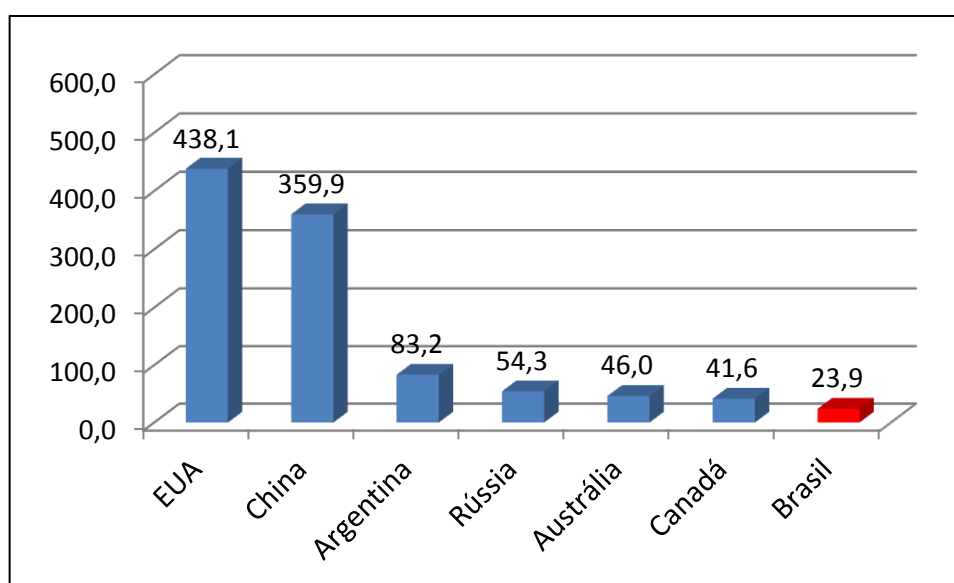
This monograph studies the performance of a mixture of soil-lime aiming at stabilization the soil and its aptitude to compose the basis of a pavement. This research was employed a silty sandy soil of Brasília-DF and a lime type CH III, produced by the company ICAL - Calcining Industry Ltda. Laboratory tests have been performed for determining the parameters required for soil stabilization . In the first stage of labor were performed soil characterization tests such as: the grain size determination , liquid limit, plastic limit and density of the grains . Soil compaction was also performed to compare the compression curve of a natural soil with the curve of a soil-lime mixture by changing the amount of lime in the respective concentrations: 6%, 8% and 10%. In the second step the specimens were prepared in the levels of lime and in the specific optimum moisture contents of each sample, they were submitted to testing expansion, an important parameter for paving, and unconfined compressive strength to determine the breakdown pressure of the specimens. It has been found that the addition of lime to a silty sand soil increases the compression strength, but not enough for it to be a constituting material of a basis of a road pavement.

Keywords: soil, lime, highway pavement, soils stabilization

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países mais extensos do mundo com uma área de 8.515.767,049 km<sup>2</sup> (IBGE, 2014). Mesmo assim dentre os oito países de maior área territorial do mundo, o Brasil apresenta a menor densidade de malha rodoviária pavimentada, tendo 23,9 km de rodovia pavimentada para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país



Fonte: Confederação Nacional do Transporte CNT (2014, adaptada) Dados em km/1.000km<sup>2</sup>

Dados do SNV – Sistema Nacional de Viação (2014) indicam que o Brasil apresenta 1.714.103 km de rodovias, porém apenas 204.078,1 km são pavimentados, correspondendo a 12,9% da malha rodoviária nacional.

Por estas estradas não pavimentadas, também chamadas de estradas vicinais, passam diversos veículos responsáveis pelo escoamento de produtos agrícolas e pelo acesso dos moradores rurais aos serviços de saúde, educação e lazer, disponíveis nos grandes centros urbanos (JÚNIOR e FERREIRA, 2007).

Devido à falta de cuidado com a manutenção e a conservação dessas vias verifica-se o aparecimento de problemas ambientais como, por exemplo, o assoreamento de cursos d'água resultante da erosão do corpo do pavimento (JÚNIOR e FERREIRA, 2007).

É necessário encontrar soluções técnicas que sejam de fácil execução e economicamente viáveis. Uma técnica muito empregada em pavimentação que pode mitigar estes problemas é a estabilização de solos.

O solo em determinado local nem sempre atende aos requisitos necessários para execução de um pavimento rodoviário, nestes casos existem apenas três opções (CRISTELO, 2001):

1. Aceitar o solo natural e adequar o projeto às limitações por ele impostas;
2. Retirar o material do seu local original e substituí-lo por outro de maior qualidade;
3. Modificar as propriedades do solo existente de modo a criar um material capaz de atender às necessidades da tarefa planejada.

Na primeira alternativa tem-se a dificuldade de adequar os vários projetos que compõe as obras rodoviárias, gastando tempo e dinheiro nos novos estudos a serem feitos e na obtenção das licenças para execução da obra.

A segunda possibilidade além de ser muito onerosa com a aquisição e o transporte de outro material, é também nociva ao meio ambiente, pois ao retirar-se o material de uma jazida, está-se alterando as características originais de vegetação e a estrutura geológica do local.

A última opção propõe a estabilização do solo, seja de forma mecânica, química ou por uma combinação destas duas. Dentre os materiais que podem ser utilizados para a estabilização química do solo está o uso da cal, sendo também empregados o cimento e a emulsão asfáltica (ROSA, FERREIRA e GUIMARÃES, 2006).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Esta pesquisa tem como finalidade o estudo da mistura solo-cal como material componente de um pavimento rodoviário, dentro dos parâmetros técnicos exigidos para sua execução.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

I. O objetivo principal deste trabalho consiste em verificar a capacidade de suporte de carga e expansividade do solo quando a este é adicionado cal nos seguintes teores: 6%, 8% e 10%;

II. Relacionar o teor de cal de uma mistura solo-cal e o aumento da resistência quando solicitado por uma carga atuante;

III. Analisar se a mistura solo-cal é um material adequado para compor a base de um pavimento rodoviário.



### 3 REVISÃO TEÓRICA

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

Para Engenharia Civil, solo é todo material não cimentado ou fracamente cimentado de partículas minerais oriundas da decomposição das rochas (CRAIG, 1992 apud CRISTELO, 2001).

Conforme a NBR 6502/95 – Rochas e solos pode-se definir solo como material oriundo da decomposição das rochas através de agentes físicos e químicos, podendo ou não possuir matéria orgânica em sua composição.

A decomposição das rochas é derivada de agentes físicos, químicos, tais como as variações de temperatura e a presença da água, e de agentes biológicos como as ações da fauna e flora, que provocam reações como a hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros (PINTO, 2006).

O conhecimento do solo é muito importante, pois todas as obras de engenharia se assentam no terreno o qual deve ser capaz de absorver os esforços atuantes nas estruturas.

##### 3.1.1 Tipos de Solos

Didaticamente podem-se dividir os solos em residuais e transportados, sendo importante frisar que em solos transportados é mais comum encontrar solos finos, que são mais susceptíveis à estabilização com cal (AZEVEDO, 2010).

- Solos Residuais: São solos formados através da degradação da rocha original cujas propriedades são semelhantes à rocha de origem, encontrando até mesmo blocos isolados de rochas semi-alteradas (AZEVEDO et al, 1998 apud AZEVEDO, 2010). São solos que permanecem no local da rocha matriz, observando-se uma gradual transição do solo até a rocha (CAPUTO, 2007).

- Solos Transportados: são solos provenientes do transporte de materiais decompostos através de um agente transportador, como rios, vento, chuva, etc. Em geral são solos mais finos que os residuais, pois o agente transportador não consegue carregar material muito graúdo devido ao peso deste (AZEVEDO et al, 1998 apud AZEVEDO, 2010).

### 3.1.2 Sistemas de classificação dos Solos

A primeira característica que distingue os solos é o tamanho das partículas que o constituem. Alguns solos possuem partículas visíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho, já outros solos apresentam partículas tão finas que não podem ser percebidas individualmente e formam uma pasta quando molhadas (PINTO, 2006).

Muitas organizações utilizaram a granulometria das partículas para classificar os solos como, por exemplo, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos adotado pela ASTM - *American Society for Testing and Materials* (DAS, 2007).

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) fundamenta-se na identificação dos solos conforme as suas propriedades de textura e plasticidade, e reúne-os de acordo com o seu comportamento. Esse sistema leva em conta a porcentagem de pedregulhos, areias e finos; a forma da curva granulométrica; a plasticidade e a compressibilidade (SOUSA, 2013).

Originalmente esse sistema foi proposto por Arthur Casagrande em 1942 para o uso nos trabalhos de construção de aeroportos sob a responsabilidade da USACE – *U.S Army Corps of Engineers* – durante a Segunda Guerra Mundial.

Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, como mostra a Tabela 1. As cinco primeiras letras indicam o tipo principal do solo e as quatro restantes correspondem a dados complementares dos solos.

Tabela 1 – Terminologia do Sistema Unificado

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: (PINTO, 2006)

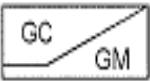
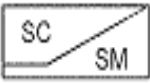
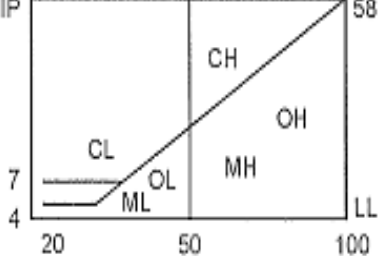
O Sistema Unificado de Classificação dos Solos agrupa o solo em duas categorias distintas (DAS, 2007):

1. Solos de granulometria grossa que possuem menos de 50% de suas partículas passando pela peneira Nº 200. Os símbolos do grupo iniciam com a letra G ou S. A letra G representa um solo pedregulhoso ou pedregulho enquanto a letra S um solo arenoso ou areia (DAS, 2007).

2. Solos de granulometria fina são compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira Nº 200. Os prefixos que indicam este grupo são as letras M (que representa silte inorgânico) e C (que indica argila inorgânica). Neste grupo também há a presença de siltes e argilas orgânicas que é identificado pela letra O. Para designar a turfa, terra preta (*muck*) e outros solos altamente orgânicos é empregado o símbolo Pt.

Na Tabela 2 é apresentado um esquema para a classificação pelo Sistema Unificado.

Tabela 2 – Esquema de classificação pelo Sistema Unificado

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

Fonte: (PINTO, 2006)

Outro sistema de classificação dos solos é o Sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) também conhecido como Sistema Rodoviário (DAS, 2007).

Sobre o Sistema Rodoviário Pinto (2006) afirma:

Neste sistema, também se inicia a classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, só que são considerados solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na Classificação Unificada. Estes são os solos dos grupos A-1, A-2, e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Na Tabela 3 é apresentado um quadro de classificação dos solos segundo o Sistema Rodoviário

Tabela 3 – Classificação dos Solos pelo Sistema Rodoviário

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: (DNIT, 2006)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas agrupa os solos em faixas de diâmetros das partículas que o compõe como estabelece a norma NBR 6502/95.

Na Tabela 4 é apresentada a divisão dos solos conforme a ABNT:

Tabela 4 – Faixa de diâmetro dos grãos do solo

Diâmetro (mm)							
Pedregulho			Areia			Silte	Argila
grosso	médio	fino	grossa	média	fina		
60,0 mm	20,0 mm	6,0 mm	2,0 mm	0,6 mm	0,2 mm	0,06 mm	<0,002 mm
a	a	a	a	a	a	a	
20,0 mm	6,0 mm	2,0 mm	0,6 mm	0,2 mm	0,06 mm	0,002 mm	

Fonte: (ABNT, 1995)

Além destes solos a NBR 6502/95 dispõe que a pedra de mão apresenta diâmetros entre 60 mm e 200 mm enquanto o matacão, um fragmento de rocha, possui um diâmetro compreendido entre 200 mm e 1 m.

### 3.2 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

O pavimento rodoviário é a superestrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, denominada de subleito (DNIT, 2006).

Construído sobre a superfície de terraplenagem, o pavimento é dimensionado para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e de ações do clima, e oferecer aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com comodidade, economia e segurança. (BERNUCCI *et al*, 2010).

O comportamento estrutural do pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, da rigidez destas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI *et al*, 2010).

Estas camadas podem possuir uma ou mais funções específicas e devem oferecer aos veículos melhores condições de suporte e rolamento em qualquer circunstância climática (BALBO, 2007).

