UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MÁRCIA GABRIELE DE ALMEIDA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CINZA E SOLO-CINZA-CAL PARA CAMADAS DE PAVIMENTO

SÃO LUÍS – MA

2016

MÁRCIA GABRIELE DE ALMEIDA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CINZA E SOLO-CINZA-CAL PARA CAMADAS DE PAVIMENTO

Monografia apresentada ao Departamento de Expressões gráficas e Transportes, da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

São Luis – MA

2016

Almeida, Márcia Gabriele de.

Análise do comportamento mecânico de misturas solo-cinza e solo-cinza-cal para camadas de pavimento / Márcia Gabriele de Almeida. – São Luís, 2016.

79f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

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

1. Solo-cinza. 2. Solo-cal. 3. Solo-cinza-cal. 4. Resistência à compressão. 5. Resistência à tração. I. Título.

CDU 624.131:625.8

MÁRCIA GABRIELE DE ALMEIDA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CINZA E SOLO-CINZA-CAL PARA CAMADAS DE PAVIMENTO

Monografia apresentada ao Departamento de Expressões gráficas e Transportes, da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: _____ /_____ /_____

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana – Orientador

Presidente

_____

Prof. Dr. Maria Teresinha de Medeiros Coelho

Membro

_____

Prof. Msc. Sergio Roberto G. Pantoja

Membro

Conceito Final: _____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado a graça da vida.

Aos meus país, José Almeida Neto e Severina Lúcia de Almeida, por me todo amor, carinho, conselhos e incentivos. Por me mostrarem os diversos lados da vida, e acreditarem no eu potencial de escolha, me apoiando sempre em minhas decisões.

Ao meu irmão Márcio Guilherme de Almeida, por ser meu exemplo de vida desde a infância. Sempre com seu jeito humorado, companheiro, protetor e responsável, me ajudou a decidir que curso seguir.

A minha tia Maria das Graças, por estar sempre presente em minha vida, por ter me ajudado logo nos meus primeiros anos em São Luís, me dando hospedagem, sendo minha segunda mãe e amiga.

Aos amigos do curso Tales Caminha, Letícia Souza, Amanda Mendes, Adriana de Sá, Ricardo Corsini, Raissa d' Paula, Sophia Mereb, Arthur Mereb, Carol Lamartine, entre outros que me ajudaram em conteúdos específicos do curso, sem os quais teria sido impossível a compreensão de diversos assuntos e realização de diversos trabalhos.

Ao professor Walter Canales Sant'Ana por sua orientação durante meu projeto de iniciação científica e monografia.

A todos os professores que participaram da minha formação.

Aos laboratoristas Teodoro Pires e Zé Pequeno por me auxiliarem em experimentos e na realização de vários ensaios.

Obrigada!

“Sem esforço de nossa parte jamais atingiremos o alto da montanha. Não desanime no meio da estrada: siga à frente, porque os horizontes se tornarão amplos e maravilhosos à medida que for subindo. Mas não se iluda, pois só atingirá o cimo da montanha se estiver decidido a enfrentar o esforço da caminhada. ”

C. Torres Pastorino

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas do pavimento: (a) rígido; (b) flexível. 21

Figura 2 – Localização da retirada de amostra de solo. 28

Figura 3 – Coleta da amostra de solo. 28

Figura 4 – Amostra de cinza volante. 29

Figura 5 – Amostra de cal hidratada. 29

Figura 6 – Amostras de solo para o peneiramento: (a) fino; (b) grosso. 31

Figura 7 – Após a lavagem do peneiramento: (a) fino; (b) grosso. 31

Figura 8 – Conjunto de peneiras. 31

Figura 9 – Amostra retida nas peneiras após o peneiramento grosso e fino. 32

Figura 10 – Etapas da sedimentação: (a) amostra de solo e defloculante; (b) transferência da amostra para o copo dispersor; (c) e aparelho de dispersão. 32

Figura 11 – Etapas da sedimentação: (a) transferência da suspensão a proveta; (b)mergulho do densímetro na suspensão; (c) e densímetro e termômetro mergulhados em proveta com água. 33

Figura 12 – Limites de consistência. 33

Figura 13 – Materiais utilizados para o ensaio de Limite de Liquidez. 34

Figura 14 – Etapas do Limite de Liquidez: (a) preparo da amostra; (b) concha do aparelho Casagrande após a junção das bordas. 35

Figura 15 – Amostras retiradas após a sequência de golpes para medir a umidade. 35

