



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DO  
MARANHÃO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**MATHEUS ANTÔNIO SOARES PEREIRA**

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA O USO  
EM CAMADAS DE PAVIMENTO, NA CIDADE DE SÃO LUÍS-MA**

São Luís

2017

**MATHEUS ANTÔNIO SOARES PEREIRA**

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA O USO  
EM CAMADAS DE PAVIMENTO, NA CIDADE DE SÃO LUÍS-MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

São Luís

2017

Pereira, Matheus Antonio Soares.

Estudo da estabilização química de solos para o uso em comadas de pavimento, na cidade de São Luis-MA / Matheus Antonio Soares Pereira.-São Luis,2017.

75f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

1. Estabilização. 2. Estabilização química. 3. Solo-Cimento.  
4. Resistência à compressão. I. Título.

CDU 625.8:631.41(812.1)

MATHEUS ANTÔNIO SOARES PEREIRA

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA O USO  
EM CAMADAS DE PAVIMENTO, NA CIDADE DE SÃO LUIS-MA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito  
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06 / 12 / 2014

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana** (Orientador)  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof.ª Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Anderson Nascimento Silva**  
Universidade Estadual do Maranhão

São Luís

2017

Aos meus pais, pelo incentivo, ensinamentos,  
força e motivação, e por sempre me apoiarem  
em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me conduzido desde a escolha do curso até a conclusão. Por estar ao meu lado e me ajudado a enfrentar todos os momentos difíceis, sempre dando força para alcançar nossos sonhos a ponto de conquistá-los.

Aos meus pais, Arinaldo Pereira e Sandra Gomes Soares Pereira, e à minha irmã Claudia Priscilla Soares Pereira, e todos os familiares, pelo apoio, ajuda, dedicação, incentivo, compreensão, e, a toda assistência dada em decisões importantes da minha vida, com suporte e conselhos essenciais para meu desenvolvimento.

Agradeço, aos meus amigos, Rodrigo Rabelo, Thais Torres, Katherine Silva, e a minha família que me ajudaram de alguma forma nesse trabalho.

Agradeço, também, a todos os meus amigos de sala pelos bons momentos vivenciados, de muita união, cumplicidade, descontração, apoio e amizade, no decorrer desse curso, em especial à Lucas Ericeira, Pedro Henrique, Victor Cubits e Victor Xavier, Ygor Bonfim, Gustavo Tavares, Iago Castro.

Agradeço ao meu orientador, Prof.<sup>a</sup> Dr. Walter Canales Sant'Ana, por gentilmente ter me ajudado, me dando auxílio e orientação, com boa vontade, atenção e grande paciência para me guiar no decorrer deste trabalho.

A todos os funcionários e professores que deixaram seus ensinamentos, contribuindo assim para minha formação acadêmica.

*“A persistência é o caminho do êxito”*

Charles Chaplin

## RESUMO

O objetivo principal dos pavimentos é oferecer segurança e conforto aos seus usuários, suportando os esforços e intempéries ao longo da sua vida útil. Entretanto, a falta de qualidade da pavimentação no Brasil é um problema rotineiro, podendo ser causado por má condição tanto no revestimento quanto em suas camadas subsequentes. Tendo a estabilização como uma maneira de solucionar esse problema, dando uma maior resistência mecânica, tanto quanto uma maior vida útil ao pavimento. O presente trabalho traz o estudo de um solo estabilizado quimicamente com cimento, onde foi avaliado o comportamento mecânico da mistura solo-cimento para o uso em camadas de pavimentos. Os materiais envolvidos na pesquisa foram: solo arenoso, de classificação A-2-4 segundo a Transportation Research Board (TRB), cimento Portland tipo CP II-Z 40. A metodologia abrangeu os ensaios de resistência mecânica da mistura, já os ensaios de caracterização do solo foram extraídos do trabalho Torres (2017). Com a pesquisa desenvolvida no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). No ensaio de resistência à compressão simples (RCS) os corpos de prova foram moldados na energia normal de Proctor em três teores de cimento (4%, 6%, 8%), aproveitando os resultados de umidade ótima encontrados no ensaio de compactação. Foi possível a constatação de uma boa reatividade entre o solo e o cimento utilizado, principalmente, por conta da afinidade entre solos arenosos e o cimento Portland, apresentando assim resultados satisfatórios no que se diz respeito à resistência mecânica da mistura. O ensaio de RCS evidenciou um acréscimo de resistência, com aumento do teor de cimento e tempo de cura. O teor de 4% de cimento já seria suficiente para conferir ao solo resistência adequada para ser utilizado em camada de base de pavimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** estabilização, estabilização química, solo-cimento, resistência à compressão.

## ABSTRACT

The main objective of the pavements is to offer security and comfort to its users, supporting the efforts and bad weather throughout its life. However, the lack of paving quality in Brazil is a routine problem and can be caused by poor condition both in the coating and in its subsequent layers. Having the stabilization as a way to solve this problem, giving a greater mechanical resistance as much as a longer shelf life. The present work presents the study of a soil stabilized chemically with cement, where the mechanical behavior of the soil-cement mixture for the use in layers of pavements was evaluated. The materials involved in the research were sandy soil, rated A-2-4 according to the Transportation Research Board (TRB), Portland cement type CP II-Z 40. The methodology covered the mechanical strength tests of the mixture, Soil characterization was extracted from Torres (2017). With the research developed in the Laboratory of Soils and Pavement (LSP) of the State University of Maranhão (UEMA). In the simple compressive strength test (RCS) the specimens were molded into the normal Proctor energy in three cement contents (4%, 6%, 8%), taking advantage of the optimum moisture results found in the compaction test. It was possible to verify a good reactivity between the soil and the cement used, mainly due to the affinity between sandy soils and Portland cement, thus presenting satisfactory results regarding the mechanical resistance of the mixture. The RCS test evidenced an increase of resistance, with increase of cement content and curing time. The 4% cement content would already be sufficient to give the soil adequate resistance to be used in the base layer of pavement.

**KEY WORDS:** stabilization, chemical stabilization, soil-cement, compression resistance.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Estrutura do pavimento rígido. ....	23
<b>Figura 2</b> - Estrutura do pavimento flexível.....	24
<b>Figura 3</b> - Fluxograma do trabalho.....	36
<b>Figura 4</b> - Equipamentos para o preparo da amostra: (a) mão de gral e almofariz; (b) repartidor de amostra. ....	39
<b>Figura 5</b> - Amostra de solo e cimento. ....	40
<b>Figura 6</b> - Cilindro metálico e compactador mecânico. ....	40
<b>Figura 7</b> - Pesagem da amostra úmida.....	41
<b>Figura 8</b> - Pesagem do CP com o cilindro metálico. ....	41
<b>Figura 9</b> - Amostra sendo extraída. ....	46
<b>Figura 10</b> - Corpos de prova lacrados e identificados. ....	46
<b>Figura 11</b> - Corpos de prova na caixa de isopor (câmara úmida).....	47
<b>Figura 12</b> - Ruptura do corpo de prova: (a) antes do rompimento; (b) após o rompimento. ..	47

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Curva granulométrica do solo estudado.....	49
<b>Gráfico 2</b> - Limite de liquidez. ....	49
<b>Gráfico 3</b> - Curva de compactação do solo.....	51
<b>Gráfico 4</b> - Curva de compactação da mistura solo-cimento (4%).....	51
<b>Gráfico 5</b> - Curva de compactação da mistura solo-cimento (6%).....	52
<b>Gráfico 6</b> - Curva de compactação da mistura solo-cimento (8%).....	52
<b>Gráfico 7</b> - CBR do solo. ....	53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Limites das frações de solo.....	25
<b>Tabela 2</b> - Tipos de cal hidratada.....	31
<b>Tabela 3</b> - Porcentagens de solo e cimento das misturas.....	38
<b>Tabela 4</b> - Quantidade de corpos de provas moldados para o ensaio de compactação. ....	42
<b>Tabela 5</b> - Relação da quantidade de corpos de prova moldados para o ensaio. ....	44
<b>Tabela 6</b> - Resultados da caracterização do solo estudado. ....	48
<b>Tabela 7</b> - Umidade ótima e peso específico máximo das misturas. ....	50
<b>Tabela 8</b> - Valores de CBR mínimos admissíveis e expansões máximas para base e sub-base de pavimentos. ....	53
<b>Tabela 9</b> - Valores para massa específica e teor de umidade dos CP's do ensaio de RCS. ....	54
<b>Tabela 10</b> – Resultados do ensaio dos corpos de prova solo-cimento.....	55
<b>Tabela 11</b> - Variação em porcentagem dos resultados do ensaio de RCS.....	55
<b>Tabela 12</b> - Variação em porcentagem em relação aos traços dos resultados do ensaio de RCS.....	56
<b>Tabela 13</b> - Resultados do ensaio de RCS, estabilizado com cal e cinza volante. ....	57
<b>Tabela 14</b> - Resultados do ensaio de RCS, estabilizado com cal e cinzas volante.....	58
<b>Tabela 15</b> - Resistência média obtida no ensaio de RCS para cada traço de solo-cimento em diferentes trabalhos.....	58

## LISTA DE SIGLA E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BGS – Brita Graduada Simples

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

CBR – California Bearing Ratio

CP – Corpo de prova

CP's – Corpos de prova

D – Diâmetro

DMT – Distância Média de Transporte

DNER - ME – Departamento Nacional de Estrada e Rodagem - Método de Ensaio

DNIT – ES – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificao de Serviço

DNIT – IPR – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificao de Serviço – Instituto de Pesquisa Rodoviária

H – Altura

h – Umidade

HRB – Highway Research Board

IG – ndice de grupo

IP – ndice de Plasticidade

ISC – ndice de Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

n – Número de Golpes

NP – Não Plástico

P<sub>h</sub> – Peso do solo úmido compactado

Ph – Peso da amostra úmida

Ps – Peso da amostra seca

RCS – Resistência à compressão simples

S%C% – Solo-Cimento em percentual

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

SC – Solo-Cimento

T1 – Traço 1

T2 – Traço 2

T3 – Traço 3

T4 – Traço 4

TRB – Transportation Research Board

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

U<sub>ot</sub> – Umidade ótima

V – Volume do solo compactado

$\gamma_d$  – Peso específico aparente máximo

$\gamma_h$  – Massa específica do solo úmido

$\gamma_s$  – Massa específica do solo seco

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>17</b>
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Pavimento .....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Conceito.....	19
4.1.2 Camadas do pavimento.....	19
4.1.2.1 Revestimento .....	20
4.1.2.2 Base .....	20
4.1.2.2 Sub-Base .....	21
4.1.2.3 Reforço do subleito.....	22
4.2.3 Tipos de pavimentos.....	22
4.2.3.1 Pavimento Rígido .....	22
4.2.3.2 Pavimento Flexível .....	23
<b>4.2 Solo.....</b>	<b>24</b>
4.2.1 Conceito.....	24
4.2.2 Classificação.....	24
4.2.2.1 Classificação TRB (antigo HRB) .....	26
4.2.2.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS .....	26
<b>4.3 Estabilizações de solos .....</b>	<b>26</b>
4.3.1 Estabilização granulométrica.....	28
4.3.2 Estabilização solo-cal .....	29
4.3.3 Estabilização solo-cimento .....	31
4.3.3.1 Cimento .....	31
4.3.3.2 Reação solo-cimento.....	32

<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Materiais.....</b>	<b>35</b>
5.1.1 Solo.....	35
5.1.2 Aglomerante .....	35
<b>5.2 Metodologias de laboratório .....</b>	<b>35</b>
5.2.1 Ensaio de caracterização .....	37
5.2.2 Compactação .....	38
5.2.3 Índice de Suporte à Califórnia (ISC OU CBR) .....	43
5.2.4 Resistência à Compressão Simples (RCS) .....	44
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1 Considerações iniciais.....</b>	<b>48</b>
<b>6.2 Ensaio de caracterização .....</b>	<b>48</b>
<b>6.3 Compactação.....</b>	<b>50</b>
6.3.1 Curvas de compactação .....	51
<b>6.4 Índice de Suporte à Califórnia (ISC ou CBR) .....</b>	<b>53</b>
<b>6.5 Resistência à Compressão Simples (RCS).....</b>	<b>54</b>
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (4%).....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (6%).....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE C – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (8%).....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE D – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES SOLO-CIMENTO (4%).....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE E – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES SOLO-CIMENTO (6%).....</b>	<b>70</b>

<b>APÊNDICE F – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES SOLO-CIMENTO (8%) .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO O SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS – SUCS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO B – COMPORTAMENTO PARA DIFERENTES GRUPOS DA CLASSIFICAÇÃO SUCS.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO A TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade da pavimentação é essencial ao desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil, o sistema rodoviário exerce uma função de grande importância para o escoamento da produção industrial e agrícola. Porém, segundo Bernucci et al. (2007) as condições insatisfatórias das estradas, geram incapacidade de atender as necessidades no transporte de cargas. Tendo como um dos prejuízos à falta de competitividade frente ao mercado nacional e internacional, afetando diretamente a economia do país.

Historicamente, a utilização de materiais para estabilização do solo traz ótimos resultados para a estrutura do pavimento, aumentando, assim, sua vida útil. No Brasil há trechos com mais de 20 anos estabilizados com solo-cimento que ainda permanecem em ótimas condições, como por exemplo, a rodovia Castelo Branco no estado de São Paulo que de acordo com Senço (2001) tem sua estrutura estabilizada com 8% de cimento na camada de sub-base e 10% de cimento na camada de base.

A necessidade de estabilizar o solo se dá quando não há a possibilidade da dosagem dos agregados nas proporções requeridas pelas curvas de Talbot. Desse modo, para estabilizar o solo, pode-se lançar mão de vários métodos. Sendo os mais usuais: o controle granulométrico; adição de cal e cinzas volantes; adição de cimento; adição de betume ao solo; adensamento etc. Além desses, a estabilização pode ser alcançada através da adição de integrante químico, que lhe confira resistência às deformações e ao cisalhamento. Os diversos tipos de estabilizantes podem conferir resistência ao solo por meio de cimentação dos grãos entre si, aumentando as preservações das forças coloidais que unem os grãos.