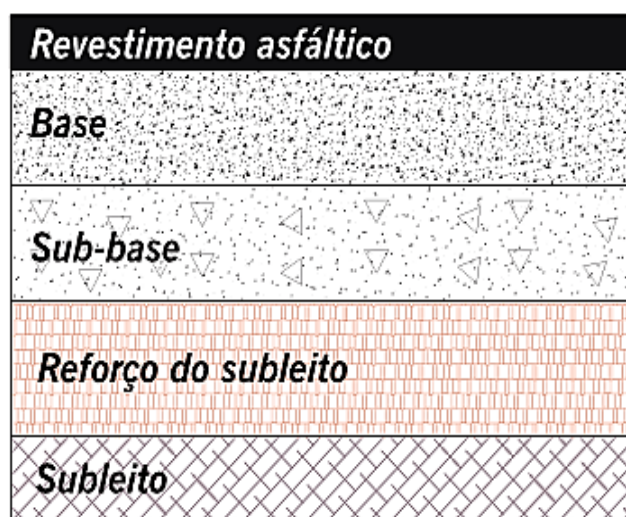
### 3.2.1 Classificação dos Pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos.

- **Flexível:** São pavimentos, normalmente constituídos de revestimento betuminoso de pequena espessura, cujas camadas não trabalham à tração (MARQUES, 2012).

Como exemplo de pavimento flexível temos aquele constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso com revestimento asfáltico (DNIT, 2006). Na Figura 2 é apresentada uma estrutura-tipo de um pavimento flexível.

Figura 2 – Estrutura tipo de um pavimento flexível

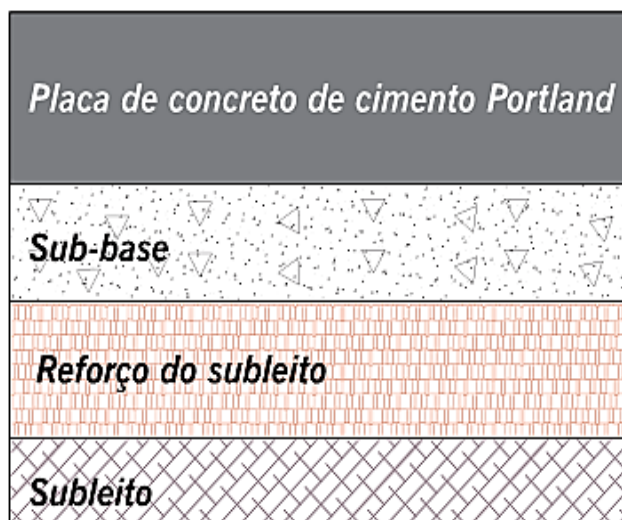


Fonte: (BERNUCCI *et al*, 2010)

- **Rígido:** Os pavimentos rígidos possuem revestimento de alta rigidez em relação às camadas inferiores e, logo, absorve aproximadamente todas as tensões oriundas do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

Um exemplo de pavimento rígido são os pavimentos de concreto-cimento cujo revestimento consiste numa placa de concreto feito com cimento Portland. A espessura do pavimento é função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas inferiores do pavimento (BERNUCCI *et al*, 2010). A Figura 3 mostra a estrutura de um pavimento rígido.

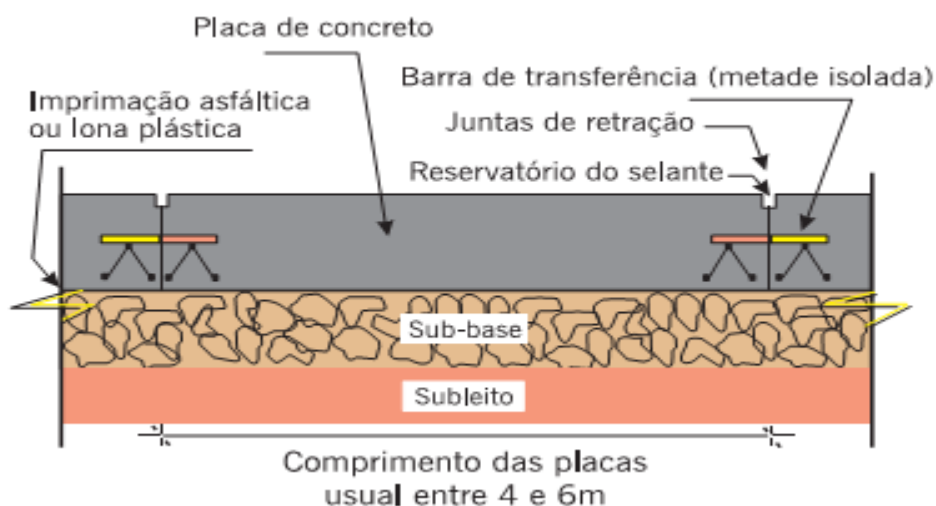
Figura 3 – Estrutura tipo de um pavimento rígido



Fonte: (BERNUCCI et al, 2010, p. 338)

As placas de concreto podem ou não ser armadas com barras de aço (BERNUCCI et al, 2010). Um corte longitudinal de um pavimento rígido é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Corte longitudinal de um pavimento de concreto cimento



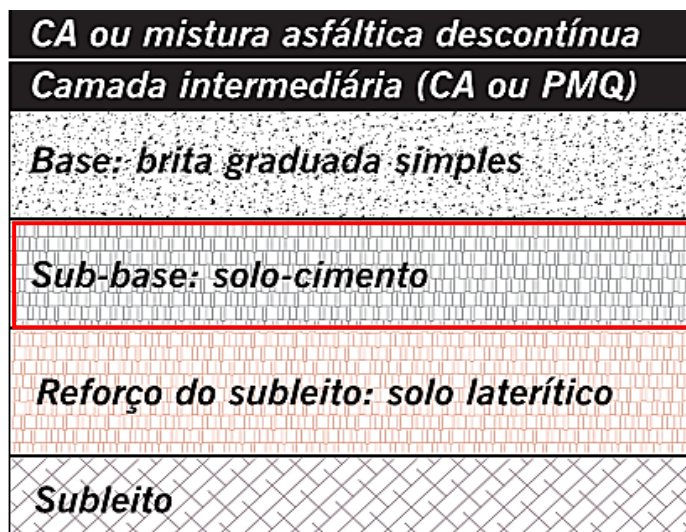
Fonte: (BERNUCCI et al, 2010, p. 338)

- **Semirrígido:** Segundo Souza (2004) o pavimento semirrígido é aquele identificado por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, uma camada de solo-cimento e revestida por uma camada de material betuminoso.

Pavimentos com revestimento asfáltico cuja base ou sub-base possui materiais cimentados e que também trabalham à tração são denominados de

pavimentos semirrígidos (BERNUCCI et al, 2010). Na Figura 5 é apresentada uma estrutura tipo de um pavimento semirrígido.

Figura 5 – Pavimento semirrígido com uma sub-base de solo-cimento

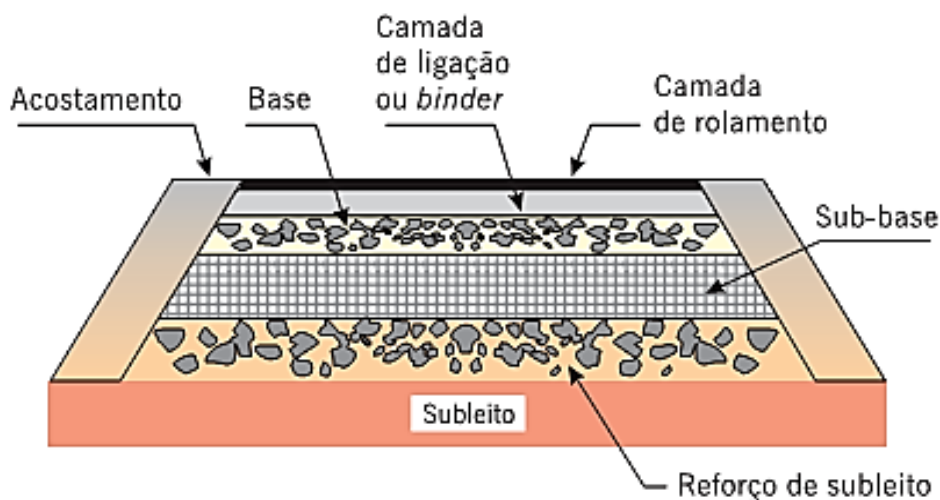


Fonte: (BERNUCCI et al, 2010, p. 338)

### 3.2.2 Camadas de um Pavimento Rodoviário

O pavimento é constituído por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (veja a Figura 6). Dependendo do volume de tráfego e dos materiais disponíveis pode haver ausência de algumas camadas (BERNUCCI et al, 2010).

Figura 6 – Camadas do Pavimento



Fonte: (BERNUCCI et al. 2010)



### 3.2.2.1 – Subleito

O subleito é o terreno de fundação no qual será apoiado todo o pavimento devendo ser considerado e estudado até a profundidade em que as cargas impostas pelo tráfego atuam de forma significativa (MARQUES, 2012).

O subleito será composto de material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por material transportado e em seguida compactado, como no caso dos aterros. (BALBO, 2007).

Caso o material do subleito obtiver  $CBR < 2\%$ , ele deve ser substituído por outro de melhor resistência ( $CBR > 2\%$ ) até pelo menos 1,00 metro, podendo ser utilizado como material de sub-base quando o CBR do subleito for  $\geq 20\%$  (MARQUES, 2012).

Quando o terreno do subleito for irregular deve-se efetuar a regularização do mesmo, devendo ser executada após o término dos trabalhos de limpeza e movimentação de terra, sendo construída sobre o subleito, cuja função é conformá-lo transversalmente e longitudinalmente, corrigindo algumas falhas da superfície de terraplenagem. (SOUZA, 2004).

### 3.2.2.2 – Reforço do Subleito

O reforço do subleito pode ser definido como a camada estabilizada granulometricamente, construída sobre o subleito corretamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário diminuir as espessuras elevadas da camada de sub-base, causadas pela baixa capacidade de suporte do subleito. (DNIT, 2010b).

De acordo com Souza (2004) o reforço do subleito “é a camada que desempenha função semelhante a da sub-base, sem especificações definidas, apenas com condições de apresentar características de suporte superiores às do subleito.”.

Segundo o DNIT (2006) os materiais adequados para o reforço do subleito são aqueles que apresentam CBR superior ao do subleito e expansão  $\leq 1\%$  (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

### 3.2.2.3 – Sub-base

A sub-base é uma estrutura do pavimento, complementar à base e possui as mesmas funções desta, sendo executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado (DNIT, 2010).

Quando a espessura da base necessária para transmitir os esforços para as camadas inferiores for muito elevada, por razões construtivas e econômicas, divide-se a base em duas camadas, criando uma sub-base, que geralmente possui menor custo (BALBO, 2007).

Conforme o DNIT (2006) para compor a camada de sub-base o material deve possuir  $\text{CBR} \geq 20\%$ , índice de grupo nulo e expansão  $\leq 1\%$  (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

### 3.2.2.4 – Base

É a camada projetada para resistir e distribuir os esforços verticais provindos das cargas dos veículos e sobre a qual o revestimento é edificado, situada acima da sub-base, quando existente, ou sobre o subleito (SOUZA, 2004).

As bases podem ser compostas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, entre outros materiais (BALBO, 2007).

Segundo o DNIT (2006) um solo adequado para constituir a base de um pavimento deve possuir um Limite de liquidez  $\leq 25\%$ , Índice de Plasticidade  $\leq 6\%$ ,  $\text{CBR} \geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  (medida com uma sobrecarga de 10 lb).

Devido à ausência de normas específicas para execução de camadas do pavimento com solo-cal, foi consultada a norma do DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de solo-cimento – Especificação de serviço (DNIT, 2010a).

De acordo com a norma do DNIT 143/2010 a mistura de solo-cimento deve ter aos 7 (sete) dias uma resistência à compressão com o valor mínimo de 21  $\text{kg/cm}^2$ , ou 2,1 MPa.

Segundo a norma do DNIT 143/2010 existem algumas exigências para que a mistura solo-cimento seja empregada na execução da camada de base rodoviária. Estas características são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do solo-cimento para compor uma base rodoviária

Peneiras	Porcentagem	Tolerância
2½"	100%	-
Nº 4	50 a 100%	± 5%
Nº 40	15 a 50%	± 2%
Nº 200	5 a 35%	± 2%
Limite de Liquidez	máximo 40%	
Índice de Plasticidade	máximo 18%	

Fonte: (DNIT, 2010a)

### 3.2.2.5 – Revestimento

O revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e visa melhorar as condições do tráfego de veículos, propiciando conforto, segurança e durabilidade ao revestimento, devendo resistir ao desgaste. (MARQUES, 2012).