Figura 16 – Materiais e amostra de solo utilizado para a determinação do Limite de Plasticidade. 36

Figura 17 – Etapas de execução do ensaio de Limite de Plasticidade; (a) moldagem do solo; (b) amassamento do solo; (c) fita de solo; (d) moldagem helicoidal das fitas; (e) comparação com o cilindro padrão de 3 mm; (f) desagregação do cilindro; (g) amostras na umidade de desagregação; (h) amostras secas em estufa. 37

Figura 18 – Adição de água na amostra. 39

Figura 19 – Etapas de Compactação: (a) compactação por camadas; (b) pesagem do conjunto molde solo; (c) extração da amostra de solo.....40

Figura 20 – Etapas de Compactação: fragmentação da amostra; (b) material passado na peneira nº 10 para obtenção de umidade. 40

Figura 21 – Equipamentos e etapas da compactação: (a) conjunto de molde, espaçador e soquete; (b) CPs dentro do saco plástico; (c) CPs dentro do isopor com serragem úmida. 43

Figura 22 – Ruptura do corpo de prova. 43

Figura 23 – Ruptura do corpo de prova: (a) vista frontal na prensa de rupatura; (b) vista lateral na prensa de ruptura; (c) detalhe frontal do CP rompido; (d) vista interna do CP rompido.....45

Figura 24 – Curvas granulométricas do solo 1 e 2. 47

Figura 25 – Limite de Liquidez. 48

Figura 26 – Curvas de compactação. 49

Figura 27 – Resistência à Compressão Simples em função dos tempos de cura. 51

Figura 28 – Resistência à Tração por Compressão Diametral.....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagens de materiais. 47

Tabela 2 – Resumo de Limites de Consistência. 48

Tabela 3 – Classificação TRB e SUCS. 48

Tabela 4 – Resumo de MEASmáx e Uót. 49

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples. 50

Tabela 6 – Resistência à Tração por Compressão Diametral. 52

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CH-I – Cal Hidratada Tipo 1

CL – Argila de Baixo Limite de Liquidez

CP – Corpo de Prova

CPs – Corpos de Prova

d – Diâmetro

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

DNIT – ES – Diretoria Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificação de Serviço

DNIT – IPR – Diretoria Nacional de Infraestrutura de Transportes – Instituto de Pesquisa Rodoviária

E – Energia de Compactação

F – Carga

H – Altura do Soquete

HRB – Highway Research Board

IG - Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

l – Altura do Corpo de Prova

LC – Limite de contração

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MEAS – Massa Específica Aparente Seca

$MEAS_{máx}$ – Massa Específica Aparente Seca Máxima

ML – Silte de Baixo Limite de Liquidez

n – Número de Golpes

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

N_c – Número de Camadas

NP – Não Plástico

RCS – Resistência à Compressão Simples

RT – Resistência à Tração

RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB – Transportation Research Board

U_{ot} – Umidade ótima

V – Volume

γ_d – Peso Específico Aparente Máximo

RESUMO

Bernuccie, *et al* (2007) sintetiza pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas com espessuras finitas construída sobre uma superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento com conforto, economia e segurança. A região onde se desenvolveu o presente trabalho é carente de pedreiras, fazendo com que a brita graduada, não alternativa seja comum para bases e sub-bases. Assim a mistura de materiais inclusive os recicláveis, é uma solução que deve estudada e difundida. Dentre as soluções possíveis, o solo estabilizado com cinza volante e cal hidratada é adequado já que melhora as propriedades mecânicas dos solos locais e dá um destino à cinza volante, que é um resíduo industrial gerado por empresas locais. O presente trabalho compara as propriedades mecânicas do solo local, solo-cinza, o solo-cal e o solo-cinza-cal, nas proporções de 12% para cinza e 4 % para cal, evidenciando a potencialidade de cada alternativa nas camadas de pavimento. A partir da coleta de um solo siltoso e de cinza volante, resíduo industrial, além de cal hidratada, foram compostas as misturas, ensaiadas em laboratório, onde se evidenciou por meio dos ensaios de caracterização física e mecânica, a influência e o comportamento do solo quando misturado com tais reagentes químicos e água. Dessa forma foi constatada a falta de reatividade do solo em questão quando misturado a cinza e a cal separadamente, ocorrendo a estabilização apenas na mistura solo-cinza-cal. A resistência à compressão e à tração dessa mistura cresceu com o decorrer do tempo em relação ao solo natural, podendo ser uma alternativa viável tecnicamente para a estabilização de camadas de um pavimento.