Atualmente, as péssimas condições dos pavimentos não se referem apenas ao revestimento asfáltico, e sim a problemas estruturais, que devem ser solucionados.

Além das obras de pavimentação que devem ser recuperadas, há também necessidade de implantar novas obras. Porém, com a crise econômica e escassez de recursos financeiros que o país vem passando nos últimos anos, torna-se relevante estudar materiais alternativos que possam ser utilizados na pavimentação.

Devido a grande universalidade e baixo custo, o solo é de grande utilidade para a engenharia. Porém, nem sempre o encontrado próximo à obra irá cumprir com os

requisitos dela. Contudo, há possibilidade de alterar as propriedades do solo e torná-lo viável à utilização.

Neste trabalho, o foco está voltado à estabilização química de solos para pavimentos rodoviários, aproveitando um material local, e melhorando sua resistência mecânica e reduzindo sua expansibilidade através da adição cimento Portland. A estratégia é melhorar a qualidade da pavimentação, dando soluções para locais onde não é encontrado um solo dentro das especificações necessárias.

## **2 JUSTIFICATIVA**

Na engenharia, o solo é considerado um material de construção e de sustentação das obras. Em rodovias, estes compõem as camadas estruturais do pavimento. 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 sua vida útil (SENÇO, 2007).

Quando os materiais encontrados próximos à obra não apresentam as características geotécnicas exigidas, são avaliadas algumas opções, como: utilização de um material de outra jazida, cujo comportamento seja satisfatório; a estabilização química ou mecânica desse solo; redimensionamento do projeto.

A utilização de um material que não esteja nas proximidades da obra, pode significar, dependendo do local em que foi encontrado, transporte de grandes volumes a grandes distâncias. Isso onera a construção, além de um aumento no tempo final da obra.

Nesse sentido, a escolha por estabilizar o solo encontrado no local torna-se a opção mais viável em casos que a distância média de transporte (DMT) para obtenção de solos mais apropriados resulte em um custo excessivo.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Caracterizar um solo estabilizado com cimento na cidade de São Luís – MA para uso em pavimentação.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a influência do teor de cimento na resistência mecânica da mistura;
- Evidenciar as camadas com maior eficiência e resistência mecânica da estrutura do pavimento;
- Apresentar os resultados do solo estabilizado quimicamente.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Pavimento

#### 4.1.1 Conceito

Segundo Balbo (2007) a pavimentação tem como função resistir a esforços provenientes de cargas e de ações climáticas, sem que haja deterioração de forma prematura. Sempre com uma preocupação no que se diz respeito à minimização dos custos, a partir do tipo de pavimento e materiais a serem empregados na obra. A escolha do material a ser utilizado dá-se através da análise das alternativas encontradas próximo à obra, levando em consideração as dificuldades de exploração e transporte assim como fatores técnicos relevantes.

Medina e Motta (2005) relatam que a estrutura do pavimento é construída logo acima da terraplenagem, e destina-se economicamente e tecnicamente à resistir aos esforços verticais produzidos pelo tráfego, distribuindo-os ao subleito. Com os objetivos de: melhorar as condições de rolamento trazendo conforto e segurança; tornar mais durável a superfície de rolamento, resistindo aos esforços horizontais que nelas atuam.

Senço (2007) caracteriza o pavimento como uma estrutura constituída por várias camadas com espessuras finitas, funções e características definidas, onde a carga é recebida na superfície e distribuída ao longo da estrutura.

#### 4.1.2 Camadas do pavimento

Balbo (2007) afirma que o pavimento é constituído por camadas de diversos materiais compactados a partir do subleito. Cada camada detém funções características capazes de suportar o tráfego sem se romper, assegurando aos veículos condições apropriadas de rolamento. As cargas aplicadas na superfície geram esforços tanto verticais quanto horizontais, tratando-se dos esforços verticais a estrutura suporta solicitações de compressão e cisalhamento, já os esforços horizontais podem solicitar alguns materiais à tração ou operar apenas confinando outros materiais.

Segundo Bernucci et al. (2007) a estrutura é lançada a cima do subleito, logo após o término dos cortes e aterros. Sendo composta por quatro camadas

principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo do caso pode ter a inexistência de alguma ou algumas dessas camadas, de acordo com tráfego ou materiais a serem utilizados.

#### 4.1.2.1 Revestimento

Para Bernucci et al. (2007) o revestimento tem como objetivos principais: resistir diretamente as ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada as camadas inferiores; impermeabilizar o pavimento; melhorar as condições de rolamento trazendo conforto e segurança aos seus usuários

Balbo (2007) afirma que o revestimento receberá ao longo da sua vida útil cargas estáticas e dinâmicas, sem que haja perda da compactação, grandes deformações elásticas e plásticas ou desagregação do material. Podendo, ainda, ser subdividido em duas ou mais camadas devido a razões técnicas, construtivas ou de custo. Sendo essa subdivisão em: camada de rolamento; camada de ligação; camada de nivelamento; e camada de reforço (recape).

#### 4.1.2.2 Base

Segundo Pinto e Preussler (2001) a base é a camada da estrutura situada logo abaixo do revestimento, sobre a sub-base na ocasião em que estiver presente, ou diretamente acima do subleito. Suas principais funções são: suportar a estrutura, propiciando rigidez; resistir à fadiga; aliviar as pressões sobre as camadas inferiores; e também podem exercer função importante na drenagem superficial dos pavimentos.

Para Balbo (2007) as bases podem ser compostas por diversos tipos de materiais, como: brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC), mistura de solos e agregados (solo-brita), solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico etc.

- a) Brita graduada simples: mistura de agregado mineral e água, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) as proporções são determinadas através de ensaios e preparadas em usinas apropriadas, transformando-se em um solo com granulometria contínua, resultando no material com características apropriadas de estabilidade e durabilidade, após a compactação.

- b) Brita graduada tratada com cimento: Senço (2001) caracteriza BGTC como uma base de brita graduada, onde é acrescentado o cimento em quantidades necessárias para adquirir certa resistência à compressão simples, preestabelecida. Na determinação do teor de cimento são realizados ensaios baseados em métodos de titulação química fazendo uma relação da concentração de soluções de amostras de campo com concentrações de soluções com teores de cimento conhecidos. Deve-se utilizar um agregado apresentando granulometria uniforme.
- c) Base de Solo-Asfalto: de maneira geral, essa estabilização dá-se quando um material betuminoso é acrescentado a um solo ou solo mais agregado. Senço (2001) afirma que a mistura efetua-se com asfaltos diluídos às suas temperaturas próprias de utilização e em dosagens apropriadas. O teor de asfalto ou betume depende substancialmente das porcentagens de silte e argila, assim como, da massa específica seca e porcentagem de vazios do solo. Em média esse teor varia de 4% a 7%.
- d) Solo Brita: mistura entre solo e agregado, que de acordo com Manual de Pavimentação do DNIT (2006) são preparadas em usinas, apresentando propriedades adequadas à estabilidade e durabilidade, concedendo relevantes valores de resistência mecânica, e uma boa relação de custo benefício.

#### 4.1.2.2 Sub-Base

Balbo (2007) esclarece que a sub-base é criada quando, por funções estruturais, a base se torna muito espessa, sendo dividida em duas camadas por razões construtivas e econômicas.

Além das funções estruturais a sub-base apresenta algumas funções secundárias, caracterizadas segundo Pinto e Preussler (2001) como:

- Prevenir o ingresso do material do subleito na base;
- Possuir propriedades drenantes, seja por características granulométricas do material ou por inclusão de dispositivos de drenagem tais como colchão drenante, drenos, entre outros;
- Resistir aos esforços provenientes de equipamentos pesados na fase de construção do pavimento.

#### 4.1.2.3 Reforço do subleito

Segundo Senço (2007) o reforço do subleito é construído acima do subleito, porém nem sempre é empregado, tendo como fatores de sua utilização a resistência mecânica do subleito, espessuras da base e sub-base e a solicitação do tráfego.

Conforme Balbo (2007) o reforço é empregado nos casos em que o subleito possui baixa resistência aos esforços verticais (de cisalhamento) provenientes do tráfego, sendo usado um material de qualidade superior ao do subleito. Naturalmente, diante desse fato, uma das opções seria aumentar as espessuras da base ou sub-base, porém geralmente a alternativa mais viável no ponto de vista econômico é o emprego de um material no reforço.

#### 4.2.3 Tipos de pavimentos

O pavimento rodoviário, de acordo com Medina e Motta (2005) classifica-se em dois tipos: rígidos e flexíveis.

##### 4.2.3.1 Pavimento Rígido

Para Medina e Motta (2005, p. 16) “O pavimento rígido é constituído por placas de concreto cimento Portland (raramente é armado) assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária”.

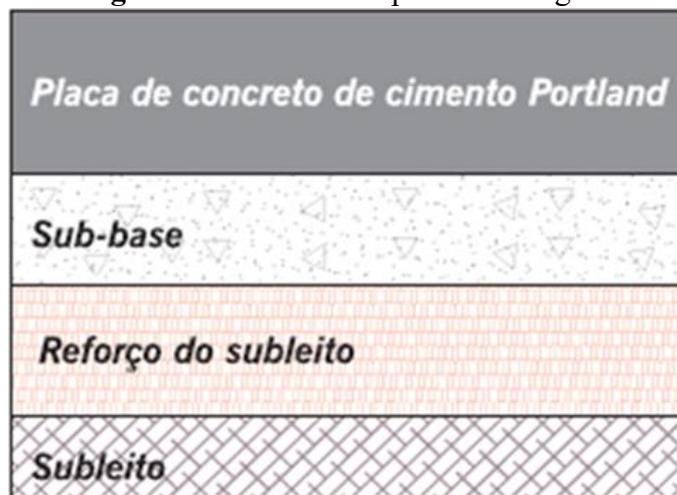
Segundo Bernucci et al. (2007) nesse tipo de revestimento em geral, é utilizado uma camada de cimento Portland, podendo ser armada ou não, sob uma camada denominada sub-base, de material granular ou estabilizado com cimento, podendo ser apoiada tanto ao subleito quanto ao reforço do subleito, dependendo da necessidade do pavimento.

Pinto e Preussler (2001) afirmam que praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicadas são absorvidas pelo revestimento de concreto, devido sua elevada rigidez em relação às outras camadas.

A Figura 1 mostra a estrutura do pavimento rígido que é composta por uma camada superficial de concreto de cimento Portland, podendo ser armada ou não,

assentada na sub-base e apoiada sobre o subleito ou um reforço do subleito de acordo com a necessidade.

**Figura 1** - Estrutura do pavimento rígido.



Fonte: Bernucci (2010)

#### 4.2.3.2 Pavimento Flexível

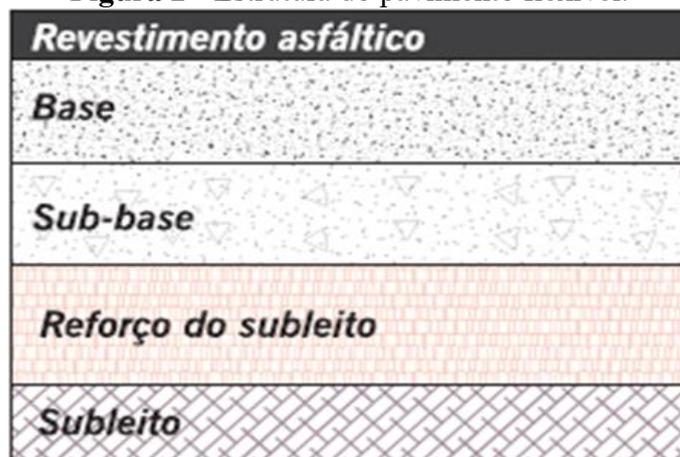
Para Medina e Motta (2005, p.16) “O pavimento flexível é constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulo metricamente”.

De acordo com Bernucci et al. (2007) esse tipo de pavimento é composto de um revestimento asfáltico em sua camada superficial e suas camadas subsequentes constituindo-se basicamente de solos, matérias granulares e misturas. Sendo essas camadas denominadas de base, sub-base e reforço do subleito.

Senço (2007) explica que os pavimentos flexíveis suportam as deformações até certo limite sem que a estrutura se rompa. Devido a sua estrutura ser dimensionada à suportar principalmente esforços de compressão, quando exigidos à esforços de tração podem causar o aparecimento de bacias de deformação, que podem levar a deformação permanente, ocorrendo até o rompimento por fadiga.

Considerando a Figura 2 os pavimentos flexíveis, geralmente, são constituídos por quatro camadas, compondo-se de revestimento asfáltico sobre camadas de base, sub-base e de reforço, construídos acima do subleito.

**Figura 2 - Estrutura do pavimento flexível.**



Fonte: Bernucci (2010)

## 4.2 Solo

### 4.2.1 Conceito

Segundo Senço (2007, p.42) “O solo é uma formação natural, de estrutura solta e removível e de espessura variável, resultante da transformação de uma rocha-mãe, pela influência de diversos processos físicos, físico-químicos e biológicos”.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) os solos são materiais provenientes da decomposição das rochas devido à ação de agentes de intemperismos. Esse material pode ser orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado. Podendo ser escavado de forma mecânica sem a presença de explosivos.

Senço (2007) relata que o solo pode ser considerado como o material de construção civil mais comum e de maior abundância na crosta terrestre. Do ponto de vista da terraplanagem a pavimentação faz parte do subleito, da sub-base, por vezes da base e até do revestimento primário.