Conforme Bernucci *et al* (2010) “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.”.

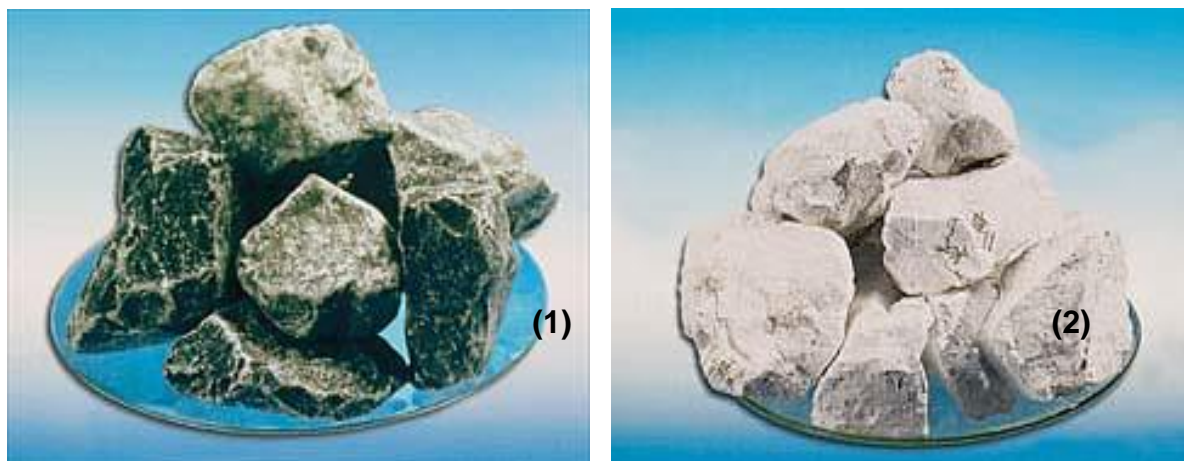
## 3.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA CAL

A cal é um aglomerante inorgânico, produzido a partir de rochas carbonáticas, composto basicamente por cálcio e magnésio, cujo endurecimento ocorre por reação com o CO<sub>2</sub> (CINCOTTO *et al* 2010).

A cal é um dos materiais mais empregados na construção civil, encontrando aplicações que vão desde seu emprego na argamassa de assentamento de alvenaria até seu uso na estabilização de solos.

As matérias primas da cal são o calcário constituído basicamente pela calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e o dolomito composto essencialmente pela dolomita ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ). A composição química é um fator determinante para o desempenho da cal (CINCOTTO et al 2010). A Figura 7 exhibe uma rocha calcária antes e depois da calcinação. A Figura 8 mostra um exemplo de rocha dolomítica.

Figura 7 – Rocha calcária antes (1) e depois da calcinação (2)



Fonte: (SANTOS, 2008)

Figura 8 – Exemplo de uma rocha calcária dolomítica



Fonte: <http://www.moinhosaurora.com.br/novo.asp>

A cal é produzida a partir da extração, seleção e moagem do calcário, sendo depois submetido a altas temperaturas, dentro de fornos industriais, num processo chamado de calcinação. O resultado de todo esse processo é óxido de cálcio (SOUSA, 2013).

### 3.3.1 – Tipos de Cal

#### 3.3.1.1 – Cal aérea

De acordo com Silva (2010) a cal aérea (Figura 9) é um aglomerante que resulta da calcinação de uma rocha com porcentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio, a uma temperatura situada entre 900°C e 1100°C, cujo endurecimento é feito através da reação do gás carbônico do ar em contato com a pasta, num processo chamado de carbonatação. Há dois tipos de cal aérea: a *cal viva* e a *cal hidratada* (SILVA, 2010).

Figura 9 – Exemplo de cal aérea



Fonte: [http://www.lomanegra.com.ar/productos\\_detalle.asp?cat=3&id=23](http://www.lomanegra.com.ar/productos_detalle.asp?cat=3&id=23)

A cal aérea pode ser classificada em *gorda* e *magra* de acordo com a taxa de impurezas presente na rocha calcária. A cal aérea *gorda* provém de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99% e possuem uma coloração branca (MIGUEL *apud* SOUSA, 2013). A cal aérea magra possui teores de argila e demais impurezas compreendidos entre 1% e 5% (COUTINHO *apud* SILVA, 2010).

A cal aérea também pode ser classificada de acordo com o teor de óxido de magnésio proveniente da calcinação do carbonato de magnésio presente na dolomita (SILVA, 2010). Na Tabela 6 são apresentados os tipos de cal aérea conforme o teor de carbonato de magnésio presente na sua composição.

Tabela 6 – Classificação da cal aérea quanto ao teor de MgO

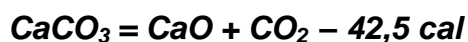
<b>Tipo de Cal</b>	<b>Teor de Óxido de Magnésio</b>
Cal Calcítica	%MgO < 2%
Cal Cálcico-dolomítica	2% < %MgO < 20%
Cal Dolomítica	20% < %MgO < 45%

Fonte: (SILVA, 2010)

### – *Cal viva ou virgem*

A cal viva, que também pode ser chamada de cal virgem, é obtida por meio da cozedura dos calcários a temperaturas compreendidas entre 800°C e 900°C (SOUSA, 2013).

Por volta dos 894°C verifica-se uma temperatura cuja pressão de dissociação do carbonato de cálcio (pressão em que o gás carbônico é liberado do calcário) é superior à pressão atmosférica, resultando no óxido de cálcio mais dióxido de carbono em uma relação que podemos expressar na seguinte equação (SILVA, 2010):



A cal viva possui em geral a forma de grãos de diversos tamanhos, dependendo do processo de fabricação empregado, sendo comuns grãos com várias dimensões tais como 10, 15 ou 20 cm, em média (OLIVEIRA, M. 2011).

### – *Cal hidratada ou apagada*

Segundo Silva (2010) “a cal apagada ou hidratada tem origem na extinção por imersão ou aspersão com água da cal viva.”. Este processo de extinção pode ser expresso pela seguinte equação:



Cal hidratada apresenta-se na forma de pó seco (Figura 10), com 17% a 19% de água associada, enquanto a cal dolomítica normal possui de 24% a 27% de água combinada (OLIVEIRA, F. 2005).

Figura 10 – Cal hidratada ou apagada



Fonte: (SANTOS, 2008)

De acordo com a pureza do hidróxido de cálcio há três variedades de cal hidratada (SOUSA, 2013):

- ✓ cal hidratada cálcica;
- ✓ cal hidratada magnésiana; e
- ✓ cal hidratada dolomítica.

### 3.3.1.2 – Cal Hidráulica

A cal hidráulica é produzida a partir da cozedura de calcários com percentagens de argilas normalmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200 °C e 1500 °C (SILVA, 2010). A cal hidráulica é um produto que enrijece tanto em contato com a água quanto com o ar (COUTINHO, 2006).

A cal hidráulica é composta por silicatos de cálcio ( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ ) e aluminatos de cálcio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ) que, hidratando-se, endurecem na água ou ao ar. É também composta por óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) – no mínimo 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação (COUTINHO, 2006). Na Figura 11 é mostrado um exemplo de cal hidráulica.

Figura 11 – Exemplo de cal hidráulica



Fonte: <http://www.cerrobranco.com.br/cal-hidraulica-hl2/>

### 3.3.2 – Propriedades importantes da cal para a estabilização de solos

As principais características que afetam as reações entre os solos e a cal são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio (SILVA, 2010).

#### 3.3.2.1 – Granulometria

A granulometria da cal é um parâmetro físico que induz outras propriedades da cal quando empregada na estabilização de solos como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura (SILVA, 2010).

Geralmente a cal hidratada possui uma granulometria mais fina que a cal viva, devido ao processo de hidratação (CRISTELO, 2001).

#### 3.3.2.2 – Superfície específica

A superfície específica é uma das qualidades mais importantes da cal, devido a sua relação direta com outras propriedades da cal como a homogeneização da mistura e a reatividade com outros elementos (BOYNTON, 1980 *apud* SILVA, 2010). Superfícies de contato maiores propiciam melhores misturas com o solo e a água (SILVA, 2010).



### **3.3.2.3 – Reatividade**

A reatividade da cal está associada com a eficiência e a rapidez da sua ação estabilizante e está ligada a outras propriedades físicas e químicas, particularmente com a superfície específica (SILVA, 2010). Este parâmetro possibilita prever a duração da reação e, no caso desta ser exotérmica, o aumento da temperatura produzida (CRISTELO, 2001).

### **3.3.2.4 – Peso específico**

O valor do peso específico da cal viva está compreendido entre 3.200 kg/m<sup>3</sup> e 3.300 kg/m<sup>3</sup>, constatando-se uma redução na densidade da cal viva com a presença de impurezas, enquanto que para a cal hidratada essas mesmas impurezas elevam o peso específico (CRISTELO, 2001).

### **3.3.2.5 – Solubilidade**

A solubilidade da cal diminui com a temperatura e também varia com a composição da cal, sendo que a cal viva é menos solúvel que a cal hidratada e a cal calcítica é mais solúvel que a cal dolomítica (SILVA, 2010).

### **3.3.2.6 – Teor de cálcio**

Em relação às propriedades químicas da cal, o teor de cálcio é a mais importante, podendo este aparecer na cal sob a forma livre ou combinada (CRISTELO, 2001).

- ✓ Forma livre: óxido de cálcio presente na cal virgem e o hidróxido de cálcio na cal hidratada.
- ✓ Forma combinada: carbonatos, silicatos, aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos.

### 3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um método que concede ao mesmo, maior resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (VARGAS, 1981 *apud* SOUZA, 2013).

Conforme o destino do tratamento, a aplicação da cal pode consistir numa técnica de melhoria ou de estabilização do solo (CRUZ, 2008, *apud* SILVA, 2010).

✓ Melhoria – Procedimento com resultados praticamente instantâneos, que se baseia no melhoramento das propriedades geotécnicas do solo. Esta técnica possibilita apenas garantir temporariamente determinados comportamentos dos materiais em meio a solicitações impostas;

✓ Estabilização – Método utilizado para modificar significativamente, a médio e a longo prazo, as propriedades dos solos, nomeadamente os argilosos. Transparece num endurecimento gradual da mistura ao longo do tempo, após a compactação.

A estabilização de solos é um tratamento aplicado ao solo, para alterar características do solo natural que são indesejáveis para execução de determinadas obras de engenharia. Pode ocorrer por um processo mecânico, químico ou químico-mecânico (SOUZA, 2013):

✓ Mecânico: compactação realizada em camadas, por meio da aplicação de uma energia de compressão no solo e com controle de umidade. O controle tecnológico ocorre por meio de ensaios;

✓ Químico: acréscimo de um agente químico que produz uma ação cimentante, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou subprodutos da indústria.

✓ Químico-mecânico: é uma combinação das duas metodologias de estabilização de solos.

A necessidade de estabilizar um solo deve-se a um dos seguintes fatores (CRISTELO, 2001):

✓ Fraca capacidade de suporte de carga ou elevada permeabilidade em solos de fundação que, em virtude da sua localização, são difíceis de tratar por outras técnicas que não as injeções;

✓ Solos naturais pouco apropriados à execução de fundações superficiais, especialmente estradas e aeroportos.

### **3.4.1 Evolução histórica da estabilização de solos**

O conjunto de procedimentos que colaboram para o melhoramento geotécnico de solos é, provavelmente, uma das técnicas construtivas mais antigas utilizadas em Engenharia Civil, e ainda está em grande desenvolvimento (SILVA, 2010). Há mais de 3000 anos o melhoramento de solos já era aplicado na construção de templos da antiga Babilônia (CRISTELO, 2001).

A estabilização e o melhoramento de solos instáveis com o uso da cal é uma técnica muito antiga, sendo registrado seu uso no sul da Itália, na Via Apia, edificada no ano 312 a.C. e, num trecho da muralha da China, datado de 228 a.C. (GUÉRIOS, 2012).

O emprego da cal como estabilizante de solos remonta há aproximadamente 5000 anos atrás, tendo sido encontrados nas Pirâmides de Shersi no Tibete o uso de uma mistura de cal e argila compactadas (GREAVES, 1996 apud SILVA, 2010).

No final da década de 40 do século XX, iniciou-se nos EUA a aplicação de técnicas laboratoriais de Mecânica dos Solos para a análise das misturas solo-cal, sendo amplamente empregada a partir da década de 50, na construção de milhares de quilômetros de autoestradas (SILVA, 2010).