PALAVRA-CHAVE: solo-cinza, solo-cal, solo-cinza-cal, resistência à compressão, resistência à tração.

ABSTRACT

Bernuccie *et al* (2007) synthesizes pavement as a multiple layer structure with defined thicknesses built onto a final sub-grade, destined technically and economically to resist the loads originated from the traffic of vehicles and to weather effects, and to provide users the best conditions for driving with comfort, economy and safety. The region where this work was developed is devoid of quarries, what makes graduated gravel a common alternative for bases and sub-bases. Therefore, the mixture with various materials, including recycled ones, is a solution that should be studied and widespread. Of possible solutions, soil stabilized with fly ash and hydrated lime fits perfectly since it improves local soil's mechanical features and creates usage for fly ash, which is a residual waste generated by local industries. This work compares the mechanical features of local soil, fly-ash-stabilized soil, lime-stabilized soil and fly-ash-lime-stabilized soil, in the proportions of 12% for ash and 4% for lime, evidencing the potentials of each alternative on layers of pavements. Starting with samples of silt soil and fly ash, industrial waste and hydrated lime, mixes were made and tested in laboratories, where, through physical and mechanical characterization tests, it was possible to determine the influence and behavior of the soil when blended with each chemical reagent and water. It was verified the lack of reactions when the featured soil was blended with fly ash or lime separately, but the occurrence of stabilization when mixed with fly ash and lime combined. The compressive and tensile strengths of the mix grew with time in relation to natural soil, representing a viable alternative for stabilizing different pavement layers.

KEYWORD: fly ash - soil, lime - soil, fly ash – lime soil, compressive strength, tensile strength.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 15

2. OBJETIVOS 16

2.1 GERAL 16

2.2 ESPECÍFICOS 16

3. METODOLOGIA 17

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

3.1.2.2.1 Pavimentos rígidos: 20

3.1.2.2.2 Pavimentos flexíveis: 20

3.1.2.2.3 Pavimentos semi-rígidos 21

3.1.3.1.1 Classificação TRB (antigo HRB) 22

3.1.3.1.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS 22

3.1.4.1.1 Estabilização granulométrica 23

3.1.4.1.2 Estabilização solo-cal 24

3.1.4.1.3 Estabilização solo-cinza 25

3.1.4.1.4 Estabilização solo-cal-cinza 26

3.2 COLETA DE MATERIAIS 28

3.3 ENSAIOS 30

4. RESULTADOS 46

4.1 GRANULOMETRIA 47

4.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA 47

4.3 CLASSIFICAÇÃO 48

4.4 COMPACTAÇÃO 49

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) 50

4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD) 51

5. CONCLUSÃO 54

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 56

APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO 1. 59

APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO 1. 60

APÊNDICE C – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO 2. 61

APÊNDICE D – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO 2. 62

APÊNDICE E – TABELA DE ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO 1. 63

APÊNDICE F – TABELA DE ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO 2. 64

APÊNDICE G – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO 1. 65

APÊNDICE H – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO 2. 66

APÊNDICE I – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 1. 67

APÊNDICE J – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 2. 68

APÊNDICE K – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 3. 69

APÊNDICE L – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 4. 70

APÊNDICE M – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 5. 71

APÊNDICE N – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 6. 72

APÊNDICE O – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS 3 E 5. 73

APÊNDICE P – TABELA RESUMO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO 1 E DAS MISTURAS 1, 3 E 5. 73

APÊNDICE Q – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO 2 E DAS MISTURAS 2, 4 E 6. 74

APÊNDICE R – TABELA RESUMO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO 2 E DAS MISTURAS 2, 4 E 6. 75

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLO (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD). 77

ANEXO B – SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO - SUCS.....78

ANEXO C – GRÁFICO DE PLASTICIDADE (SUCS) 79

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução da tecnologia dos materiais e com o desenvolvimento sustentável sendo um dos princípios mais exigidos hoje na engenharia e na própria política de desenvolvimento global, buscam-se soluções técnicas em diversas áreas de atuação que tragam, ao mesmo tempo, eficiência e a preservação do meio ambiente.

De acordo com Rosa (2009) na pavimentação, nem sempre é possível contar com bases granulares de agregados britados para o pavimento, visto que podem ser inviabilizadas por um alto custo caso a pedreira esteja localizada a grande distância da obra. Nesses casos, onde os materiais locais não atendem às expectativas técnicas tem-se como alternativa o melhoramento dos solos por meio de técnicas de estabilização com a utilização de cal ou cimento.