### 4.2.2 Classificação

O solo é classificado através do diâmetro das partículas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1995) e o Departamento Nacional de

Estruturas de Transportes – DNIT (2006), regulamentam essa classificação, como é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1 - Limites das frações de solo.**

FRAÇÃO	Limites (mm)	
	DNIT, 2006	ABNT, 1995
Pedregulho	$2 < \phi < 76,8$	$2 < \phi < 60$
Areia grossa	$0,42 < \phi < 2$	$0,60 < \phi < 2$
Areia média	-	$0,20 < \phi < 0,60$
Areia fina	$0,075 < \phi < 0,42$	$0,06 < \phi < 0,20$
Silte	$0,005 < \phi < 0,075$	$0,002 < \phi < 0,06$
Argila	$\phi < 0,005$	$\phi < 0,002$

Fonte: Adaptada do DNIT (2006) e ABNT (1995)

França (2003) afirma que os solos encontrados na natureza, quase em sua totalidade, são compostos por mais de uma dessas frações. Nesses casos, uma das frações pode interferir bastante nas características que o solo apresenta. Os solos comportam-se, basicamente, de duas maneiras: arenoso ou argiloso, apesar de serem compostos de várias frações.

Manual de Pavimentação do DNIT (2006) caracteriza areias e pedregulhos como solos de granulação grossa e comportamento arenoso, que pouco varia se envolvido por água, com grãos de forma arredondada ou cúbica, constituído principalmente de quartzo. São solos com pouca coesão entre as partículas; com resistência à deformação dependendo exclusivamente do atrito entre os grãos e da tensão normal que atua sobre o solo. As argilas são solos de granulação fina e comportamento argiloso, podendo ocorrer variações na presença de água. Seus grãos têm formatos alongados, tubulares ou lamelares. Com característica de alta plasticidade, o solo é facilmente moldado. Sua coesão está diretamente relacionada com o teor de umidade, quanto mais seca maior será a coesão entre as partículas. O Silte comporta-se de forma arenosa ou argilosa, dependendo de sua granulometria, da composição mineralógica e forma de seus grãos. Podendo ser usado como silte arenoso ou silte argiloso, de acordo com o comportamento de seus grãos.

#### 4.2.2.1 Classificação TRB (antigo HRB)

O sistema de classificação de solos TRB é oriundo do antigo sistema Highway Research Board (HRB). Para a classificação, de acordo com esse sistema é levado em consideração a granulometria, limite de liquidez, o índice de liquidez e o índice de grupo. Reunindo-os em grupos e subgrupos em função dos parâmetros de classificação, como mostra o anexo C na página 75. Havendo uma ligação pelo índice de grupo, entre a classificação por esse sistema e o método de dimensionamento (Manual de Pavimentação do DNIT, 2006).

#### 4.2.2.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS

Já a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS, segundo Senço (2007) é baseada na identificação dos solos de acordo com suas qualidades de textura e plasticidade, sendo agrupados em conformidade com seu comportamento quando utilizados em estradas, aeroportos, aterros e fundações, como mostra o anexo A e B nas páginas 73 e 74 respectivamente, considerando as seguintes características: Percentagens de pedregulhos, areia e finos; forma da curva granulométrica; plasticidade e compressibilidade.

Senço (2007) explica, ainda, que quando o objetivo é a utilização do solo em uma camada da estrutura, devem-se reter condições necessárias para suportar a vida útil do pavimento. Sendo assim, é necessário a realização de estudos qualitativos e um rigoroso controle na execução. Uma das importantes atividades dos engenheiros é o estudo do solo a ser utilizado, se necessário, promovendo nele a estabilização, seja ela mecânica, física ou química. Já que é inegável no ponto de vista econômico o uso de materiais locais.

### **4.3 Estabilizações de solos**

Segundo França (2003) o objetivo de alterar as propriedades e melhorar as características de um solo, a fim, também, de resistir aos desgastes relacionados a um tráfego intenso ou ação de intempéries, é necessário estabilizá-lo, podendo aderir métodos de natureza física, química ou mecânica.

Quando as características dos solos locais não apresentam, total ou parcialmente, os requisitos exigidos, o engenheiro terá que adotar uma das seguintes estratégias (MEDINA 1987 apud PEREIRA, 2012):

- Evitar ou contornar o terreno ruim;
- Remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- Projetar a obra para situação de terreno ruim de fundação (conviver com a situação difícil);
- Estabilizar o solo existente.

De acordo com Senço (2007) o solo estabilizado deve ter suas propriedades modificadas a fim de apresentar características capazes de suportar a passagem de veículos sem se romper, assim como as ações climáticas, particular de cada região. Entre as inúmeras possibilidades, as estabilizações química e mecânica são as mais viáveis financeiramente, dessa forma, as mais utilizadas.

O método de estabilização mecânica fundamenta-se na correção do solo, baseado principalmente nos processos de compactação, que de fato é uma alternativa de conferir ao solo uma maior resistência, diminuindo a porosidade, por sucessivas aplicações de cargas, alcançando assim um valor excelente de umidade. Outra alternativa para estabilização mecânica é a estabilização granulométrica (SANTOS et al., 1995 apud SOLIZ, 2007).

Segundo Cristelo (2001) o método químico constitui da melhoria do solo através da adição de elementos químicos, ocorrendo a aglutinação das partículas, transformando o solo original em um solo nobre, com suas propriedades alteradas permanentemente.

Marques (2008) explica que a estabilização química para solos granulares é realizada através da adição de ligantes em pequenas quantidades em pontos de contato dos grãos, melhorando assim a resistência ao cisalhamento do pavimento. Nos solos finos encontramos uma estrutura dispersa e floculada, com grandes mudanças em suas características que na presença de água influencia diretamente a resistência ao cisalhamento. A presença de aditivos químicos provoca dispersão ou floculação, podendo ocorrer até a substituição de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes.

De acordo com França (2003) os aditivos mais utilizados nesse método são: cimento Portland, materiais betuminosos, cal e uma infinidade de produtos

industrializados, que tem como objetivo melhorar as propriedades: físicas; mecânicas; permeabilidade e deformabilidade, podendo ser utilizado na pavimentação.

Cristelo (2001) relata que as correções às características devem ser pensadas não somente para a melhoria das propriedades, mas também antecipando possíveis condições adversas tanto na construção quanto na vida útil do pavimento. As propriedades de engenharia que visa modificar na estabilização de um solo são:

a) Controle de expansibilidade, nada mais é que o controle de umidade, pois nota-se que a alteração do volume se deve exclusivamente a mudança de umidade. Sendo a compactação o principal método de retardar a percolação de água;

b) Aumento da resistência pode ser adquirido através da mudança ou melhoramento das propriedades mecânicas, tendo como um dos seus maiores problemas a deficiência no sistema de drenagem;

c) Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a, de acordo com o projeto a se considerar;

d) A durabilidade de um solo estabilizado é superior à de um solo natural, tornando-o estável, sem que haja perda de resistência e variações de volume.

#### 4.3.1 Estabilização granulométrica

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) a estabilização granulométrica é realizada através da utilização de solos, britas de rochas, de escórias de alto forno. Sendo basicamente a mistura de um ou mais de um desses materiais de diferentes granulometrias, modificando assim as suas propriedades, conferindo características adequadas para o uso após a compactação, através do aumento da coesão e/ou ângulo de atrito.

Segundo Senço (2001) a estabilização granulométrica é conseguida através da distribuição de diversas porções de grãos de diferentes diâmetros. Esta distribuição é tal que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos médios, e os vazios desses preenchidos pelos miúdos, resultando em uma estrutura densa com massa específica aparente superior à dos componentes usados, dando-lhe uma maior resistência e impermeabilidade.

#### 4.3.2 Estabilização solo-cal

A cal, nada mais é que, o agrupamento derivado da calcinação das rochas calcárias, muito utilizado na indústria da construção civil. A estabilização solo-cal, segundo Marques (2008), é uma técnica utilizada em vários países. Sendo suas principais funções:

- Melhoria permanente das características do solo;
- Aumenta a resistência à ação da água;
- Melhoria do poder de suporte;
- Melhoria da trabalhabilidade de solos argilosos.

Cristelo (2001) relata que os solos argilosos normalmente são os que apresentam os melhores resultados se misturados à cal. Entretanto, os siltosos, alguns arenosos, argilo-arenosos ou pedregulhos- plásticos de saibreiras, apresentem resultados satisfatórios se estabilizados com a cal. Todavia alguns dos melhores resultados encontrados, são com a utilização de pedregulhos ou cascalhos, com um percentual adequado de finos plásticos para reagir com a cal.

Segundo Marques (2008) ocorrem vários tipos de reações químicas em relação aos mecanismos da estabilização solo-cal, evidenciando as mais importantes, que são as reações de troca catiônica, floculação, as reações pozolânicas (reações de cimentação) e a carbonatação. As reações de troca catiônica provocam as substituições de cátions monovalentes por cátions bivalentes, promovendo alterações imediatas na plasticidade, assim como na floculação, que provoca redução na dupla camada, que resulta na floculação das partículas argilosas. Também, podem ocorrer reações pozolânicas entre o solo e a cal, com a reação da sílica e alumina do solo com a cal, aumentando assim a resistência na mistura. Já na carbonatação, há uma reação entre o carbono da atmosfera com a cal, formando compostos cimentantes fracos.

Azevedo (2010) relata que a cal nada mais é que o óxido de cálcio ou mistura de óxidos de cálcio e de magnésio. Com uma fórmula molecular descrita por CaO ou MgO, significando a combinação do oxigênio com o metal cálcio e o metal magnésio. Nessa etapa, ainda antes de passar pelo procedimento de hidratação, as formas exibidas são conhecidas como “cal virgem”. Essa transformação, que cria a cal virgem, é mostrada por meio das seguintes equações estequiométricas:

- Calcário calcítico:  $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

- Calcário dolomítico:  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{MgO} + \text{CaCO}_3$

O efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sobre vários aspectos (SOLIZ, 2007):

- Distribuição granulométrica: há uma expansão no tamanho das partículas em todos os tipos de solo. A aglomeração pode ser desfeita em parte na adição de água ao solo-cal, entretanto muitos agregados transformam-se em hidrofóbicos;
- Plasticidade: o LP se eleva com o uso da cal, ocorrendo a redução do LL. Já o IP varia de acordo com o teor de cal, diminuído com a elevação do teor. O IP varia com o tempo de reação;
- Variação de volume: Com o tratamento do solo com a cal, há diminuição nas variações de volume do solo na presença de água;
- Compactação: há um aumento no teor de umidade ótima e queda na densidade.
- Resistência: a resistência à compressão é elevada, como pode ser comprovado no ensaio de compressão simples, o mais comumente utilizado.

Soliz (2007) afirma, ainda, que quanto maior o teor de cal maior a troca catiônica e formação de produtos cimentantes, porém, não existe um teor ótimo de cal a ser adotado para todos os solos, sendo a experiência de campo decisiva para a escolha do teor de cal.

Em 2003, foi aditada a NBR 7175, mantendo as mesmas denominações para os tipos de cal encontrados no mercado, sendo a cal hidratada CH-I, CH-II e CH-III. Antes da reforma da NBR 7175, em 1992, só era possível encontrar a cal comum (CH-II). Porém, devido à demanda, existiu a obrigação e necessidade de uma cal mais pura, que tivesse resultados mais satisfatórios quando aplicadas. Com isso, a classificação das cales encontradas no mercado é a seguinte:

- a) Cal Hidratada CH-I;
- b) Cal Hidratada CH-II;
- c) Cal Hidratada CH-III.

Segundo especificação da ABNT, a Norma NBR 7175/2003 atualiza a Norma NBR 7175/92, que por sua vez, substituiu a NBR 7175/86. Esta Norma nomeia os diferentes tipos de cal hidratada de acordo com os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, como é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não tratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaOt+MgOt)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Maio de 2003 - NBR 7175

Azevedo (2010) relata que atualmente, a cal mais usada na pavimentação rodoviária no Brasil, é a cal hidratada devido a seu manuseio por não apresentar risco à saúde dos trabalhadores, ao contrário da cal virgem, que por esse motivo não vem sendo muito utilizada, apesar de possuir um maior teor de óxidos de cálcio e magnésio, assim como um menor preço comercial.

#### 4.3.3 Estabilização solo-cimento

##### 4.3.3.1 Cimento

Por definição, o cimento Portland é conjunto hidráulico adquirido a partir da moagem do clínquer Portland, cujo qual, durante o procedimento de moagem, acrescenta-se gesso, com o propósito de regular o tempo de pega. Ao longo da realização da moagem, poderá também ser utilizados materiais pozolânicos (DNIT, 2006).

O cimento é composto basicamente pelos compostos químicos anídeos, citados abaixo (PORTELINHA, 2008):

- Silicato Tricálcico, ou alita: (3CaO.SiO<sub>2</sub>);
- Silicato dicálcico, ou belita: (2CaO.SiO<sub>2</sub>);
- Aluminato tricálcico: (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita: (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Com as seguintes características quando hidratados (METHA E MONTEIRO, 1994 apud PORTELINHA, 2008):

- A fase silicato de cálcio hidratado ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), produzido pela hidratação do  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  e do  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que constitui, em geral, de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta é responsável pela resistência mecânica e, conseqüentemente, pela durabilidade da matriz de concretos e argamassas;
- A fase hidróxido de cálcio, também liberado na hidratação do  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  e  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , representando 20 a 25% do volume de sólidos da pasta, porém, sua presença têm efeitos desfavoráveis à durabilidade, devido à sua solubilidade.
- Os sulfoaluminatos de cálcio, resultantes da hidratação do  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  e  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , na presença do sulfato de cálcio (gipsta) ou gesso, ocupa de 15% a 20% do referido volume e tem papel menor na estrutura/propriedade; grãos de clínquer não hidratado.

#### 4.3.3.2 Reação solo-cimento

Marques (2008) define solo-cimento como o produto endurecido resultado da fusão compactada do solo, água e cimento em intensidades estabelecidas através da dosagem racional, realizada de acordo com as regras estabelecidas ao solo em estudo. Solo cimento passou a ser usado no Brasil por volta de 1940 no ramo da pavimentação, oito anos após já era utilizada na construção de paredes. Após séculos de experiências com a tecnologia do solo-cimento no Brasil surgiram diversas aplicações na área da Engenharia Civil, dentre elas: a pavimentação de estradas e ruas, quadras esportivas, revestimento de barragens, canalização e proteção de pontes, obras de contenção, etc.