França e Alemanha empregam a estabilização de solos com cal não apenas visando o aumento da resistência, mas também buscando uma melhoria na trabalhabilidade do material (AZEVEDO, 2010).

No Brasil há muitos estudos sobre solo-cal, possuindo algumas obras experimentais com o emprego da mistura solo-cal, datadas entre os anos de 1970 e 2000, das quais podem ser citadas a duplicação da rodovia BR-040, trecho Belo Horizonte – Sete Lagoas e a adição de cal ao subleito da rodovia BR-381 entre Nepomuceno/MG e Três Corações/MG (AZEVEDO, 2010).

### **3.4.2 Estabilização de solos através da cal**

O solo-cal é uma mistura de solo, cal e água em quantidades estabelecidas em ensaios laboratoriais, gerando um produto capaz de ser utilizado em qualquer camada do pavimento, exceto o revestimento asfáltico devido à ausência de solo nesta camada, sendo seu uso para apenas melhorar a adesividade e a granulometria da mistura asfáltica. (AZEVEDO, 2010).

Ao se misturar uma determinada quantidade de cal a um solo, iniciam-se imediatamente reações químicas que alteram as propriedades geotécnicas do solo, tais como a plasticidade a granulometria, a quantidade de finos e a capacidade de carga da mesma, sendo estas características dependentes de outros fatores como o tipo de solo a ser estabilizado, o teor de cal empregado na mistura, o tempo, a temperatura de cura, dentre outros aspectos.

A estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica o que não é somente possível como provável (CRISTELO, 2001).

Sobre as vantagens da estabilização com cal, Silva (2010) afirma:

A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e económico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactes (*sic*) ambientais.

Em alguns tipos de solo, principalmente solos siltosos e argilosos, a mistura de solo-cal nem sempre atinge as propriedades desejadas como uma maior resistência, mesmo após um longo período de “cura” (OLIVEIRA, F. 2005).

Um estudo realizado por RIZZO e LOLLO (2006) utilizando cal em um solo arenoso siltoso (72% de areia, 10% de silte e 8% de argila) constatou que com o aumento do teor de cal aumenta a umidade ótima e reduz o valor da massa específica aparente seca.

Na Figura 12 são mostradas as etapas da estabilização de um solo com emprego da cal. Para executar a mistura do solo com a cal deve se primeiro distribuir os sacos de cal pela extensão da área a ser estabilizada (1), abrir os sacos de cal e posteriormente lançando sobre o solo (2). Em seguida o solo é homogeneizado com o auxílio de máquinas como uma motoniveladora (3), (4).

O solo também pode ser misturado com a cal através da utilização de um veículo munido com um equipamento de mistura sendo acrescentada água caso seja necessário (SILVA, 2010). Também pode ser empregada uma usina de mistura de solos (AZEVEDO, 2010).

Figura 12 – Etapas da estabilização de solos com cal



Fonte: (ARAÚJO, 2009)

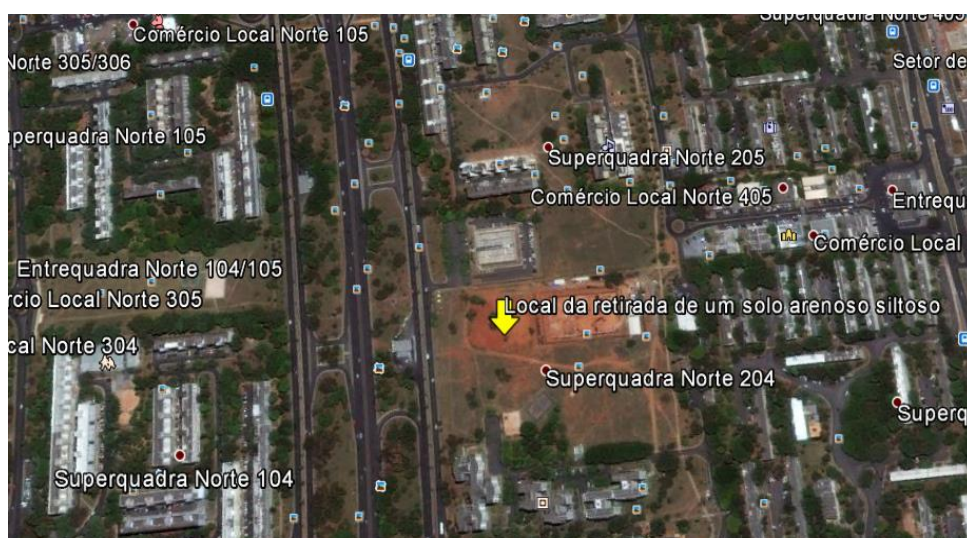
## 4. MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO

### 4.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Localização da amostra do solo ensaiado

Para a realização dos ensaios geotécnicos foi retirada de uma obra comercial situada em Brasília-DF, na SQN 204 Norte, uma amostra deformada de um solo arenoso siltoso. Nas Figuras 13 e 14 são mostradas as imagens do local da obra cujas coordenadas geográficas são: latitude  $15^{\circ}46'28''$  Sul e longitude  $47^{\circ}52'47''$  Oeste. Foi empregado este solo devido à necessidade de estudar o comportamento de solos provenientes de escavação de obras em Brasília-DF.

Figura 13 – Localização da amostra deformada de um solo arenoso siltoso



Fonte: Google Earth

Figura 14 – Vista superior do local da obra



Fonte: Google Earth

Foi feita a coleta 120 kg de amostra de solo (Figura 15) conforme a norma ABNT NBR 9604/86 – Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas, as amostras foram levadas ao laboratório de geotecnia, situado no bloco 11 do UniCEUB, campus Asa Norte, onde foram devidamente preparadas de acordo com a norma NBR 6457/86 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, para execução dos ensaios, cuja metodologia é apresentada neste capítulo.

Figura 15 – Retirada de amostra de um solo arenoso siltoso



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.1.2 Caracterização da cal

Na execução dos ensaios laboratoriais utilizou-se a cal hidratada Supercal CH III (Figura 16) como material estabilizante do solo ensaiado, sendo produzida pela empresa ICAL – Indústria de Calcinação Ltda, do município de Pains/MG.

Figura 16 – Cal Hidratada Supercal CH III



Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

### 4.2.1 Análise Granulométrica

O solo a ser ensaiado é submetido a uma análise granulométrica para conhecer a distribuição do solo nas várias dimensões de grãos encontrados na natureza. Através deste ensaio é possível determinar uma curva de distribuição granulométrica, cuja finalidade é classificar o solo.

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 7181/84 – Solo - Análise Granulométrica. Foi feito também o ensaio de sedimentação para complementar a curva granulométrica mostrando a fração fina do solo que passa na peneira 0,075 mm. A amostra foi secada ao ar (1), destorroada com auxílio do almofariz (2) e dela foi tomado 2 kg para a execução da análise granulométrica (3). Foram tomadas três amostras do solo para determinação da umidade higroscópica que será utilizada nos demais ensaios de caracterização. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é exibida a preparação da amostra.

Figura 18 – Preparação da amostra de solo a ser ensaiada



Fonte: Elaborada pelo autor

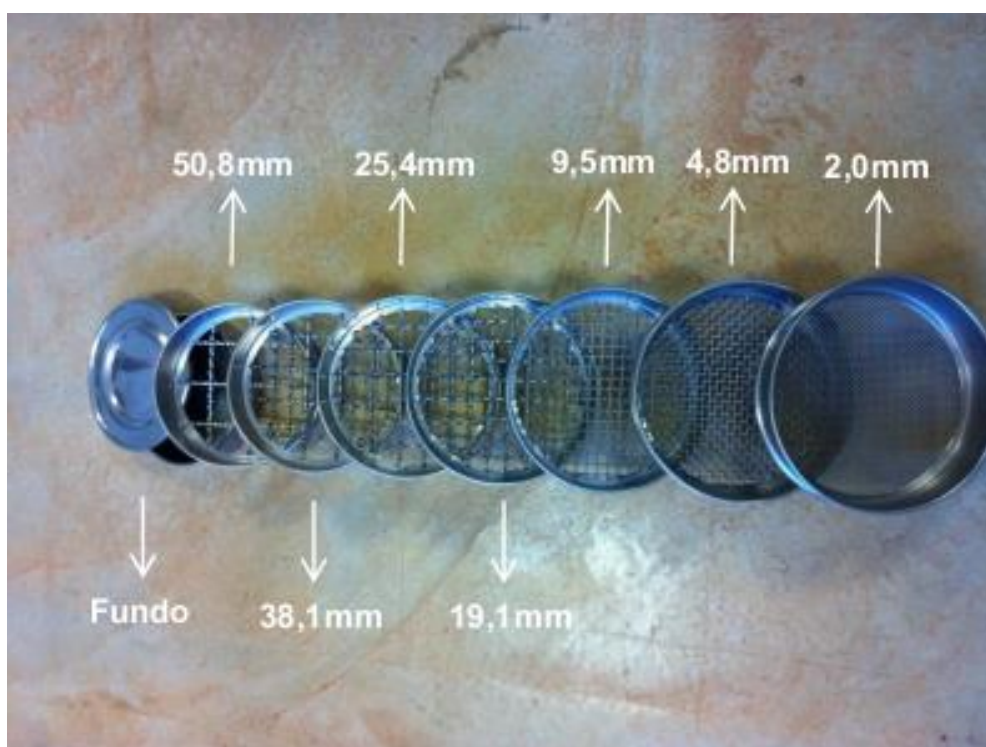


Para obter a porcentagem de cada diâmetro de partícula foram utilizadas peneiras de diferentes tamanhos de acordo com a norma ABNT NBR 5734 – Peneiras para ensaio - Especificação.

#### 4.2.1.1 Peneiramento Grosso

Iniciou-se o peneiramento grosso como rege a NBR 7181/84, passando a amostra na peneira 2,00 mm para a retirada da fração grossa do solo que, para desagregar as partículas finas de solo aderidas aos grãos de maior dimensão, é lavada e depois levada para a estufa. Após a secagem do material, a amostra é passada por uma série decrescente de peneiras, desde a peneira 50,8 mm até a peneira 2,00 mm como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 19 – Peneiras para granulometria grossa



Fonte: (SOUZA, 2013)

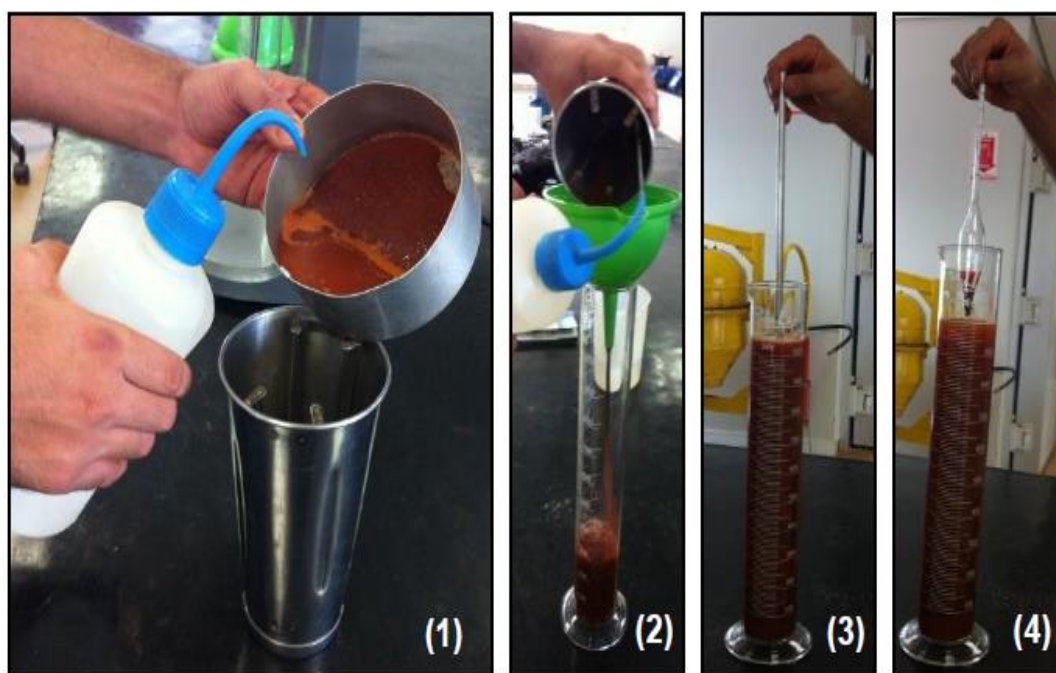
#### 4.2.1.2 Sedimentação

O ensaio de sedimentação foi feito em duas etapas: com defloculante, utilizando o hexametáfosfato de sódio em uma solução de 125 ml, com a concentração de 45,7 g de sal por 1000 ml de solução e sem defloculante no qual é apenas adicionada água destilada.