Cristelo (2001) explica que devido ao endurecimento progressivo da mistura solo-cimento, sua resistência à compressão crescerá com o tempo. Tal crescimento está diretamente ligado ao tipo de solo e teor de cimento utilizado. Os corpos de prova são geralmente rompidos com tempo de cura iguais ou superiores a 7 dias, sendo que sua resistência normalmente está um pouco abaixo da prevista até essa altura. Com a preparação desses corpos de prova utilizando os teores ótimos em água obtidos através do ensaio de compactação.

Para que a estabilização com cimento seja viável, de acordo com Bernucci et al. (2007) o solo precisa conter certa porção de areia. Caso tenha um percentual elevado de argila, a estabilização só trará resultados satisfatórios a partir de um teor muito alto de cimento, onerando assim o custo final da obra. Dessa forma, um

percentual viável para o uso de aglomerante está em torno de 5% a 9% em relação à massa do solo.

Segundo Cristelo (2001) em solos granulares devido à pequena quantidade de cimento utilizado dificilmente será preenchido os vazios em sua totalidade, ocorrendo, portanto, ligações intergranulares, devido as áreas de contato dependerem da granulometria do solo, que é de suma importância para determinação da quantidade de cimento a ser utilizado. Sendo a utilização em menor quantidade para os solos com melhor graduação, conseqüentemente, solos como as areias de graduação uniformes (área de contato mínima), necessitam de maior teor de cimento na mistura para atingir determinada resistência.

Senço (2001) relata que para os solos arenosos fazerem parte da mistura, devem satisfazer alguns parâmetros, como:

- Ter no máximo 50% de silte mais argila;
- Ter menos de 20% de argila;
- Ter pequenas porcentagens de impureza e matéria orgânica;
- Limite de Liquidez (LL) < 40%;
- Índice de Plasticidade (IP) < 18%;
- Índice de Grupo (IG) < 6.

De acordo com Portelinha (2008) na composição dos solos finos, as partículas de cimento atuam como elementos principais, onde as partículas vizinhas são incorporadas, formando assim um material floculado fazendo-se presente as ligações de cimento.

A respeito da falta de coesão entre solos finos e o cimento, Cristelo (2001) relata que essa mistura é impedida pela força entre as partículas do solo. Recomendando o tratamento com a cal, havendo assim a quebra dessas ligações transformando o solo em pequenos grãos, permitindo ao cimento uma ação como ligante dessas novas partículas.

Segundo Vizcarra (2010) quase como regra, o consumo de cimento cresce com o aumento da parcela de grãos finos presentes no solo. Assim, para estabilizar um solo argiloso seria necessária uma maior quantidade de cimento, com exceção das areias uniformes que necessitam de um teor maior de cimento que um solo arenoso, contendo alguma porcentagem de silte ou argila.

Goularte e Pedreira (2009) afirmam que na estabilização do solo-cimento existem três diferentes tipos de misturas consideradas, seriam elas as misturas de: solo-cimento, solo melhorado com cimento e solo cimento plástico. Sua estabilização é levada por fatores como a espécie do solo, existência de materiais maléficis ao cimento, teor de cimento e umidade da mistura, tempo de cura e dosagem, operações da mistura e compactação.

Pode se dividir a estabilização por cimento nas seguintes classes abaixo (MEDINA, 1987 apud VIZCARRA, 2010, p.27):

- Solo-cimento: É a mistura íntima de solo, cimento e água ao qual é adicionada água em proporções pré-definidas por ensaio de compactação com a energia necessária para atingir um maior grau de compacidade e conseqüentemente as propriedades mecânicas desejadas. Este material passa por cura inicial cujo processo finaliza com o seu endurecimento. Mais tarde esse produto passa por ensaios de compressão simples para avaliar sua resistência e durabilidade, podendo ser usado em base ou sub-base;
- Solo modificado ou melhorado: É a mistura de solo-cimento e água com baixo teor de cimento, não devendo ultrapassar os 5% em relação à massa do solo, referenciado pela alteração nos índices físicos e/ou capacidade de suporte do solo. Podendo ser utilizado em base, sub-base ou subleito;
- Solo-cimento plástico: Usa uma maior quantidade de água durante a mistura em relação ao solo melhorado, devido à necessidade de uma consistência de argamassa em vez de “farofa”. Utilizado para revestir valas, canais e taludes, reparações de pavimentos.

O comportamento do solo-cimento, segundo Cristelo (2001), quando usado na pavimentação, tende a variar entre: rígido, devido ao elevado teor de cimento; e semi-rígido, com a utilização de uma quantidade de cimento rigorosamente adequada. A determinação da quantidade de cimento a ser utilizada expressa certa complexidade, se utilizados em quantidades superiores ao necessário, irá apresentar prejuízo, tanto no ponto de vista econômico quanto no ponto de vista técnico, ocasionando fendas excessivamente largas com blocos de tamanhos médios.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo apresentam-se os materiais a serem estudados, assim como a metodologia para a obtenção dos resultados. A investigação das misturas de solo-cimento foi realizada no Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA.

### **5.1 Materiais**

#### **5.1.1 Solo**

O estudo foi conduzido com material que já se encontrava no LSP da Universidade Estadual do Maranhão. As amostras encontravam-se estocadas em sacos de estopa, e foram retiradas em quantidades suficientes para a realização de cada ensaio. Naturalmente poderia ter sido escolhido uma nova amostra de solo para o trabalho, porém o objetivo da realização do estudo com um solo já trabalhado é a comparação de resultados entre as estabilizações com solo-cal, solo-cinza volante e solo-cimento.

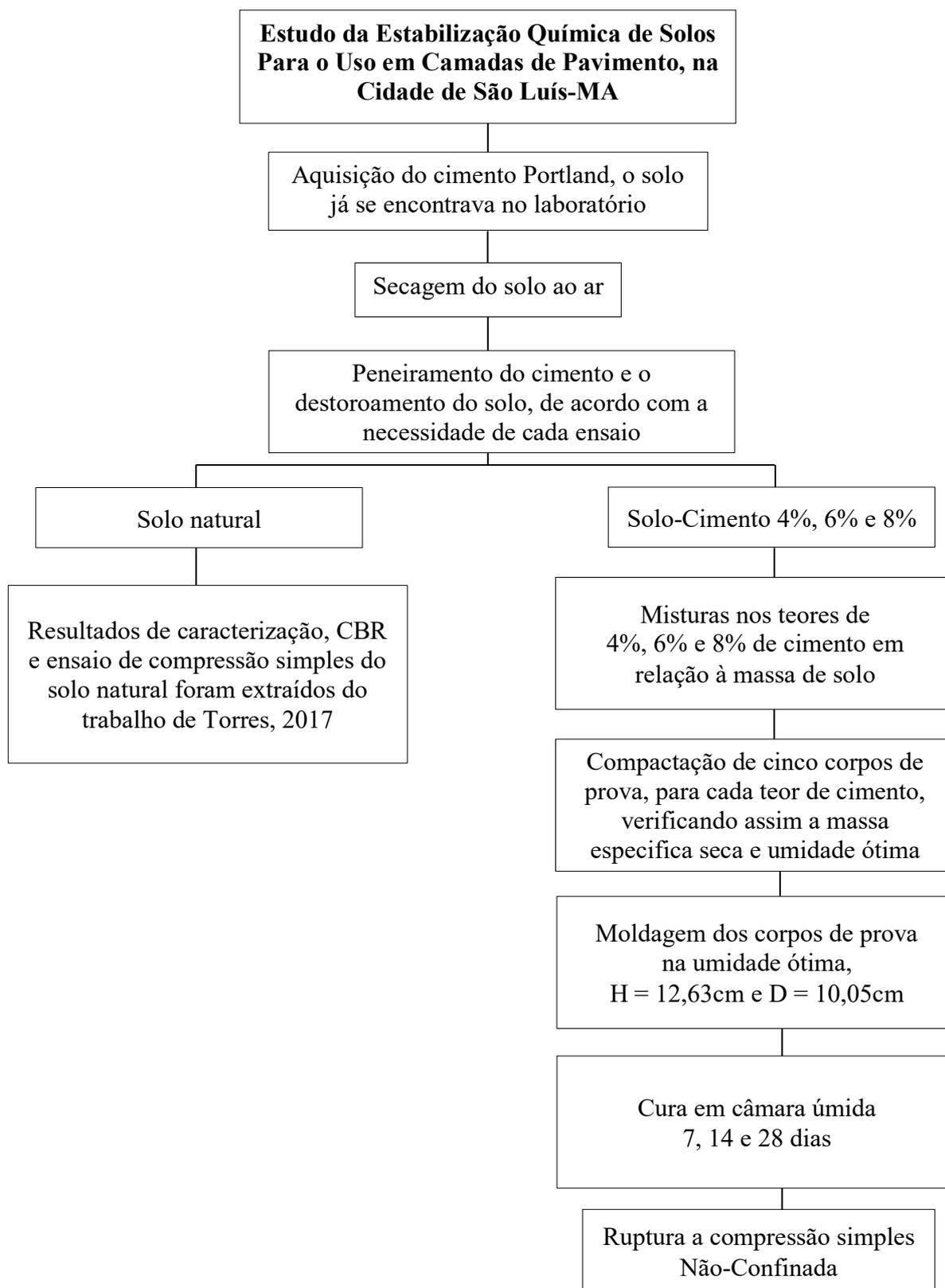
#### **5.1.2 Aglomerante**

O aglomerante utilizado foi um cimento Portland comum tipo CP II-Z 40, adquirido em uma loja de materiais de construção na cidade de São Luís. A amostra de 50 Kg foi suficiente para a realização do estudo. Foram estocadas e retiradas quantidades suficientes para os ensaios diários.

### **5.2 Metodologias de laboratório**

As amostras de solos já citadas foram colocadas em lonas para secarem ao ar livre. Após esse processo o solo foi confinado em sacos e retirado em pequenas quantidades de acordo com a necessidade de cada ensaio. O trabalho foi desenvolvido de acordo com o esquema apresentado a seguir (Figura 3).

**Figura 3 - Fluxograma do trabalho.**



### 5.2.1 Ensaio de caracterização

Os resultados de caracterização do solo foram extraídos do trabalho de Torres (2017), que utilizou a mesma amostra de solo para estabilização com cal e cinza volante seguindo as normas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Os resultados extraídos foram dos seguintes ensaios:

- Limite de plasticidade (LP), segundo Senço (2007, p.96) “é a transição de estado de consistência semi-sólida para o estado de consistência plástica (umidade crescente)”.

A regulamentação do ensaio dá-se através da norma do DNER-ME 082/94, onde o limite de plasticidade é fornecido pela média dos teores de umidade obtidos no ensaio.

- Limite de liquidez (LL), segundo Senço (2007, p.93) “é a transição do estado de consistência plástica para o estado de consistência líquida, com a umidade crescente”.

A regulamentação do ensaio se dá através da norma do DNER-ME 122/94, após o ensaio ser realizado são obtidos os valores de umidade em relação ao número de golpes, lançando esses pontos em um gráfico. Posteriormente será traçando uma reta, próxima de no mínimo 3 pontos, onde a umidade é o valor da abcissa do ponto da reta que corresponde à ordenada de 25 golpes.

- Índice de Plasticidade (IP), segundo Balbo (2007, p.78) “é definido como a diferença das umidades de passagem do estado líquido para o estado plástico (LL) e de passagem do estado plástico para o estado semissólido (LP); portanto,  $IP = LL - LP$ ”.

Balbo (2007) explica que o solo é considerado não plástico quando o LP não puder ser determinado, ou quando o LP for igual ou maior que o LL. O solo é classificado de acordo com o índice de plasticidade, da seguinte maneira:

- a) Fracamente plásticos:  $1 < IP < 7$
- b) Medianamente plásticos:  $7 < IP < 15$
- c) Altamente plásticos:  $IP > 15$

Balbo (2007) afirma, ainda, que o índice de grupo (IG), é um parâmetro estimativo da capacidade de suporte do material, onde em sua determinação devem ser considerados os seguintes critérios: se o IG for negativo,  $IG = 0$ ; arredondar o valor do

IG para o número inteiro mais próximo; o IG para solos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 e A-3 é sempre nulo; a determinação do IG para os grupos A-2-6 e A-2-7 é calculado usando apenas o IP.

### 5.2.2 Compactação

“Entende-se por compactação de um solo a operação de reduzir os vazios desse solo comprimindo-o por meios mecânicos” (SENÇO, 2007, p.134).

Segundo Caputo (1996), a massa específica do solo receberá alteração numérica após a compactação, onde essa modificação está diretamente ligada ao teor de umidade do solo e energia dissipada na compactação.

Realizaram-se ensaios de compactação no solo natural e solo-cimento, cujos resultados obtidos de umidade ótima e massa específica máxima seca, foram utilizados na moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples. Os ensaios foram realizados em misturas solo-cimento utilizados os teores de 4%, 6%, 8% (Tabela 3).

**Tabela 3 - Porcentagens de solo e cimento das misturas.**

Energia	Traço (Nº)	% solo	% cimento
Intermediária	(T1) Solo	100	-
	(T2) S96C4	96	4
	(T3) S94C6	94	6
	(T4) S92C8	92	8

Fonte: Autor (2017)

Os ensaios para todas as misturas solo-cimento foram realizados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, seguindo a NBR 12023/92.

A aparelhagem utilizada para o ensaio de compactação foi:

- a) Molde metálico pequeno (cilindro de Proctor), base e cilindro complementar com o mesmo diâmetro; com as seguintes dimensões  $H = 12,63$  e  $D = 10,05$ ;
- b) Soquete metálico cilíndrico, com uma massa correspondente a  $(2504 \pm 10)$  g, e uma altura de queda  $(305 \pm 2)$  mm;

- c) Balanças com capacidade de 10 kg e 2 kg, sensíveis respectivamente a 0,1 g e 0,01 g;
- d) Estufa com capacidade de manter a temperatura a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- e) Proveta com capacidade de  $100\text{ cm}^3$ , e graduação de  $1\text{ cm}^3$ ;
- f) Peneiras de 19 mm e 4,8 mm;
- g) Cápsulas metálicas, para a determinação da umidade;
- h) Régua biselada de aço, com 30 cm de comprimento;
- i) Extrato de amostra para molde cilíndrico;
- j) Bandejas metálicas com 75 cm de comprimento, 50 cm de largura e 5 cm de altura.

Com o intuito de preparar as amostras, o solo seco ao ar, passou pelo processo de destorroamento sem que houvesse a quebra das partículas individuais, com o auxílio da mão de gral (Figura 4a). A separação do material se deu através do repartidor de amostra (Figura 4b), cerca de 2700 g a 3000 g. Já o cimento Portland, foi passado na peneira 2,75 mm, evitando assim a presença de torrões.

**Figura 4** - Equipamentos para o preparo da amostra: (a) mão de gral e almofariz; (b) repartidor de amostra.



Fonte: O autor (2017)

As misturas foram preparadas primeiramente com a homogeneização a seco do solo com o cimento Portland (Figura 5), posteriormente foi adicionado água com teor de umidade crescente a cada Corpo de Prova (CP).

**Figura 5 - Amostra de solo e cimento.**



Fonte: Autor (2017)

A compactação manual foi realizada em um cilindro metálico pequeno com auxílio de um compactador manual (Figura 6), utilizando-se energia normal, sem reuso do material. As amostras foram compactadas em três camadas iguais, deferindo-se 26 golpes em cada, seguindo a NBR 12023/92.

**Figura 6 - Cilindro metálico e compactador mecânico.**



Fonte: Autor (2017)

Após a compactação da segunda camada retira-se uma amostra do solo restante na bandeja, para a pesagem (Figura 7), e secagem em estufa. Após 24 horas a amostra era retirada da estufa e pesada novamente com o objetivo de identificar a umidade do CP. Por fim o cilindro é pesado (Figura 8), para efeito de cálculo da massa específica.

**Figura 7 -** Pesagem da amostra úmida.



Fonte: Autor (2017)

**Figura 8 -** Pesagem do CP com o cilindro metálico.



Fonte: Autor (2017)

O processo foi repetido cinco vezes para cada traço, totalizando 20 CP's, como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4** - Quantidade de corpos de provas moldados para o ensaio de compactação.

SOLO	TRAÇO (Nº)	Nº de CP's
	T1 (solo)	5
Amostra 1	T2 (S96C4)	5
	T3 (S94C6)	5
	T4 (S92C8)	5
<b>Total</b>	<b>4 Traços</b>	<b>20</b>

Fonte: O autor (2017)

Calculando então, com os valores encontrados no ensaio, a massa específica e os teores de umidade de cada CP, para a elaboração da curva de compactação.

A umidade é descrita pela seguinte equação:

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Onde,

h – Umidade (%);

Ph – Peso da amostra úmida (g);

Ps – Peso da amostra seca (g).

A massa específica do solo úmido é descrita pela equação:

$$\gamma_h = \frac{P'h}{V}$$

Onde,

$\gamma_h$  – Massa específica do solo úmido (g/cm<sup>3</sup>);

P'h – Peso do solo úmido compactado (g);

V – Volume do solo compactado (cm<sup>3</sup>).

A massa específica seca é descrita pela equação:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + h}$$

Onde,

$\gamma_s$  – Massa específica do solo seco (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_h$  – Massa específica do solo úmido (g/cm<sup>3</sup>);

h – Umidade (%).

Após os cálculos dos parâmetros necessários, efetua-se a elaboração de um gráfico da massa específica seca ( $\gamma_s$ ) versus a umidade (%). A umidade ótima é encontrada no ponto mais alto da curva, onde ocorreu a maior densidade do material (massa específica seca máxima). A umidade ótima será usada no ensaio de compressão simples, obtendo assim uma maior resistência.

### 5.2.3 Índice de Suporte à Califórnia (ISC OU CBR)

O resultado do CBR do solo foi extraído do trabalho de Torres (2017) onde foi utilizada a mesma amostra de solo referente a esse trabalho.

A regulamentação do ensaio é dada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, através da normativa DNER-ME 049/94 (Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas).

“Os ensaios são realizados com a amostra de solo compactada em condições padronizadas, dentro de um molde cilíndrico com, aproximadamente, 15 cm de diâmetro e 17,5 cm de altura, provido de um colarinho de extensão com 5 cm de altura” (CAPUTO et al, 1996, p.178).

A demarcação da expansão do material é decorrente a captação da água, sendo ela modelada por um corpo de prova com umidade ótima. Com relação à amostra adapta-se um papel filtro, acima desse um disco perfurado provido de uma haste flexível com a sobrecarga de disco anulares semelhantes ao peso do pavimento, o qual não poderá ser inferior a 4,5 Kg. Logo após, insere-se o cilindro com a amostra compactada acompanhado do disco e a sobrecarga dentro de um recipiente cheio de água por no mínimo 4 dias, caso o material não seja coesivo. Acima da haste põe-se um

extensômetro agrupado em um tripé, ajustando-se para a leitura a cada 24 horas, durante os 4 dias e realiza-se a leitura do extensômetro. As expansões progressivas, bem como a expansão total ao término dos 4 dias, são citadas em porcentagens em relação a altura inicial do corpo de prova. (CAPUTO, 1996).

#### 5.2.4 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os corpos de provas para o ensaio à compressão simples não confinada foram moldados em três traços 4%, 6% e 8%, com tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, sendo 3 CP's moldados a cada traço, como mostra a Tabela 5.

**Tabela 5** - Relação da quantidade de corpos de prova moldados para o ensaio.

SOLO	TRAÇO (Nº)	Tempo de cura (dias)		
		7	14	28
Amostra 1	T2 (S96C4)	3	3	3
	T3 (S94C6)	3	3	3
	T4 (S92C8)	3	3	3
<b>Total</b>	<b>3 Traços</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>

Fonte: O autor (2017)

A regulamentação para a moldagem e cura dos corpos de prova seguiu a normativa NBR 12024 (solo-cimento – moldagem e cura de corpos de prova cilíndrico), da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

A aparelhagem usada foi:

- Cilindro de Proctor, composto de molde metálico, base metálica e cilindro complementar metálico de diâmetro idêntico, com altura,  $H=12,63$  cm e diâmetro,  $D=10,05$  cm;
- Soquete de compactação com 2,51 kg de massa e uma altura de queda livre de 30,5 cm. A face de compactação no pé do soquete é plana e circular;
- Balanças com capacidade de 10 kg e 2 kg, sensíveis respectivamente a 0,1 g e 0,01 g;
- Estufa com capacidade de manter a temperatura a  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ;
- Proveta com capacidade de  $100 \text{ cm}^3$  e graduação de  $1 \text{ cm}^3$ ;
- Cápsulas metálicas para a determinação da umidade;

- g) Régua biselada de aço com 30 cm de comprimento;
- h) Câmara úmida;
- i) Extrator de amostra de molde cilíndrico;
- j) Papel Filme de PVC;
- k) Sacos plásticos com capacidade de 25 litros com cerca de 50 cm de altura;
- l) Serragem úmida de madeira;
- m) Prensa automática de ruptura com capacidade de 5.000 Kgf, que permite a aplicação contínua de carga com velocidade de 0,1 a 50,8 mm/min até a ruptura do corpo de prova.

A preparação das amostras para o ensaio foi idêntica à realizada no ensaio de compactação, já descrita acima.

Usando a energia normal (26 golpes), os corpos de provas foram moldados em três camadas, com a devida escarificação entre as camadas com objetivo de melhorar e homogeneizar a ligação entre elas. As condições foram de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, obtidas a partir da curva de compactação de cada mistura.

Com finalidade de ter o controle de umidade, retira-se uma amostra do material restante na bandeja após a segunda camada ser compactada, de onde é retirado o peso úmido e em seguida é levado para a estufa. Após certo período na estufa, a amostra é pesada novamente com intuito de identificar o peso seco. Com esses dois parâmetros identificados pode-se calcular a umidade do corpo de prova.

Em seguida, o CP é devidamente pesado, retirado do molde utilizando o extrator de amostras (Figura 9), é identificado, envolvido em papel filme e posto dentro de um saco plástico fechado (Figura 10), com o objetivo de não perder umidade. Por fim levado à caixa isopor com serragem de madeira umedecida (Figura 11), que funcionam como câmara úmida, permanecendo lá até atingir o tempo de cura já determinado.

**Figura 9 - Amostra sendo extraída.**



Fonte: O autor (2017)

**Figura 10 - Corpos de prova lacrados e identificados.**



Fonte: O autor (2017)

**Figura 11** - Corpos de prova na caixa de isopor (câmara úmida).



Fonte: O autor (2017)

Após o tempo de cura atingido, os corpos de prova foram imersos em um tanque com água por 4 horas. Em seguida procedeu-se o capeamento das bases com gesso, retirando então as medidas de altura e diâmetro após o capeamento. É levado à prensa automática para a ruptura por compressão com velocidade de 0,1mm/min como é mostrado nas Figuras 12 (a) e 12 (b).

**Figura 12** - Ruptura do corpo de prova: (a) antes do rompimento; (b) após o rompimento.



Fonte: O autor (2017)

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Considerações iniciais

Este capítulo constitui-se da identificação e análise dos resultados dos ensaios realizados em laboratório, tanto para o solo natural quanto para o solo estabilizado com cimento. São apresentados os resultados dos seguintes ensaios: granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, CBR e Resistência à Compressão Simples não-confinada. Ressaltando que os resultados dos ensaios do solo, foram extraídos do trabalho de Torres (2017).

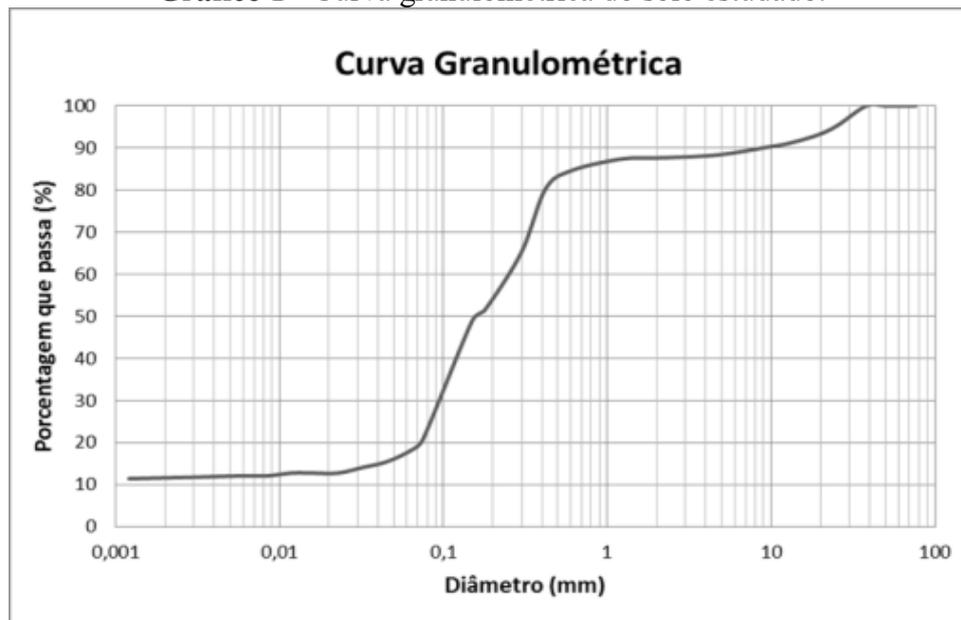
### 6.2 Ensaio de caracterização

A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, assim como a classificação do solo no sistema TRB. A curva granulométrica do solo é apresentada no Gráfico 1.

**Tabela 6** - Resultados da caracterização do solo estudado.

<b>SOLO</b>	<b>Argila coloidal (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia fina (%)</b>	<b>Areia grossa (%)</b>	<b>Pedregulho (%)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Classificação (TRB)</b>
<b>Amostra 1</b>	<b>11,41</b>	<b>0,67</b>	<b>8,65</b>	<b>59,52</b>	<b>7,39</b>	<b>12,38</b>	<b>13,4</b>	<b>NP</b>	<b>A-2-4</b>

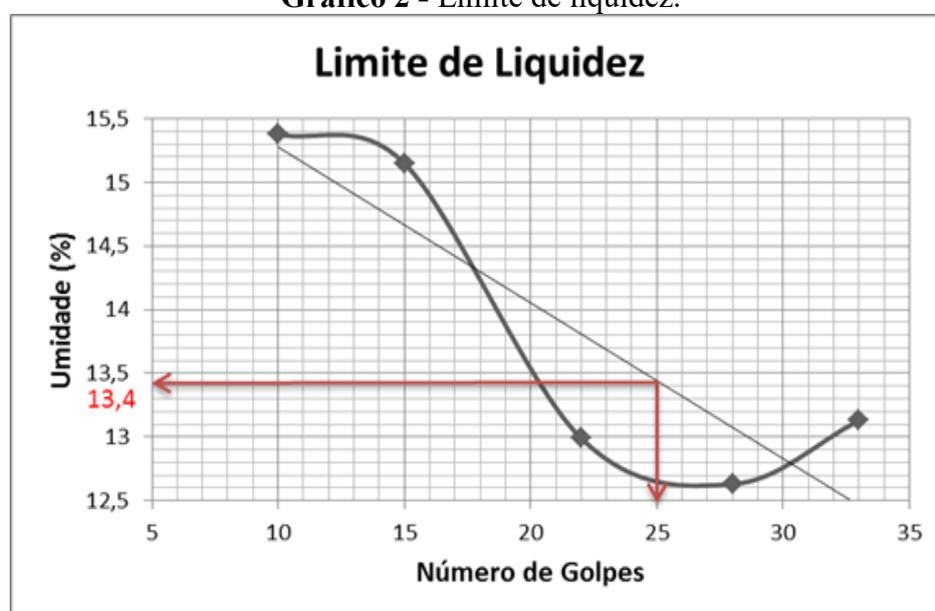
Fonte: Torres (2017)

**Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo estudado.**

Fonte: Torres (2017)

Segundo Torres (2017), não foi possível definir o limite de plasticidade, devido às características arenosas do solo. Consequentemente não foi possível a determinação do IP. Definido então como NP (não plásticos), de acordo com a norma DNER-ME 082/94. Devido a classificação do solo como A-2-4, tem-se o  $IG = 0$ .