Conforme a NBR 7181/84, preparou-se então duas amostras de 70 g, uma misturada com defloculante e a outra com água destilada, ficando em descanso por cerca de 12 horas para que o defloculante desagregue as partículas do solo.

Após este período a amostra é levada ao dispersor elétrico ficando em dispersão por um período de 15 minutos (1), depois é transferida para uma proveta de 1000 ml (2). Então é adicionada água destilada até atingir o nível correspondente a 1000 ml e a seguir é feita uma agitação do material durante um minuto para por as partículas de solo em suspensão (3). A partir deste momento começam as leituras com o densímetro (4), sendo que deve-se mergulhar o densímetro calmamente para não interferir no resultado. Depois da terceira leitura também afere-se a temperatura da dispersão. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as etapas de execução do ensaio de sedimentação.

Figura 20 – Sequência de procedimentos para a sedimentação



Fonte: (SOUZA, 2013)

#### 4.2.1.3 Peneiramento fino

Fez-se a última leitura após 24 horas desde o início da sedimentação, sendo que depois o material foi despejado na peneira 0,075 mm, lavado com água potável e levado para a estufa de acordo com a NBR 7181/84. Logo após o material foi submetido ao peneiramento fino, passando a amostra por uma série de peneiras com aberturas de malhas diferentes em ordem decrescente.

## 4.2.2 Limites de Atterberg

### 4.2.2.1 Limite de Liquidez

Este ensaio é padronizado pela norma da ABNT NBR 6459/84 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e para sua execução foi utilizado o Aparelho de Casagrande elétrico (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 21 – Aparelho de Casagrande

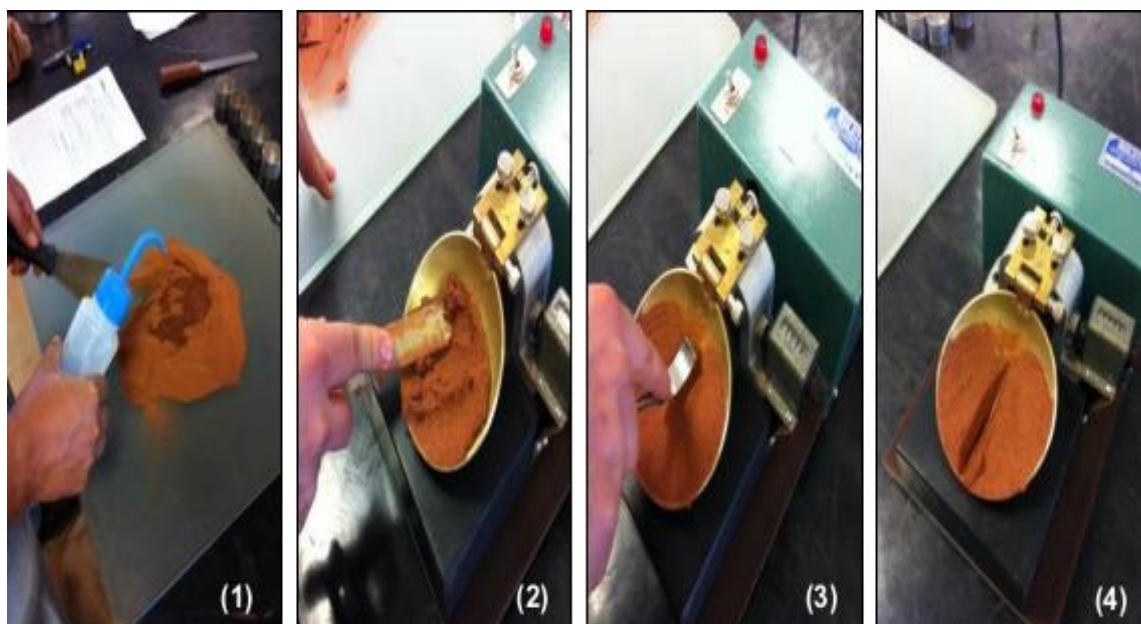


Fonte: (SOUZA, 2013)

Primeiramente foi tomada uma amostra de 200 g de solo conforme a NBR 6457/86 da qual 100 g é para determinação do limite de liquidez e 100g para o limite de plasticidade. A seguir procede-se à homogeneização da amostra, acrescentando água ao solo e com o auxílio de uma espátula fazer movimentos vigorosos, amassando e revolvendo a amostra de forma a atingir uma consistência de tal forma que sejam necessários 35 golpes para o fechamento de um sulco feito na massa de solo.

Após a homogeneização da amostra (1), a massa de solo foi posta na concha do aparelho de Casagrande (2) e com a ajuda de um cinzel específico para solos argilosos foi feita uma ranhura na amostra com cerca de 1 cm de largura (3) de modo que as duas frações de solo possuíssem massas praticamente idênticas (4). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrada a sequência deste ensaio.

Figura 22 – Sequência do ensaio de determinação do limite de liquidez



Fonte: (SOUZA, 2013)

Em seguida foi ligado o aparelho de Casagrande que efetuou golpes regulares contra a base até a ranhura se fechar. Anotou-se o número de golpes aplicados e retirou-se uma porção do solo da concha para determinação do teor de umidade. A parte restante retornou para a amostra inicial onde foi adicionada água necessária para a determinação do próximo ponto. Segundo a norma NBR 6459/84 a operação descrita acima é repetida para determinar o 2º ponto de ensaio e também os três pontos dentro do intervalo de 15 golpes a 35 golpes.

Depois de homogeneizada, toma-se uma porção de 10 g de solo para confecção do cilindro que precisa se fragmentar ao atingir aproximadamente o diâmetro de 3 mm, caso contrário devolve-se o solo à amostra inicial, corrige-se a umidade da amostra e efetua-se nova homogeneização do mesmo.

Repete-se a operação até que o cilindro se fragmente com 3 mm de diâmetro. Logo após o molde é colocado em cápsulas para encontrar o teor de umidade, sendo necessário no mínimo de mais três valores de umidade. O ensaio foi repetido até obter-se 5 teores de umidade, cuja média aritmética resulta no limite de plasticidade.

#### 4.2.3 – Massa específica real dos grãos

Para a determinação da massa específica real dos grãos foram tomadas três amostras de 50 g passadas na peneira 2,00 mm como orienta a norma brasileira NBR 6508/84 – Grãos de solo que passam na # 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. A amostra foi imersa em água destilada, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e colocada em repouso por aproximadamente 12 horas.

Figura 23 – Amostras imersas em água destilada



Fonte: Elaborada pelo autor

Depois a amostra foi transferida para o copo de dispersão, removendo com água destilada o excesso de material contido na cápsula. Colocou-se um papel filme vedando a boca do copo do dispersor, com um furo para passagem das hélices removíveis, para evitar a perda de amostra. Deixou-se a amostra dispersar por 15 minutos no aparelho de dispersão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

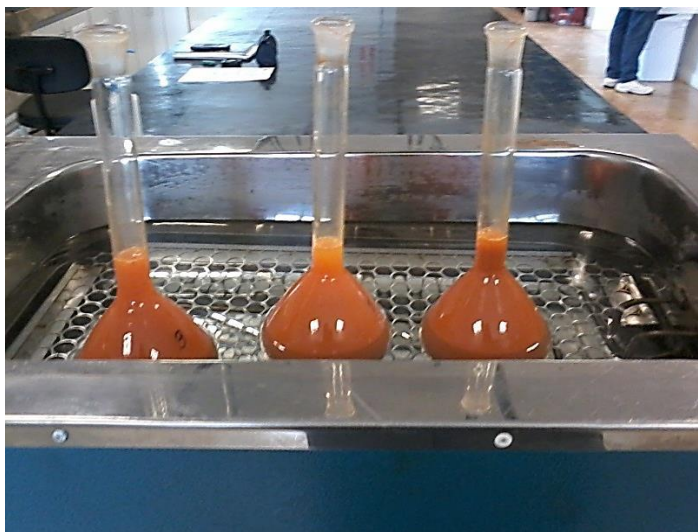
Figura 24 – Aparelho de Dispersão



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o auxílio do funil despejou-se nos picnômetros as amostras que estavam nos dispersores, removendo com água destilada os resíduos de solo que estavam dentro dos copos. Os picnômetros foram postos em banho-maria durante 15 minutos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

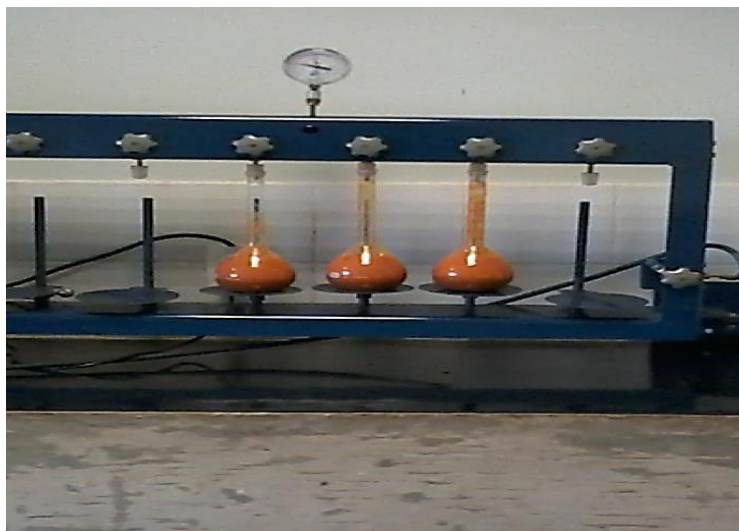
Figura 25 – Picnômetros em banho-maria



Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, os picnômetros foram colocados na bomba de vácuo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) por 15 minutos para extrair o ar contido na amostra de forma que haja poucas moléculas de ar o que pode ser percebido pela estabilização da suspensão.

Figura 26 – Amostras na bomba de vácuo



Fonte: Elaborada pelo autor



Retirou-se os picnômetros da bomba de vácuo e os levou de volta ao banho-maria por mais 15 minutos, completando com água destilada até 1 cm abaixo do menisco de cada picnômetro. Logo após esse período os picnômetros foram colocados para fora até atingir a temperatura ambiente.

Foi pesado o conjunto picnômetro + água + solo e também mediu-se a temperatura de cada um deles. Com o auxílio da tabela de calibração dos picnômetros e dos valores de temperatura aferidos, pôde-se calcular a massa do conjunto picnômetro + água.

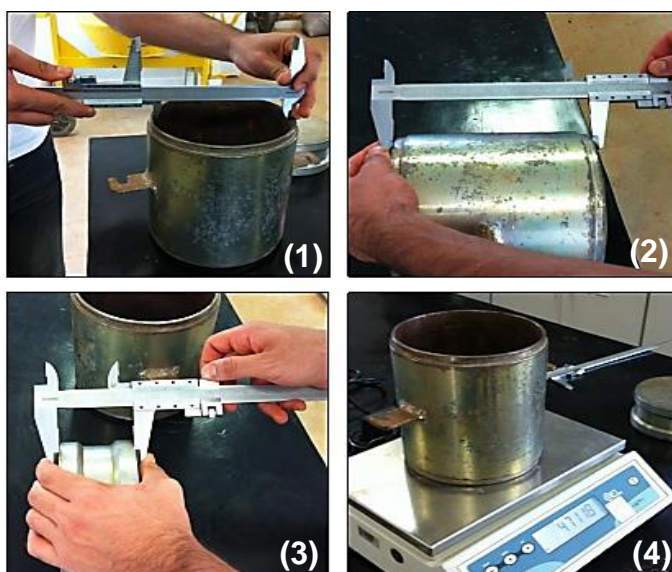
Por fim com o auxílio da tabela Massa Específica da Água, em  $\text{g/cm}^3$ , entre  $0^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$  anexo à norma NBR 6508/84 encontraram-se os valores da massa específica da água para a temperatura de cada picnômetro e anotou-se como  $\delta_T$ .

#### 4.2.4 – Ensaio de Compactação

Para a execução dos ensaios de compactação foi consultada a norma NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de Compactação, que visa determinar a relação entre a umidade ( $w\%$ ) e o peso específico seco dos solos ( $\gamma_d$ ) quando compactados.

Para iniciar a compactação é necessário anotar as medidas do molde cilíndrico tais como o diâmetro (1), a altura do cilindro (2), a altura do disco espaçador (3) e o peso do cilindro metálico (4). A sequência é exibida na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 27 – Parâmetros dos cilindros



Fonte: (SOUZA, 2013)

Depois de tomados estes valores, pesa-se a quantidade de solo a ser compactado que segundo a orientação da NBR 6457/86 que no ensaio em estudo foi 4,5 kg. Deste solo foi retirado três amostras para determinar o teor de umidade que é muito importante para traçar a curva de compactação. Verifica-se então a umidade natural do solo e adiciona-se uma quantidade de água aproximadamente perto do teor de umidade ótimo.

Depois, a amostra é homogeneizada (1) e tomada uma porção de solo para efetuar-se a compactação do solo. Como este estudo visa à aptidão do solo para compor uma base rodoviária usou-se a energia de compactação modificada, cuja NBR 7182/86 recomenda a execução de 55 golpes em 5 camadas.

Aplica-se 55 golpes com o soquete grande por camada de solo (2), sendo que entre as camadas é feita uma escarificação da camada subjacente de forma a obter-se uma aderência entre elas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 28 – Compactação dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a compactação da última camada é removido o colarinho posto para garantir a quantidade de camadas exigida pela NBR 7182/86 e faz-se uma regulação do molde com o auxílio de uma régua biselada. Do excesso de solo retiraram-se três amostras para encontrar o teor de umidade e pesou-se o conjunto cilindro + solo.

Como o objetivo desta pesquisa foi à estabilização do solo ensaiado escolheu-se tratá-lo com 6%, 8% e 10% de cal. Como o solo é arenoso siltoso empregou-se uma maior quantidade de estabilizante.

Este ensaio foi repetido cinco vezes para cada mistura obtendo-se uma curva de compactação para o solo natural e três para o solo-cal nos teores de 6%, 8% e 10%, sendo que nas misturas de solo-cal acrescentam-se as etapas de pesagem da cal, com porcentagem definida em massa e a homogeneização com o solo ensaiado.

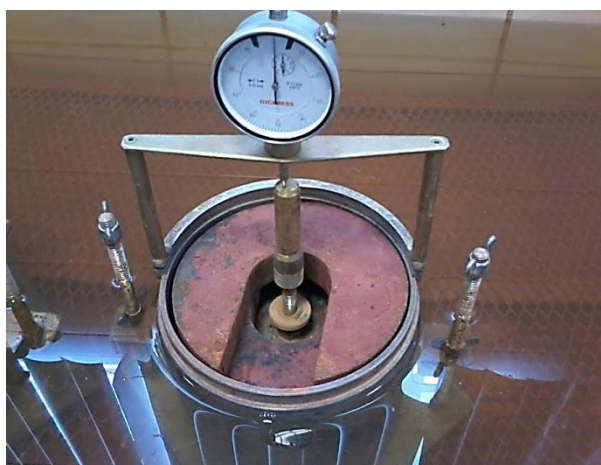
#### 4.2.5 – Expansão

Posterior às moldagens dos corpos de prova na umidade ótima e nos correspondentes teores de cal efetuou-se o ensaio de expansão dos solos conforme a norma brasileira NBR 9895/87 - Solo - Índice de Suporte Califórnia.

Primeiro tomou-se o cilindro com o solo compactado e retirou-se o disco espaçador de cada corpo de prova. Inverteu-se o molde e no lugar do disco espaçador foi colocado um prato-base furado com a haste de expansão e acima deste foi posto dois discos anelares. Sobre a haste de expansão foi apoiado o extensômetro acoplado ao porta-extensômetro para medir a expansão do solo.

Depois os corpos de prova foram totalmente imersos em água (Figura 29) por um período de quatro dias, valor mínimo segundo a NBR 9895/87. Efetuaram-se também as leituras no extensômetro de 24 em 24 horas segundo a referida norma.

Figura 29 – Amostra imersa em água



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.6 – Ensaio de Compressão Simples

A resistência à compressão simples é o parâmetro mais empregado na avaliação das características das misturas de solo-cal (ARAÚJO, 2009).

Apesar de não haver uma norma específica que oriente a execução deste ensaio para misturas de solo-cal, foi utilizado o procedimento descrito na norma NBR MB 3361/90 – Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, conforme os itens 5.2.1 e 5.2.2 da referida norma.

Primeiro extraiu-se os corpos de prova do cilindro com auxílio de um extrator de amostras hidráulico e levou-se para pesagem de cada molde. Os corpos de prova em média possuíam 11,44 cm de altura e 15,10 cm de diâmetro. Depois, foi colocado o corpo de prova na base da prensa de compressão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**30) e acima deste foi posta outra base metálica de modo a minimizar qualquer irregularidade entre a superfície do molde e a prensa.

Figura 30 – Prensa de Compressão EMIC PCE 100 C



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a ruptura do solo, quando não há nenhum acréscimo de resistência, o molde é retirado da prensa para realizar o próximo rompimento. Foram rompidos os moldes de solo natural e de solo-cal nos teores de 6%, 8% e 10%, todos compactados na umidade ótima.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios expostos na metodologia. Esta análise pretende observar os parâmetros de estabilidade do solo quando submetido a uma mistura com cal e verificar se requisitos técnicos exigidos para construção de base rodoviária foram atingidos.

### 5.1 GRANULOMETRIA

Conforme exposto na metodologia deste trabalho a análise granulométrica é composta por peneiramento grosso e, após a sedimentação, o peneiramento fino. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

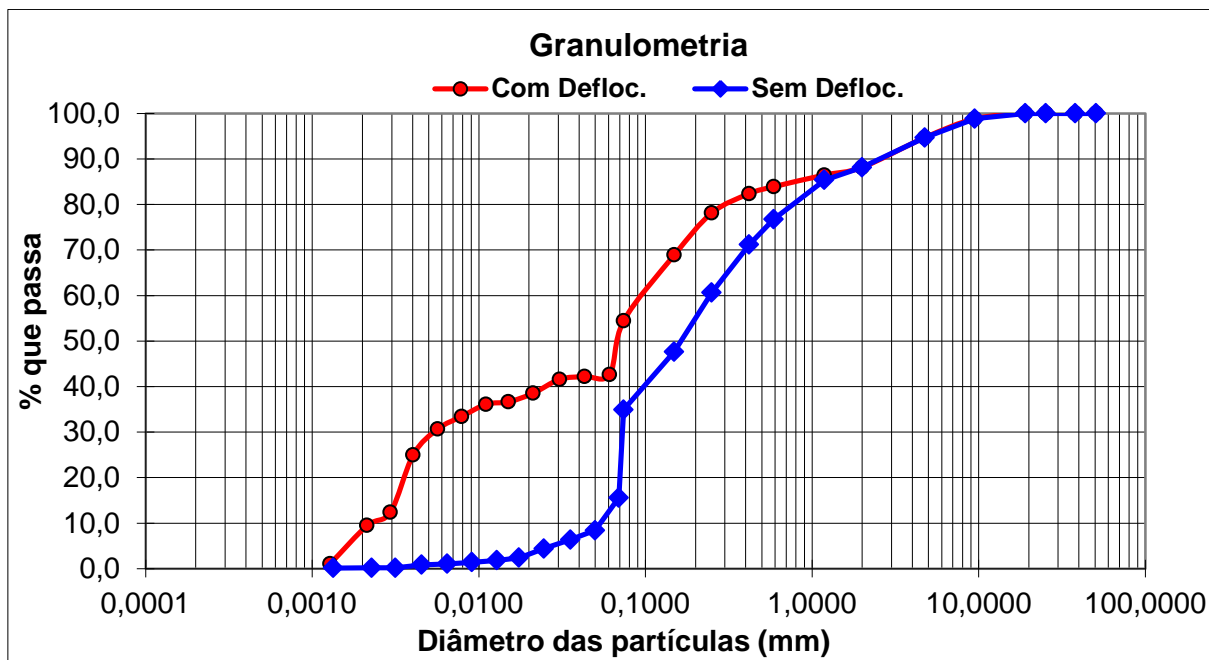
Tabela 7 – Peneiramento Grosso e Fino

<b>Peneira</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Solo retido(g)</b>	<b>Solo retido acumulado (g)</b>	<b>% de material que passa</b>
2"	50,8	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	22,78	22,78	98,84
4	4,76	81,14	103,92	94,71
10	2,00	128,50	232,42	88,16
16	1,19	1,31	1,31	86,5
30	0,59	1,99	3,30	83,9
40	0,42	1,20	4,50	82,4
60	0,25	3,30	7,80	78,1
100	0,149	7,18	14,98	68,9
200	0,075	11,24	26,22	54,4

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrada a curva granulométrica com e sem defloculante do solo estudado.

Figura 31 – Curva Granulométrica com e sem defloculante



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Ao analisar a curva granulométrica por sedimentação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) verificou-se que a amostra ensaiada sem defloculante apresenta 76% das partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 0,2 mm, identificando o solo como arenoso. Dessa porcentagem, 42,10% é classificada como areia fina, 22,70% como areia média e 11,30% como areia grossa.

Observou-se que 12% das partículas estão na faixa que corresponde ao silte, entre 0,002 mm e 0,06 mm, classificando o solo como uma areia siltosa.

No ensaio de sedimentação com defloculante, O solo apresentou cerca de 45,56% de grãos com diâmetro entre 2,0 mm e 0,2 mm (areia) enquanto as partículas na faixa entre 0,02 mm e 0,06 mm (silte) alcançaram cerca de 34,50% identificando o solo como uma areia siltosa. Todos os dados referentes a granulometria do solo ensaiado são apresentados na Tabela .

Tabela 8 – Granulometria do solo ensaiado

<b>MATERIAL</b>	<b>Diâmetro mm</b>	<b>Sem defloculante % do material</b>	<b>Com defloculante % do material</b>
Pedregulho grosso	20,0 a 60,0	0,00	0,00
Pedregulho médio	6,0 a 20,0	4,20	4,20
Pedregulho fino	2,0 a 6,0	7,60	7,60
Areia grossa	0,6 a 2,0	11,30	4,20
Areia média	0,2 a 0,6	22,70	10,40
Areia fina	0,06 a 0,2	42,10	31,00
Silte	0,002 a 0,06	12,00	34,50
Argila	<0,002	0,20	8,10
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

## 5.2 LIMITES DE ATTERBERG

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados dos limites de Atterberg, tanto do limite de liquidez quanto do limite de plasticidade. Na Figura 32 é apresentado um gráfico que mostra a curva do limite de liquidez.

Tabela 9 – Resultado do Limite de Liquidez

<b>LIMITE DE LIQUIDEZ</b>					
<b>N° da capsula</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>39</b>	<b>44</b>
<b>N° de golpes</b>	35	31	27	23	18
<b>Tara (g)</b>	14,47	13,73	13,94	13,95	13,23
<b>Tara + SH (g)</b>	39,16	35,43	38,18	36,08	47,34
<b>Tara + SS (g)</b>	32,26	29,16	30,80	29,03	36,07
<b>Umidade (%)</b>	38,79	40,64	43,77	46,75	49,34
				<b>LL (%):</b>	<b>44,55 %</b>

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

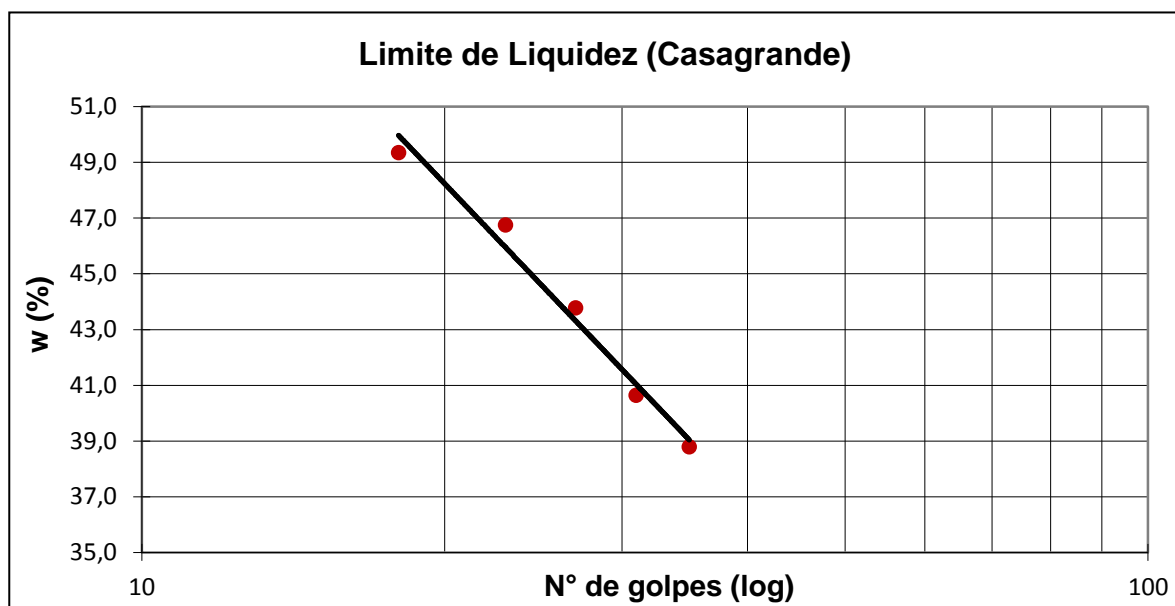


Tabela 10 – Resultado do Limite de Plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE					
N° da capsula	68	77	91	97	99
Tara (g)	5,73	6,18	5,94	5,94	5,67
Tara + SH (g)	8,52	8,56	7,85	8,28	7,72
Tara + SS (g)	7,91	8,05	7,45	7,78	7,28
Umidade (%)	28,0	27,3	26,5	27,2	27,3
				<b>LP (%):</b>	<b>27,25 %</b>

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Figura 32 – Curva do Limite de Liquidez



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Na Tabela 11 é mostrado um resumo dos limites de Atterberg.