Apesar de não ter sido determinado o LP, o ensaio de limite de liquidez foi realizado e obteve o resultado de 13,4%, de acordo com o Gráfico 2.

**Gráfico 2 - Limite de liquidez.**

Fonte: Torres (2017)

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, o solo foi classificado como SM (areias siltosa – mistura de areia e silte) segundo o anexo A. Já no sistema TRB, o solo foi definido tal como A-2-4 segundo o anexo C (TORRES, 2017).

### 6.3 Compactação

A partir da curva de compactação é possível definir a massa específica máxima seca, sendo o ponto mais alto da curva, e o teor ótimo de umidade, correspondente a abcissa (x), desse mesmo ponto. O teor ótimo de umidade é de grande importância para a pesquisa, sendo um dos objetivos a ser alcançada na moldagem dos CP's visando o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS). A Tabela 7 mostra um resumo dos resultados obtidos na compactação das misturas.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, observa-se uma elevação da umidade ótima nos traços 2 e 3, em relação ao solo natural e uma diminuição no traço 4. Sendo que houve um aumento progressivo nas massas específicas máximas, estando esse parâmetro coerente com outros estudos de solo-cimento.

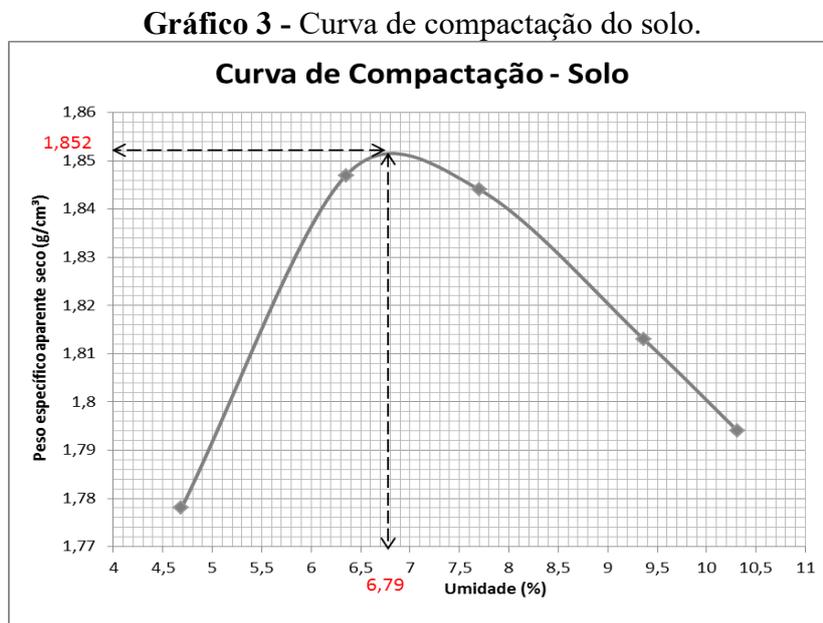
**Tabela 7** - Umidade ótima e peso específico máximo das misturas.

SOLO	TRAÇO (Nº)	CIMENTO (%)	Umidade ótima (%)	Massa esp. max. (KN/m <sup>3</sup> )
Amostra 1	T1	0	6,79	1,852
	T2	4	7,22	2,059
	T3	6	6,70	2,087
	T4	8	6,00	2,121

Fonte: O autor (2017)

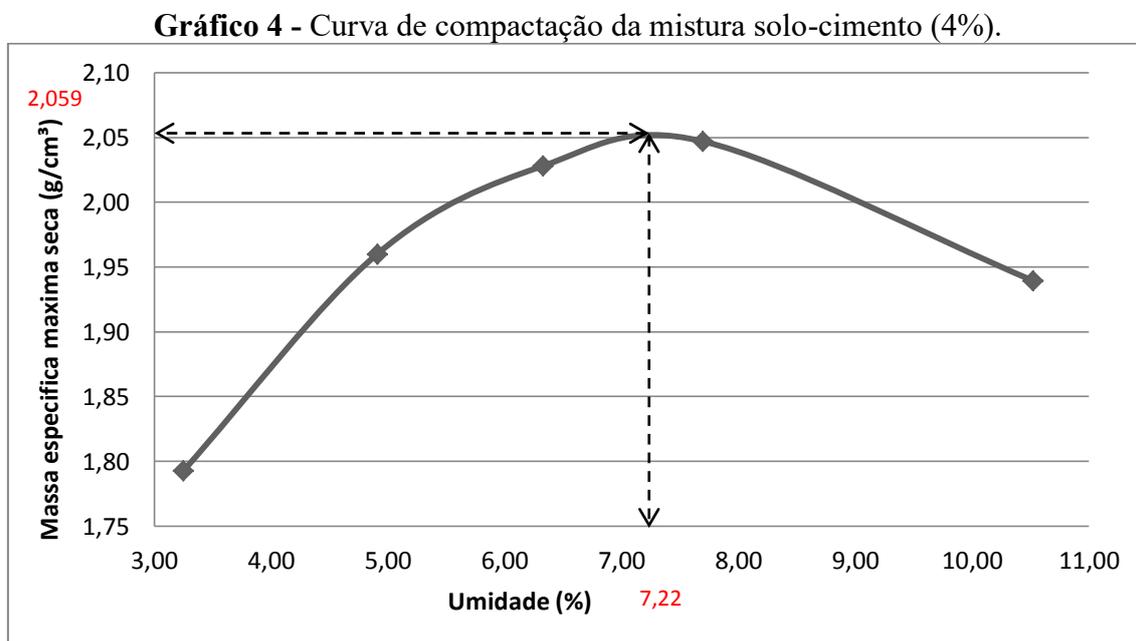
### 6.3.1 Curvas de compactação

O Gráfico 3, simboliza a curva de compactação do solo natural do ensaio realizado por Torres (2017).



Fonte: Torres (2017)

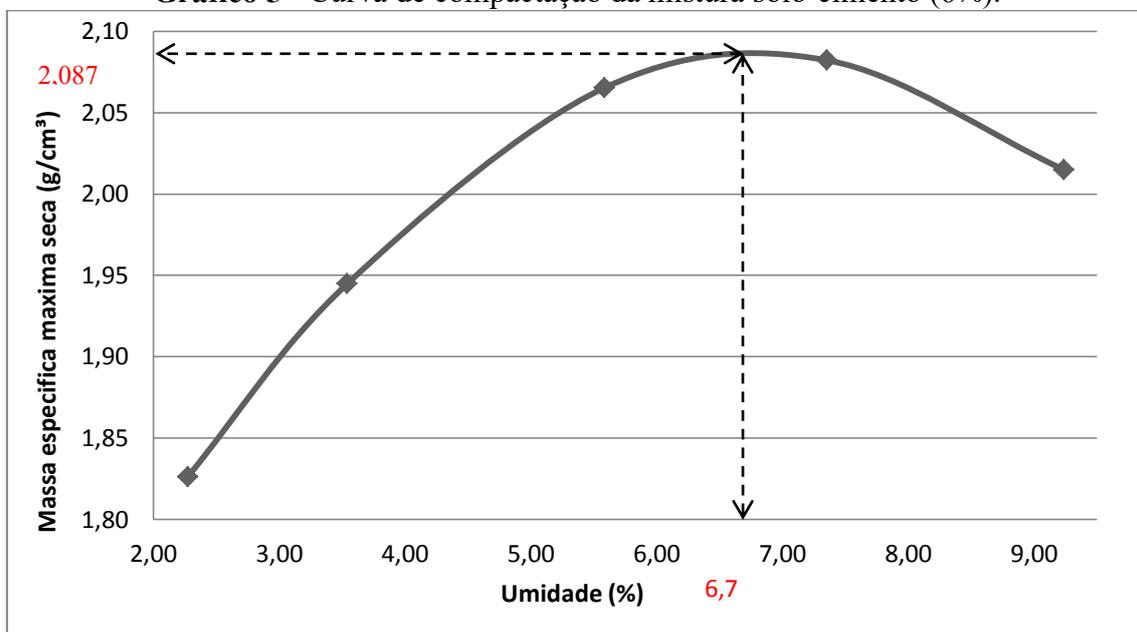
O Gráfico 4, simboliza a curva de compactação do traço 2, com presença de 4% de cimento (Apêndice A).



Fonte: O autor (2017)

O Gráfico 5, simboliza a curva de compactação do traço 3, com presença de 6% de cimento (Apêndice B).

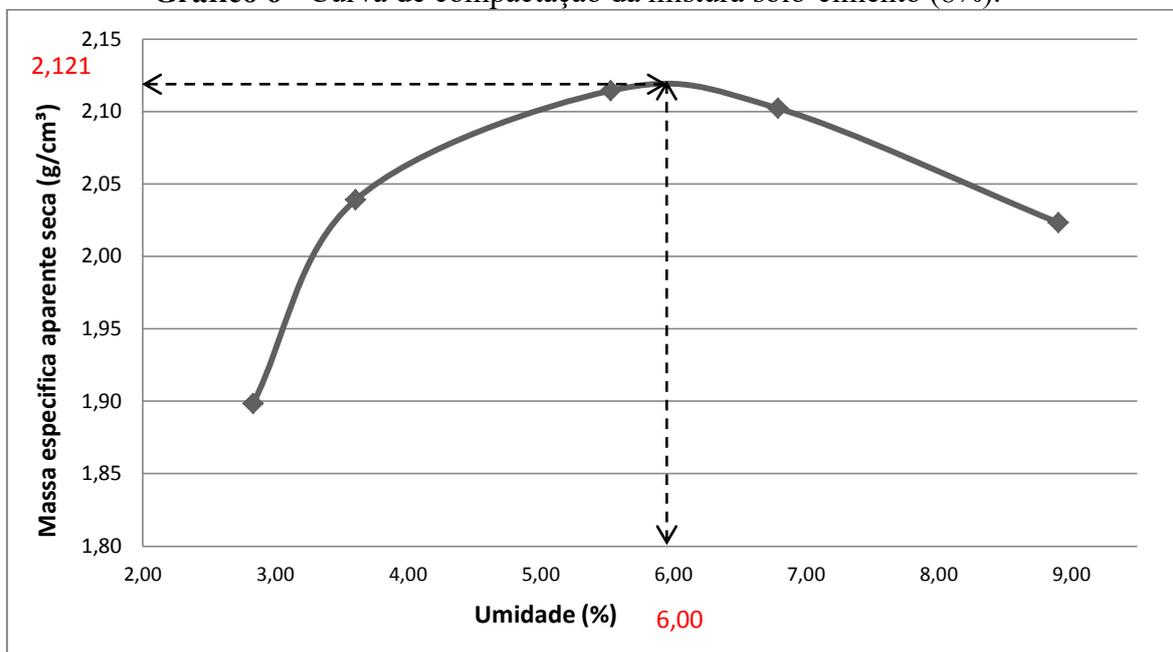
**Gráfico 5 - Curva de compactação da mistura solo-cimento (6%).**



Fonte: O autor (2017)

O Gráfico 6, simboliza a curva de compactação do traço 4, com presença de 8% de cimento (Apêndice C).

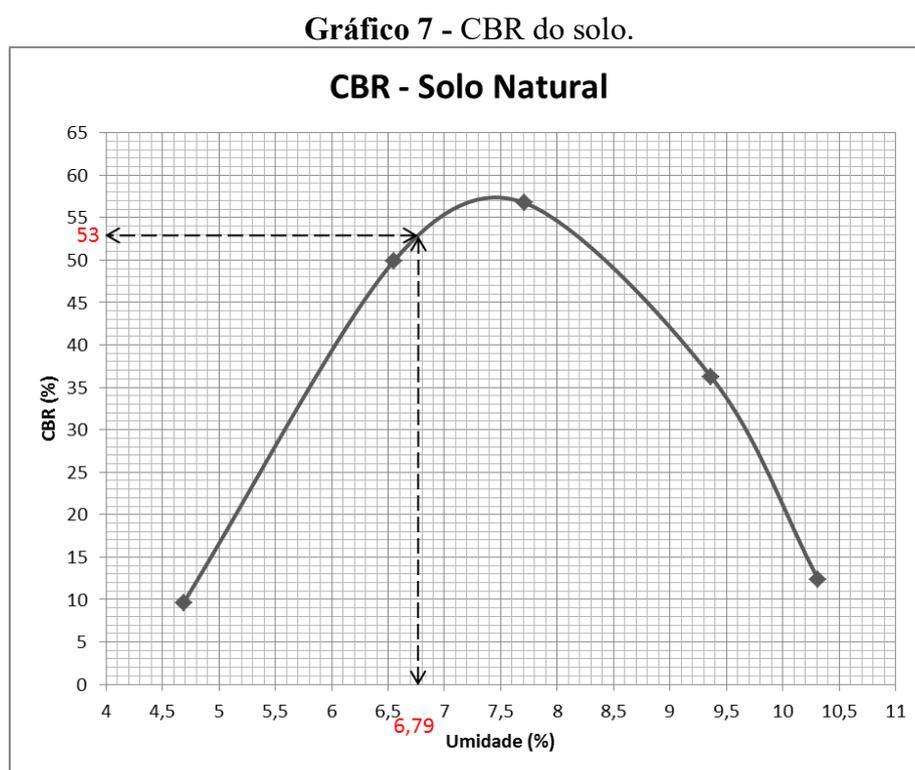
**Gráfico 6 - Curva de compactação da mistura solo-cimento (8%).**



Fonte: O autor (2017)

## 6.4 Índice de Suporte à Califórnia (ISC ou CBR)

Segundo Torres (2017) para a determinação do CBR utilizou-se os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação. Com a determinação do CBR e umidade de cada CP, foi traçado um gráfico. Sendo o valor encontrado para o CBR do solo natural, referente à umidade ótima de 6,79%, descoberta no gráfico 3. O solo natural apontou expansão de 0,01% e CBR de 53% como mostra o gráfico 7. O resumo dos resultados de CBR mínimos exigidos e máximos de expansão é mostrado na Tabela 8.



Fonte: Torres (2017)

**Tabela 8** - Valores de CBR mínimos admissíveis e expansões máximas para base e sub-base de pavimentos.

CAMADAS	Número de solicitações	CBR mínimo	Expansão máxima
BASE	$N \leq 5 \times 10^6$	$\geq 60\%$	$\leq 0,5\%$
	$N > 5 \times 10^6$	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$
SUB-BASE	-	$\geq 20\%$	$\leq 1,0\%$

Fonte: Adaptado do Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 7 e na Tabela 8, constatou-se que o solo atende as exigências para o uso em camada de sub-base. Porém,

o CBR de 53%, não está dentro dos requisitos necessários para o uso na camada de base. Sendo assim, a intenção de utilizar esse solo na camada de base do pavimento só será possível através de estabilização com algum aditivo. Dessa forma, propõe-se o cimento.

### 6.5 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados por trazerem dados mais exatos que o ensaio de CBR, se tratando de misturas cimentantes. Optou-se por executar o ensaio de compressão simples nos traços T2, T3 e T4 usando parâmetros da curva de compactação.

A moldagem dos corpos de prova deu-se nos parâmetros encontrados na curva de compactação, sendo moldados três CP's a cada traço. A Tabela 9 apresenta as características usadas na moldagem (massa específica e teor de umidade).

**Tabela 9** - Valores para massa específica e teor de umidade dos CP's do ensaio de RCS.

Traços	Cura (Dias)	CP 1		CP 2		CP 3	
		$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	U <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	U <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	U <sub>ot</sub> (%)
T2	7	2,061	7,06	2,080	6,72	2,064	6,12
	14	2,040	6,73	2,035	6,38	2,039	6,64
	28	2,041	7,07	2,049	6,88	2,054	6,72
T3	7	2,090	6,29	2,074	6,48	2,059	6,45
	14	2,073	6,54	2,091	6,00	2,083	6,13
	28	2,085	6,57	2,084	6,22	2,088	6,32
T4	7	2,112	6,07	2,117	5,70	2,124	5,53
	14	2,113	5,61	2,112	5,38	2,124	5,43
	28	2,121	5,73	2,115	5,55	2,110	5,92

Fonte: O autor (2017)

Segundo a NBR 12.023/92 os corpos de prova aptos ao ensaio serão aqueles que possuírem um grau de compactação entre 98% e 102%, sendo uma relação entre a massa específica aparente alcançada na moldagem e a massa específica seca máxima encontrada na curva de compactação. E uma umidade com margem de  $\pm 0,5$  percentual em torno da umidade ótima. Sendo assim o corpo de prova número 3, do traço 1 não será submetido ao ensaio.

O resultado obtido para a RCS refere-se à média entre os três corpos de prova do traço, desconsiderando os resultados com variações de  $\pm 10\%$  da média. A Tabela 10 traz as médias dos valores obtidos no ensaio com o tempo de cura de 7,14 e 28 dias (Apêndices D, E e F).

**Tabela 10** – Resultados do ensaio dos corpos de prova solo-cimento.

<b>Resistência à Compressão Simples</b>			
<b>Traços</b>	<b>Tensão de Ruptura Média (MPa)</b>		
<b>Tempo de cura (dias)</b>	7	14	28
<b>T2 (S96C4)</b>	2,27	2,65	3,75
<b>T3 (S94C6)</b>	3,82	4,43	6,35
<b>T4 (S92C8)</b>	6,07	7,40	11,27

Fonte: O autor (2017)

Os diferentes traços apresentam acréscimos consideráveis em sua resistência, considerando o percentual diferenciado de cimento. Todos se encontram dentro do padrão mínimo exigido pela Norma DNER-ME 202/94, que é de 2,1 MPa aos 7 dias de cura para solo-cimento utilizado para camada de base.

As Tabelas 11 e 12 mostram os ganhos de resistência com a elevação do teor de cimento e tempo de cura, através da variação da resistência entre os traços em porcentagem.

**Tabela 11** - Variação em porcentagem dos resultados do ensaio de RCS.

<b>Traços</b>	<b>Variação da Resistência (%) em função da cura</b>		
<b>Tempo de cura (dias)</b>	7-14	14-28	7-28
<b>T2 (S96C4)</b>	16	41	65
<b>T3 (S94C6)</b>	16	43	66
<b>T4 (S92C8)</b>	22	57	86

Fonte: O autor (2017)

**Tabela 12** - Variação em porcentagem em relação aos traços dos resultados do ensaio de RCS.

<b>Variação da Resistência (%) em relação aos traços</b>		
<b>Traços</b>	<b>Cura (dias)</b>	<b>Variação (%)</b>
<b>T2-T3</b>	7	68
	14	67
	28	69
<b>T3-T4</b>	7	60
	14	67
	28	77
<b>T2-T4</b>	7	167
	14	179
	28	200

Fonte: O autor (2017)

Os traços 2, 3 e 4 apresentaram crescimento de resistência ao longo do tempo de cura, destaca-se um aumento de 86% no traço 4 em relação ao intervalo de 7 para 28 dias. Sendo essa mistura a que apresentou um maior aumento de resistência. Já o aumento de resistência entre o traço 2 e o traço 3, no tempo de cura de 28 dias apresentou um aumento de 200%.

A Tabela 13 mostra os resultados do trabalho de Torres (2017), onde o mesmo solo natural usado no presente experimento foi mesclado com cinza volante e cal, resultando em resistências bem abaixo daquelas encontradas por este autor. Isto reforça o que se sabe sobre a afinidade do cimento aos solos arenosos, o que já não ocorre com a cal.

**Tabela 13** - Resultados do ensaio de RCS, estabilizado com cal e cinza volante.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)</b>				
<b>Composição</b>		<b>Cura (dias)</b>		
		<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>Solo</b>		0,01	0,02	0,02
<b>Solo + Cal</b>		0,15	0,16	0,15
<b>Solo + Cinza</b>	<b>8%</b>	0,06	0,06	0,07
	<b>12%</b>	0,11	0,12	0,09
	<b>16%</b>	0,12	0,12	0,12
<b>Solo + Cinza + Cal</b>	<b>8%</b>	0,55	0,63	0,73
	<b>12%</b>	1,01	0,75	1,59
	<b>16%</b>	0,68	0,88	1,26

Fonte: Torres (2017)

Com a comparação dos resultados entre as estabilizações com cimento, cal e cinza-cal, ficou evidente que os números encontrados a partir da estabilização com cimento Portland tipo CP II, são consideravelmente superiores. O maior valor para 7 dias, de 1,01 MPa que representa o solo, 4% de cal e 12% de cinza foi 125% inferior ao valor do traço 2, já considerando aceitável para o uso em camada de base na pavimentação.

Para efeito de comparação com os resultados de um solo estabilizado com cinzas volante e cal a Tabela 14 traz os resultados obtidos no ensaio de RCS, do trabalho de Almeida (2016), onde se utilizou um solo de granulação fina, classificado como A-4 segundo a TRB e CL segundo a SUCS.

**Tabela 14** - Resultados do ensaio de RCS, estabilizado com cal e cinzas volante.

Material	Cinza Volante (%)	Cal Hidratada (%)	Tensão de Ruptura Média (MPa) em função da cura (dias)		
			7	14	28
			<b>Solo 1</b>	-	-
<b>Mistura 1</b>	12	-	1,00	1,20	0,77
<b>Mistura 3</b>	-	4	0,86	0,99	0,66
<b>Mistura 5</b>	12	4	1,18	1,34	1,65

Fonte: Almeida (2016)

Como se sabe a cal em pequenas porcentagens tende a ter uma melhor afinidade com solos finos. Com base nisso, os resultados apresentados por Almeida (2016) obtiveram resultados melhores, quanto à tensão de Ruptura que os apresentados por Torres (2017).

Já em uma comparação entre solo-cimento do presente trabalho e solo-cinza-cal apresentado por Almeida (2016), onde o maior valor para 7 dias, é de 1,18 MPa, referente à mistura 5 com 12% de cinza e 4% de cal, foi 92 % inferior ao traço 2, 224% inferior ao traço 3, e 414% inferior ao traço 4.

Na Tabela 15, apresenta-se um resumo dos valores de Dias (2012), juntamente com os valores obtidos nesse estudo. Todos os valores correspondem a média de 3 corpos de prova solo-cimento provenientes do ensaio de RCS, com 7 dias de cura. Onde é apresentado a classificação do solo, tipo de cimento usado, porcentagem de cimento usado em cada traço e a resistência média em MPa.

**Tabela 15** - Resistência média obtida no ensaio de RCS para cada traço de solo-cimento em diferentes trabalhos.

Tempo de cura = 7 dias				
Trabalho	Classificação SUCS - solo	Tipo de cimento	% de cimento	Resistencia Média (MPa)
<b>Dias, 2012</b>	CL - Argila Magra	CP IV - Cimento Portland pozolânico	S100C0	0,22
			S92C8	2,90
			S88C12	3,40
<b>Presente estudo, 2017</b>	SC - Areia Argilosa	CP II - Cimento Portland composto	S100C0	0,01
			S96C4	2,27
			S94C6	3,82
			S92C8	6,07

Fonte: Adaptado de Dias (2012)

Verifica-se que o teor de 8% de cimento utilizado por Dias (2012) e o teor de 4% de cimento no presente estudo foram suficientes para conferir ao material à resistência necessária para ser utilizado como camada de base de pavimentos.

## 7 CONCLUSÕES

As principais conclusões do trabalho são:

Diante do que foi apresentado na pesquisa conclui-se que, o solo estudado sem estabilização química, não apresentou características mecânicas para o uso como camada de base em pavimentos, podendo ser usado apenas como sub-base do pavimento. De acordo com os resultados obtidos a partir do ensaio de CBR.

Observaram-se com os ensaios de compactação, alterações de massa específica seca máxima e umidade ótima, em relação ao solo natural, conforme o acréscimo de cimento. De forma coerente, a massa específica seca máxima aumentou gradativamente com o aumento do teor de cimento na mistura.

Já em relação à umidade ótima, ocorreu um acréscimo do traço 1 (solo natural) para o traço 2 (com 4% de cimento), passando de 6,62 para 7,22. Já do traço 2 para o traço 3 (com 6% de cimento) a umidade ótima diminuiu de 7,22 para 6,70, acontecendo o mesmo do traço 3 para o traço 4 (com 8% de cimento), onde houve um decréscimo passando de 6,70 para 6,00.

A partir dos resultados encontrados nos ensaios de resistência à compressão simples não-confinada, conclui-se que o solo estabilizado com cimento adquiriu uma rigidez adequada para utilização em camada de base, bem superior ao solo natural. As misturas solo-cimento apresentaram resultados dentro do padrão mínimo exigido pela Norma DNER-ME 202/94, equivalente a 2,1 MPa aos 7 dias de cura. Levando em consideração os resultados do ensaio é possível alcançar os valores mínimos de Norma com o teor de 4% de cimento.

Com o aumento do teor de cimento e tempo de cura, os traços apresentaram ganhos consideráveis de resistência à compressão simples. Ocorrendo uma variação de 167% entre o traço 2 e traço 4, aos 7 dias de cura. Já o traço 4 apresentou uma variação de 65 % em relação ao intervalo de 7 para 28 dias de cura.

Sugere-se para outros trabalhos, a verificação do menor uso de cimento que atinja os valores exigidos pelo DNER para solos similares ao usado neste trabalho. Também a utilização de outros tipos de solo, como siltoso e argiloso, para mistura com cimento, visto que já se dispõe destes resultados para cal e cinza.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023: Solo-cimento – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025 – MB-3361: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Cal hidratada para argamassas - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2003.

ALMEIDA, Márcia Gabriele de. **Análise do comportamento mecânico de misturas solo-cinza e solo-cinza-cal para camadas de pavimento.** 2016. 79f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, 2016.

AZEVÊDO, André Luís Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** 2010. 114F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2010.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Texto, 558 p, 2007.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.G. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 1.ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 520 p, 2007.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro, vol. 1, 273 p, 1996.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. 258f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho. Braga, Portugal 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação. 3ª ed.** – Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Diretoria Geral. Diretoria executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – especificação de serviço**. 2. ed. Espírito Santo, 2007.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 049: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 051: Solos – Análise Granulométrica – Método de Ensaio**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 080: Solos – análise granulométrica por peneiramento – Método de Ensaio**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 082 – Solos – Determinação do limite de plasticidade – Método de Ensaio**. Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 122 – Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito – Método de Ensaio.** Brasília, DF, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 202 – Solo-Cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio.** Brasília, DF, 1994.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”.** 2003. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2003.

MARQUES, Geraldo Luciano Oliveira. **Pavimentação.** Juiz de Fora, MG, 204 p, 2008.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 558 p, 2005.

GOULARTE, Cristina Lemos; PEDREIRA, Celso Luís da Silva. **Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento.** Relatório Final (Projeto de Iniciação Científica) – Universidade Federal de Rio Grande. Pelotas, RS, 2009.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Copiarte, 269 p, 2001.