Tabela 11 – Limites de Atterberg

SOLO	LIMITE DE LIQUIDEZ	LIMITE DE PLASTICIDADE	IP
Areia Siltosa	44,55 %	27,25 %	17,31 %

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Na Tabela 12 é apresentada a classificação de Burmister para o Índice de Plasticidade de acordo com a qual o solo possui uma plasticidade média (BURMISTER, 1949 apud DAS, 2007).

Tabela 2 – Classificação de Burmister para o Índice de Plasticidade

<b>IP</b>	<b>Descrição</b>
0	Não-plástico
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade média
20 – 40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: (DAS, 2007)

### 5.2.1 Índice de Plasticidade

Conforme a revisão teórica o índice de plasticidade é obtido a partir da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. O valor do índice de plasticidade do solo ensaiado é apresentado na Tabela .

Tabela 13 – Índice de Plasticidade

<b>ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%):</b>	
LL (%) – LP (%)	44,55 – 27,25
<b>IP% = 17,3 %</b>	

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

### 5.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

O valor da massa específica do solo deste estudo é de aproximadamente 2,69 g/cm<sup>3</sup> conforme apresenta a Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado do ensaio de massa específica real dos grãos

Massa específica dos grãos # 2mm			
Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Picnômetro N°	1	9	13
Temperatura (°C)	23,6	23,7	23,5
Pic. + água (g)	669,60	673,68	670,07
Pic. + água + solo(g)	700,41	705,14	700,93
G ( g/cm3)	2,69	2,79	2,70
		<b>G<sub>s</sub>:</b>	<b>2,69</b>

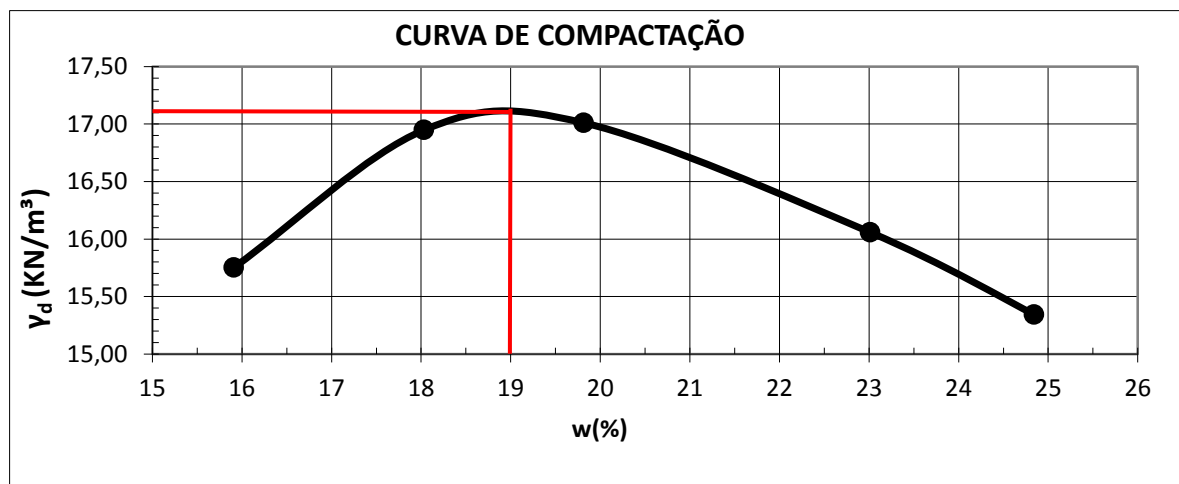
Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

## 5.4 COMPACTAÇÃO

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrada a curva de compactação do solo em estudo classificado como arenoso siltoso, sem adição de cal.

Constatou-se que o solo arenoso siltoso possui um teor de umidade ótima de compactação com cerca de 19% e uma densidade aparente seca de 17,10 kN/m<sup>3</sup>

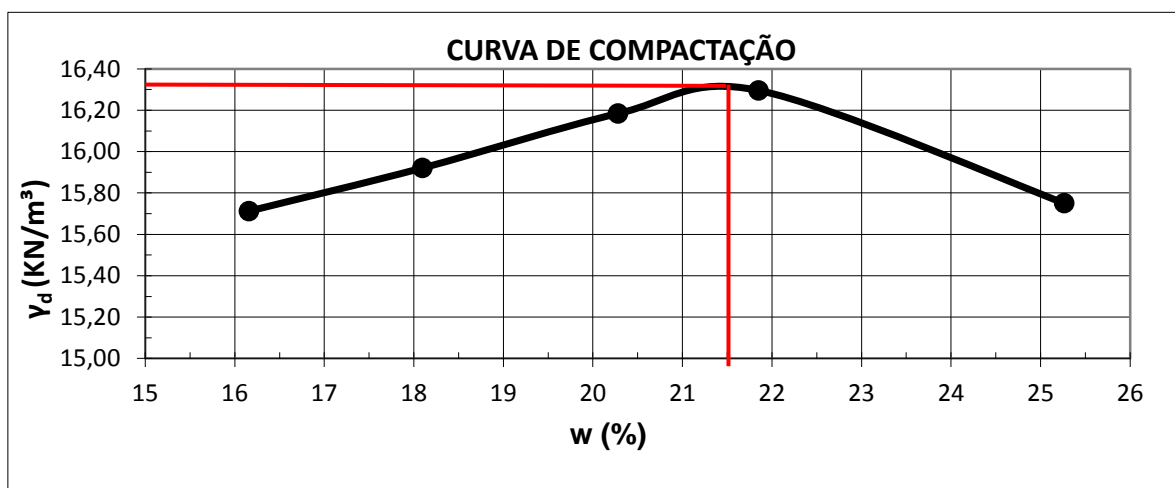
Figura 33 – Curva de compactação – Solo Natural



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o resultado da curva de compactação para o solo ensaiado com a adição de 6% de cal. Verificou-se que este solo possui um teor de umidade de aproximadamente 21,50% e uma densidade aparente seca de 16,34%.

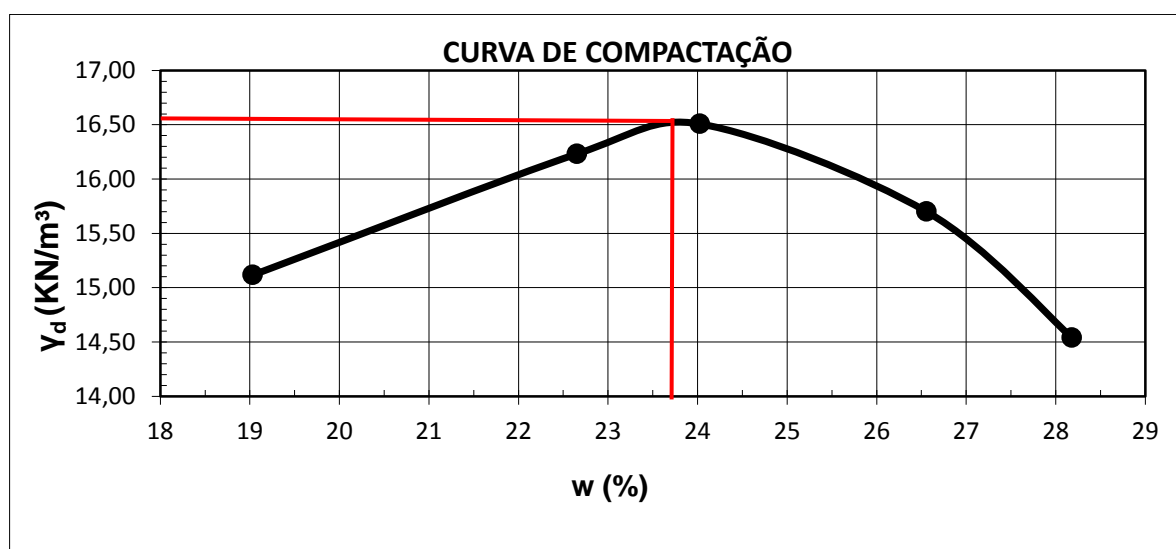
Figura 34 – Curva de compactação – Solo com adição de 6% cal



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a curva de compactação da amostra com adição de 8% de cal ao solo natural e constatou-se que esta possui um teor de umidade com cerca de 23,75% e uma densidade aparente seca de 16,52%.

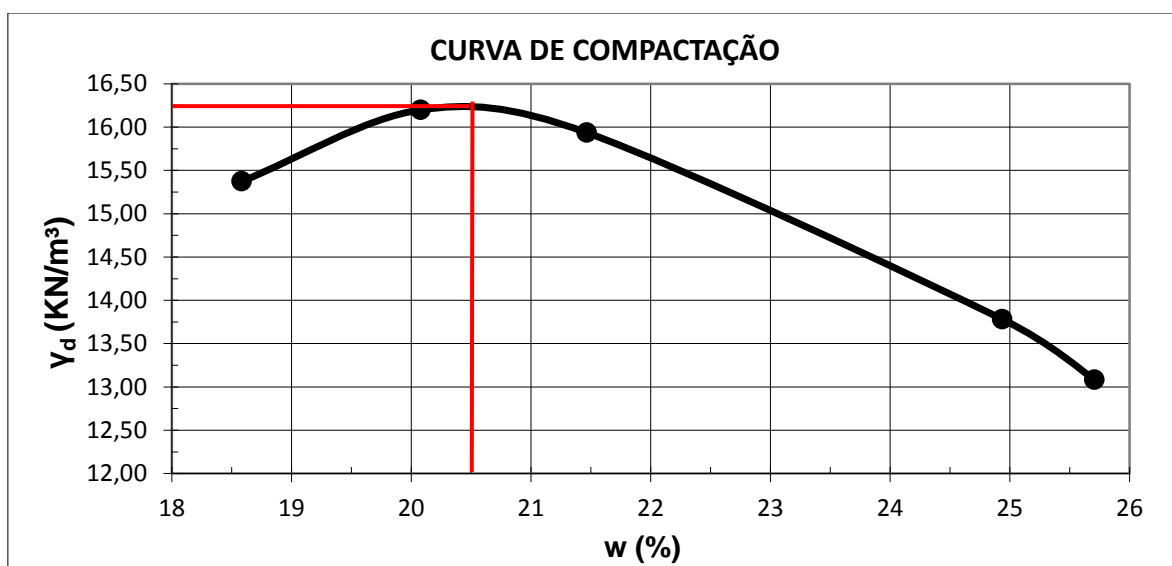
Figura 35 – Curva de compactação – Solo com adição de 8% cal



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a curva de compactação da mistura solo-cal com teor de 10% em massa de cal e verificou-se que esta apresenta um teor de umidade com cerca de 20,50% e uma densidade aparente seca de 16,25%.

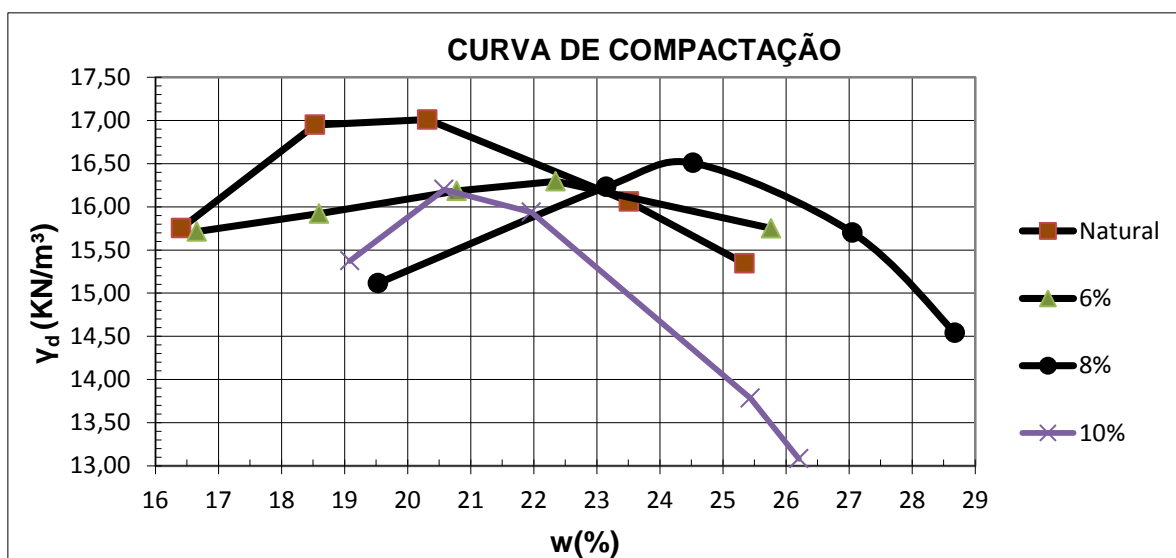
Figura 36 – Curva de compactação – Solo com adição de 10% cal



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Ao se comparar as curvas de compactação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e verificou-se que quanto maior o teor de cal foi adicionado ao solo em estudo, maior foi a umidade ótima (exceto para o teor de 10%) e menor foi a densidade aparente seca do solo (exceto para o teor de 8%).

Figura 37 – Comparação entre as curvas de compactação



Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Ao analisar a Figura 37 percebe-se que quando se eleva o teor de cal a curva de compactação se desloca para a direita do gráfico, verificando-se um aumento no valor da umidade ótima. O inverso ocorre com o peso específico aparente seco que diminui com o aumento do teor de cal, isto é a curva se desloca para o canto inferior do gráfico.

### 5.3 ENSAIO DE EXPANSÃO

Observou-se a ocorrência de uma contração de 0,07% do solo natural. Também houve contração nas amostras com 6% e 8% de cal. No corpo de prova com teor de 10% de cal ocorreu uma expansão de aproximadamente 0,1%. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o corpo de prova com solo natural submetido ao ensaio de expansão. Observou-se um retrocesso do ponteiro do extensômetro.

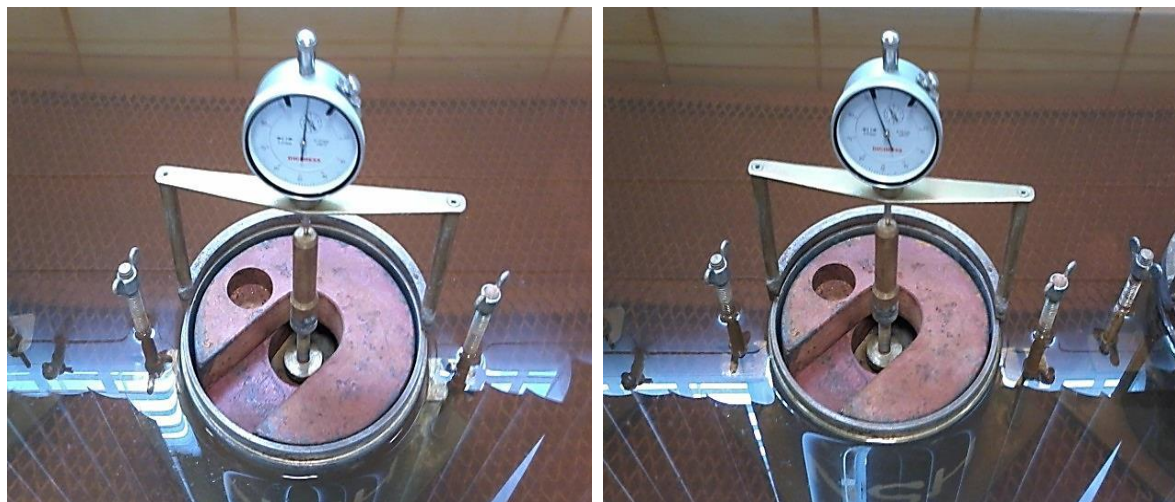
Verificou-se que quanto maior o teor de cal maior é a expansão da mistura. Isto pode ter ocorrido devido à qualidade da cal CH III ser inferior aos outros tipos de cal devido à presença maior de impurezas e de óxidos de cálcio não totalmente hidratados. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrado o resultado do ensaio de expansão dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 15 – Expansão dos solos ensaiados

Teor de Cal (%)	Expansão (%)
0%	-0,070%
6%	-0,044%
8%	-0,004%
10%	0,094%

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB

Figura 38 – Contração do solo natural



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os moldes que correspondem ao solo natural e o solo-cal nos teores de 6% e 8% foram submetidos à expansão. Como este ensaio iniciou-se em uma terça-feira (porém ele é comumente feito numa segunda-feira) os corpos de prova ficaram submersos por 6 dias, enquanto a amostra com a mistura de 10% de cal ficou imersa por apenas 4 dias, período mínimo para a verificação da expansão do solo. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples, resultando no valor da tensão de ruptura do corpo de prova. Os valores das tensões de ruptura correspondentes a cada molde são exibidos na **Erro! Autoreferência de indicador não válida..**

Tabela 16 – Resistência à compressão simples

Teor de Cal	W ótimo (%)	$\gamma_d$ máx (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ganho de Resistência
0%	19,0	17,1	2,99	-
6%	21,5	16,3	6,25	109%
8%	23,8	16,5	3,52	18%
10%	20,5	16,3	6,94	133%

Fonte: Laboratório de Geotecnia do UniCEUB



A resistência do solo natural foi equivalente a 2,99 kgf/cm<sup>2</sup>. Com a adição de 6% de cal houve um ganho de resistência de 109%, atingindo uma resistência de 6,25 kgf/cm<sup>2</sup>.

O resultado do ensaio para o corpo de prova com 8% de cal não foi satisfatório, sendo rompido com uma tensão de 3,52 kgf/cm<sup>2</sup> que equivale a um aumento de 18% na resistência inicial. Na amostra com 10% de cal houve uma elevação na resistência maior que 100%, atingindo este a ruptura com uma tensão de 6,94 kgf/cm<sup>2</sup>.

Nota-se uma relação entre o teor de cal e a resistência à compressão simples na qual o aumento do teor cal gera um aumento na resistência á compressão, como pode ser percebida em todos os corpos de prova exceto por aquele com 8% de cal.

Esta divergência pode ser explicada devido ao solo em questão ser um solo arenoso siltoso e que conforme exposto na revisão teórica estes solos nem sempre atingem as propriedades desejadas quando a eles é adicionado cal.

## 6. CONCLUSÃO

Observou-se que a mistura solo-cal é uma solução muito empregada para estabilizar solos, principalmente quando o solo *in situ* não atende aos requisitos exigidos para realização de uma obra geotécnica.

A pesquisa mostrou que de uma forma geral o incremento de cal aumenta a umidade ótima do solo e diminui seu peso específico aparente seco, assim como ocorreu com o solo estudado por Rizzo e Lollo (2006)

Embora o solo estudado por Rizzo e Lollo (2006) seja diferente do solo desta pesquisa, ambos possuem a mesma quantidade de argila (8%) demonstrando a influência das argilas na estabilização de solos.

Verificou-se que uma elevação do teor de cal na mistura faz elevar a resistência à compressão, sendo que na amostra com 10% de cal (que apresentou maior resistência que os demais) o ganho de resistência chega a mais que 100 %.

Entretanto o solo não obteve o valor mínimo exigido pela norma do DNIT 143/2010 que aponta como resistência mínima o valor de 21 kgf/cm<sup>2</sup>, sendo que o valor máximo atingido foi de 6,94 kgf/cm<sup>2</sup> para a amostra com 10% de cal, podendo este resultado ser consequência da falta de uma cura adequada, já que este corpo de prova foi retirado do tanque de imersão com apenas 4 dias.

O valor máximo para o limite de liquidez foi ultrapassado, atingindo 44,55% sendo recomendado o limite de no máximo 40%, porém os limites de granulometria e o índice de plasticidade do solo em estudo tiveram êxito.

Conclui-se que o solo estudado não é um solo adequado para compor a base de um pavimento rodoviário, devendo ser feitos outros estudos tendo em vista possíveis aplicações deste solo em outras camadas do pavimento.

## 6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para futuras pesquisas apresenta-se os seguintes temas:

- ✓ Estudar outras misturas de solo arenoso com cal;
- ✓ Estudar misturas de solo estabilizado com cal e vermiculita;
- ✓ Estudar misturas de solo arenoso com cal diluído;
- ✓ Comparar os três tipos de cal (CH I, CH II e CH III) em uma estabilização de solo;
- ✓ Estabilização de solos para compor as camadas de um aterro sanitário;
- ✓ Realizar uma estabilização granulométrica com Resíduos de Construção e Demolição (RCD's).

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5734**. Peneiras para Ensaio. Rio de Janeiro. 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**. Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro. 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passaram na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**. Solos - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**. Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação. Rio de Janeiro. 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**. Solos - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9604**. Abertura em poços e trincheiras de inspeção em solo para retirar amostra deformada e indeformada. Rio de Janeiro. 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895**. Índice Suporte Califórnia - CBR. Rio de Janeiro. 1987.

AZEVÊDO, André Luis Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.

ARAÚJO, Arielton Fonteles. **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**, 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

BERNUCCI et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Volume 1, 1976.

CERROBRANCO. **Cal Hidráulica HL 2: Vantagens/Benefícios**. Disponível em: <<http://www.cerrobranco.com.br/cal-hidraulica-hl2/>>. Acesso em: 24 nov. 2014.

CINCOTTO, Maria Alba; QUARCIONI, Valdecir Ângelo; JOHN, Vanderley Moacyr. **Cal na Construção Civil**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. Volume 1. p. 695 - 726.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial**, Brasília, CNT; SEST; SENAT, 2013.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e Caldas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. 2006.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 2001.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NORMA DNIT 143/2010 - ES: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010a.

\_\_\_\_\_. **NORMA DNIT 138/2010 – ES: Pavimentos flexíveis – Reforço do subleito - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010b.

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para seu uso em pavimento urbano**. 2012. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área Territorial Brasileira**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm)> Acesso em: 20 nov. 2014.

JÚNIOR, Hermenegildo Henrique Soares; FERREIRA, Osmar Mendes. **Processos erosivos e perda de solo em estradas vicinais**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Goiânia, 2007.

LOMA NEGRA: **Produtos – Cal Aérea Loma Negra Plus**. Disponível em: [http://www.lomanegra.com.ar/productos\\_detalle.asp?cat=3&id=23](http://www.lomanegra.com.ar/productos_detalle.asp?cat=3&id=23)  
Acesso em: 24 nov. 2014.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006. 204 f.

MOINHOS AURORA. **Carga mineral para filtragem de água**. Disponível em: <http://www.moinhosaurora.com.br/novo.asp> Acesso em: 26 nov. de 2014.

OLIVEIRA, Hélio Martins de. **Aglomerantes**. In: BAUER, L. A. Falcão. (Coord.). **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 1v. p. 11 – 34.

OLIVEIRA, Shirley Minnel Ferreira de. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para a utilização na construção rodoviária**. 2005. 190 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2005.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R. C. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. UEG. Goiás, p. 6. 2006.

RIZZO, R. P. ; LOLLO, J. A. **Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p. 250-259, jul./set. 2006.

SANTOS, Jorge Filipe Ribeiro dos. **Estudos de formulação de solo-cimento e solo-cal e respectivas aplicações**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente) – Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP. 2008.

SILVA, Mariana Fernandes da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

SNV – SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO. **SNV 2014 – Atualizado até 16/09/2014: 1-SNV 2014 COMPLETO – Rede rodoviária sob jurisdição do Ministério dos**

**Transportes.** Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/snv-2014-1>> Acesso em: 21 nov. 2014.

SOUSA, Alex Torres de. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal.** 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

SOUZA, Maurício José de. **Patologia em Pavimentos Flexíveis.** 2004. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.