PORTELINHA, Fernando Henrique Martins. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** 2008. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2008.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação,** volume I. São Paulo: Editora Pini, 761 p, 2007.

SENÇO, Wlastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**, volume II. São Paulo: Editora Pini, 671 p, 2001.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

TORRES, Thais Letícia Pinto. **Estabilização de solos com cinza volante para utilização em pavimentos**. Relatório Final (Projeto de Iniciação Científica) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, MA, Brasil, 2017.

VIZCARRA, Gino Omar Calderón. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. 120f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (4%)

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO		TRAÇO 2				
Proctor	Normal	Umidade Ótima (%)	7,22			
Nº de Golpes	26	Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2,059			
Nº de Camadas	3	Altura do Molde (cm)	12,63			
Peso da Amostra(g)	3000	Diâmetro do Molde (cm)	10,05			
Dados da Compactação						
Descrição	und.	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Volume do Molde	cm <sup>3</sup>	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82
Peso do Molde	g	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1
Peso Molde + Solo	g	3774,4	3980,1	4080,7	4128,9	4067,6
Peso do Solo	g	1856,3	2062	2162,6	2210,8	2149,5
Peso Capsula + Solo Úmido	g	53,7	44,68	49,73	53,73	67,11
Peso Capsula + Solo Seco	g	52,01	42,59	46,77	49,89	60,72
Umidade	%	3,25	4,91	6,33	7,70	10,52
Peso Específico Aparente	g/cm <sup>3</sup>	1,851	2,056	2,157	2,205	2,143
Peso Específico Aparente seco	g/cm <sup>3</sup>	1,793	1,960	2,028	2,047	1,939
Curva de Compactação						
<p>Massa específica máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>Umidade (%)</p>						

## APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (6%)

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO		TRAÇO 3				
Proctor	Normal	Umidade Ótima (%)	6,70			
Nº de Golpes	26	Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2,087			
Nº de Camadas	3	Altura do Molde (cm)	12,63			
Peso da Amostra(g)	3000	Diâmetro do Molde (cm)	10,05			
Dados da Compactação						
Descrição	und.	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Volume do Molde	cm <sup>3</sup>	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82
Peso do Molde	g	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1
Peso Molde + Solo	g	3716,3	3853,3	4104,8	4159,8	4125,4
Peso do Solo	g	1798,2	1935,2	2186,7	2241,7	2207,3
Peso Capsula + Solo Úmido	g	86,86	71,94	65,24	88,16	98,73
Peso Capsula + Solo Seco	g	84,93	69,48	61,79	82,12	90,38
Umidade	%	2,27	3,54	5,58	7,36	9,24
Peso Específico Aparente	g/cm <sup>3</sup>	1,793	1,930	2,181	2,235	2,201
Peso Específico Aparente seco	g/cm <sup>3</sup>	1,753	1,864	2,065	2,082	2,015
Curva de Compactação						
<p>Massa específica máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>Umidade (%)</p> <p>2,087</p> <p>6,70</p>						

## APÊNDICE C – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-CIMENTO (8%)

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO		TRAÇO 4				
Proctor	Normal	Umidade Ótima (%)	6,00			
Nº de Golpes	26	Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	2,121			
Nº de Camadas	3	Altura do Molde (cm)	12,63			
Peso da Amostra(g)	3000	Diâmetro do Molde (cm)	10,05			
Dados da Compactação						
Descrição	und.	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Volume do Molde	cm <sup>3</sup>	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82	1002,82
Peso do Molde	g	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1	1918,1
Peso Molde + Solo	g	3875,8	4036,6	4155,6	4169,3	4127,7
Peso do Solo	g	1957,7	2118,5	2237,5	2251,2	2209,6
Peso Capsula + Solo Úmido	g	57,70	68,37	74,63	69,20	95,29
Peso Capsula + Solo Seco	g	56,11	65,99	70,72	64,79	87,51
Umidade	%	2,83	3,61	5,53	6,81	8,89
Peso Específico Aparente	g/cm <sup>3</sup>	1,952	2,113	2,231	2,245	2,203
Peso Específico Aparente seco	g/cm <sup>3</sup>	1,898	2,039	2,114	2,102	2,023
Curva de Compactação						
<p>Massa específica máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</p> <p>Umidade (%)</p>						

**APÊNDICE D – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES SOLO-CIMENTO (4%)**

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)						TRAÇO 2			
Proctor		Normal		Volume do Molde (cm <sup>3</sup> )		1002,82			
Número de Golpes		26		Peso do Molde (g)		1918,1			
Número de Camadas		3		Altura do Molde (cm)		12,63			
Peso da Amostra (g)		3000		Diâmetro do Molde (cm)		10,05			
Umidade Ótima (%)				7,22					
Dados do Ensaio de RCS (mold.)									
Cura (dias)	Corpo de Prova (Nº)	Peso Molde + Solo (g)	Peso do Solo (g)	Peso Capsula + Solo Úmido (g)	Peso Capsula + Solo Seco (g)	Umidade (%)	Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente Seco (g/cm <sup>3</sup> )	
7	1	4124,9	2206,8	81,01	75,67	7,06	2,201	2,056	
	2	4138,9	2220,8	82,09	76,92	6,72	2,215	2,075	
	3	4111,5	2193,4	70,21	66,16	6,12	2,187	2,061	
14	1	4162,3	2244,2	88,59	83,52	6,07	2,238	2,110	
	2	4150,8	2232,7	76,23	72,12	5,70	2,226	2,106	
	3	4164,9	2246,8	73,42	69,57	5,53	2,240	2,123	
28	1	4109,5	2191,4	86,27	80,57	7,07	2,185	2,041	
	2	4114,4	2196,3	94,74	88,64	6,88	2,190	2,049	
	3	4135,9	2217,8	84,50	79,18	6,72	2,212	2,072	
Dados do Ensaio de RCS (romp.)									
TRAÇO 2	7 dias			14 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Umid. Moldagem (%)	7,06	6,72	6,12	6,73	6,38	6,64	7,07	6,88	6,72
Umid. Romp. (%)	6,89	6,41	6,02	6,60	6,27	6,52	6,78	6,7	6,59
Carga de Ruptura (Kgf)	1835	1745	1657	2012	2174	2102	3294	3454	3307
Tensão de ruptura (MPa)	2,31	2,22	-	2,53	2,77	2,68	4,15	4,40	4,22
Tensão Média de Rup. (MPa)	2,27			2,65			4,27		
Desvio Padrão	0,06			0,17			0,18		

**APÊNDICE E – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES SOLO-CIMENTO (6%)**

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)						TRAÇO 3				
Proctor			Normal			Volume do Molde (cm <sup>3</sup> )		1002,82		
Número de Golpes			26			Peso do Molde (g)		1918,1		
Número de Camadas			3			Altura do Molde (cm)		12,63		
Peso da Amostra (g)			3000			Diâmetro do Molde (cm)		10,05		
Umidade Ótima (%)						6,70				
Dados do Ensaio de RCS (mold.)										
Cura (dias)	Corpo de Prova (Nº)	Peso Molde + Solo (g)	Peso do Solo (g)	Peso Capsula + Solo Úmido (g)	Peso Capsula + Solo Seco (g)	Umidade (%)	Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente Seco (g/cm <sup>3</sup> )		
7	1	4147,3	2229,2	74,84	70,41	6,29	2,223	2,091		
	2	4126,4	2208,3	78,05	73,30	6,48	2,202	2,068		
	3	4107,8	2189,7	83,84	78,76	6,45	2,184	2,051		
14	1	4133,2	2215,1	93,12	87,40	6,54	2,209	2,073		
	2	4140,4	2222,3	100,82	95,11	6,00	2,216	2,091		
	3	4135,4	2217,3	98,21	92,54	6,13	2,211	2,083		
28	1	4148,9	2230,8	80,43	75,47	6,57	2,225	2,087		
	2	4138,1	2220,0	79,19	74,55	6,22	2,214	2,084		
	3	4144,4	2226,3	86,63	81,47	6,33	2,220	2,088		
Dados do Ensaio de RCS (romp.)										
TRAÇO 2		7 dias			14 dias			28 dias		
		CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Umíd. Moldagem (%)		6,29	6,48	6,45	6,54	6,00	6,13	6,57	6,22	6,33
Umíd. Romp. (%)		6,89	6,41	6,02	6,37	5,89	6,02	6,37	6,01	6,14
Carga de Ruptura (Kgf)		3046	2894	3072	3402	3545	3486	5477	5332	5635
Tensão de ruptura (MPa)		3,89	3,69	3,90	4,34	4,52	4,42	6,99	6,80	7,15
Tensão Média de Rup. (MPa)		3,83			4,43			6,90		
Desvio Padrão		0,12			0,13			0,13		

**APÊNDICE F – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES SOLO-CIMENTO (8%)**

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)							TRAÇO 4		
Proctor		Normal		Volume do Molde (cm <sup>3</sup> )		1002,82			
Número de Golpes		26		Peso do Molde (g)		1918,1			
Número de Camadas		3		Altura do Molde (cm)		12,63			
Peso da Amostra (g)		3000		Diâmetro do Molde (cm)		10,05			
Umidade Ótima (%)				6,00					
Dados do Ensaio de RCS (mold.)									
Cura (dias)	Corpo de Prova (Nº)	Peso Molde + Solo (g)	Peso do Solo (g)	Peso Capsula + Solo Úmido (g)	Peso Capsula + Solo Seco (g)	Umidade (%)	Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente Seco (g/cm <sup>3</sup> )	
7	1	4162,3	2244,2	88,59	83,52	6,07	2,238	2,110	
	2	4150,8	2232,7	76,23	72,12	5,70	2,226	2,106	
	3	4164,9	2246,8	73,42	69,57	5,53	2,240	2,123	
14	1	4155,8	2237,7	85,81	81,25	5,61	2,231	2,113	
	2	4150,1	2232,0	87,24	82,79	5,38	2,226	2,112	
	3	4164,3	2246,2	98,21	93,15	5,43	2,240	2,124	
28	1	4167,2	2249,1	81,35	76,94	5,73	2,243	2,121	
	2	4156,7	2238,6	81,42	77,14	5,55	2,232	2,115	
	3	4159,2	2241,1	94,80	89,50	5,92	2,235	2,110	
Dados do Ensaio de RCS (romp.)									
TRAÇO 2	7 dias			14 dias			28 dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Umid. Moldagem (%)	7,89	5,7	5,53	5,61	5,38	5,43	5,73	5,55	5,92
Umid. Romp. (%)	6,89	6,41	6,02	5,47	5,26	5,24	5,58	5,39	5,74
Carga de Ruptura (Kgf)	4760	4812	4870	5893	5827	5896	8289	8421	8303
Tensão de ruptura (MPa)	5,82	6,14	6,25	7,20	7,44	7,56	10,13	10,75	10,65
Tensão Média de Rup. (MPa)	6,07			7,40			10,51		
Desvio Padrão	0,22			0,18			0,33		

**ANEXOS**

**ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO O SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS – SUCS**

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos, 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
	Areias sem finos	Areias sem finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte.
		Areias com finos	GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
		Areias com finos	SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
	SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com LL ≤ 50	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
OL		Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.		
SILTES e ARGILAS com LL > 50		MH	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.		

## ANEXO B – COMPORTAMENTO PARA DIFERENTES GRUPOS DA CLASSIFICAÇÃO SUCS

GRUPO	COMPACTAÇÃO	COMPRESSIBILIDADE E EXPANSÃO	DRENAGEM E PERMEABILIDADE	QUALIDADE COMO ATERRO	QUALIDADE COMO SUBLEITO	QUALIDADE COMO BASE	QUALIDADE COMO FUNDAÇÃO
GW	Boa	Quase nenhuma	Boa drenagem Permeável	Muito estável	Excelente	Boa	Excelente
GP	Boa	Quase nenhuma	Boa drenagem Permeável	Razoavelmente estável	Excelente a boa	Regular a ruim	Excelente
GM	Boa	Pequena	Drenagem ruim semi-Permeável	Razoavelmente estável	Excelente a boa	Ruim a regular	Excelente a boa
GC	Boa a regular	Pequena	Drenagem ruim semi-Permeável	Razoavelmente estável	Boa	Bom a regular	Excelente
SW	Boa	Quase nenhuma	Boa drenagem Permeável	Muito estável	Boa	Regular a ruim	Excelente
SP	Boa	Quase nenhuma	Boa drenagem Permeável	Razoavelmente estável se denso	Boa a regular	Ruim	Boa
SM	Boa	Pequena	Drenagem ruim Impermeável	Razoavelmente estável se denso	Boa a regular	Ruim	Regular a Boa
SC	Boa a regular	Pequena a média	Drenagem ruim Impermeável	Razoavelmente estável	Boa a regular	Regular a ruim	Excelente
ML	Boa a ruim	Pequena a média	Drenagem ruim Impermeável	Estabilidade regular	Regular a ruim	Não adequado	Regular a ruim
CL	Boa a regular	Média	Sem drenagem Impermeável	Boa estabilidade	Regular a ruim	Não adequado	Boa a ruim
OL	Regular a ruim	Média a alta	Drenagem ruim Impermeável	Não deve ser usado	Ruim, não adequado	Não adequado	Regular a ruim
MH	Regular a ruim	Alta	Drenagem ruim Impermeável	Estabilidade regular a ruim	Ruim	Não adequado	Ruim
CH	Regular a ruim	Muito alta	Sem drenagem Impermeável	Estabilidade regular	Ruim a muito ruim	Não adequada	Regular a ruim
OH	Regular a ruim	Alta	Sem drenagem Impermeável	Não deve ser usado	Muito Ruim	Não adequado	Muito ruim
Pt	Não adequada	Muito alta	Drenagem regular a ruim	Não deve ser usado	Não adequado	Não adequado	Extremamente ruim

**ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO SEGUNDO A TRANSPORTATION  
RESEARCH BOARD – TRB**

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 siltosos 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.