Nesse contexto, é crescente a utilização de materiais reciclados utilizados com ou sem a mistura com materiais naturais como solo, brita, etc. Um destes materiais reciclados é a cinza volante, que segundo Mallmann (1996), tem pequena porção empregada na fabricação de cimento pozolânico e a maior parte é colocada no meio ambiente de formas muitas vezes inadequadas. Em outros países possui grande abrangência na sua utilização, constituindo um excelente material de construção.

Rosa (2009) afirma que muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com objetivo de aproveitar resíduos na estabilização de solos, através da substituição de parte dos materiais de alto custo neste processo, por resíduos que apresentam um custo reduzido, como é o caso da utilização da cinza volante em misturas solo-cal-cinza.

Buscou-se nesse trabalho um estudo laboratorial com a utilização da cinza volante e da cal hidratada misturadas simultaneamente ou não a um solo de subleito da região metropolitana de São Luís para utilização em camadas de pavimentos.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Estudar o comportamento mecânico de um solo estabilizado com cinza volante e cal hidratada como melhorador de suas propriedades para uso em camadas de pavimento.

2.2 ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física do solo.
- Realizar ensaios mecânicos de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração por Compressão Diametral, no solo e nas misturas solo-cinza, solo-cal e solo-cinza-cal.
- Verificar a ação estabilizante nas misturas solo-cinza, solo-cal e solo-cinza-cal, em relação ao solo natural.
- Difundir os resultados obtidos no meio rodoviário local.

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentada a metodologia aplicada para a elaboração o trabalho. Para a obtenção dos resultados propostos será cumprida a sequência de trabalho indicada abaixo:

a) Pesquisa bibliográfica em livros, normas técnicas, internet e trabalhos científicos para aprofundamento teórico;
b) Coleta de amostra de solo da região metropolitana de São Luís para a elaboração dos ensaios de laboratório;
c) Realização dos ensaios de caracterização física e resistência para o solo natural, para o solo com a cinza volante e para com o solo com a cinza volante e cal;
d) Analisar os resultados dos ensaios e compará-los entre si e a outros trabalhos similares.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 Solos

Todos os solos originam-se da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. A decomposição é decorrente de agentes físicos e químicos (PINTO, 2006).

Os solos são constituídos por um conjunto de partículas com água (ou outros líquidos) e ar nos espaços intermediários. As partículas de maneira pequena cimentam-se livres para deslocar-se entre si. Em alguns casos, uma pequena cimentação pode ocorrer entre elas, mas num grau extremamente mais baixo do que nos cristais de uma rocha ou de um metal, ou nos agregados de um concreto (PINTO, 2006).

Senço (2005) explica que as propriedades do solo como um conjunto podem variar, segundo se considere o solo no seu estado original imperturbado ou, então, o mesmo solo já manuseado.

O DNIT (2006) adota a seguinte escala granulométrica, considerando as seguintes frações desolo:

a) Pedregulho: é a fração do solo que passa na peneira de (3") e é retida na peneira de 2,00 mm (nº 10);

b) Areia: é a fração do solo que passa na peneira de 2,00 mm (nº 10) e é retida na peneira de 0,075 mm (nº 200);

c) Areia grossa: é a fração compreendida entre as peneiras de 2,0 mm (nº 10) e 0,42 mm (nº 40);

d) Areia fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42 mm (nº 40) e 0,075 mm (nº 200);

e) Silte: é a fração com tamanho de grãos entre a peneira de 0,075 mm (nº 200) e 0,005 mm;

f) Argila: é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005 mm (argila coloidal é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,001 mm).

Segundo Senço (2005), a influência das frações finas do solo não fica definida apenas pela granulometria, e, assim, com apenas esse ensaio, não se pode ter noção exata do comportamento do conjunto de partículas. As propriedades plásticas dependem da umidade do solo, da forma das partículas e da composição química e mineralógica dessas partículas.

3.1.2 Pavimento

3.1.2.1 Conceito

Para Bernucci *et al.* (2007), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Todas as camadas do pavimento possuem diferentes finalidades e características, sendo elas:

a) Subleito:

É o terreno de fundação do pavimento (SENÇO, 2005).

Segundo Balbo (2007), os esforços impostos sobre sua superfície serão aliviados em sua profundidade (normalmente se dispersam no primeiro metro). Deve-se, portanto, ter maior preocupação com seus estratos superiores, onde os esforços solicitantes atuam com maior magnitude.

b) Regularização:

É a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto (SENÇO, 2005).

Segundo o Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006), regularização é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente uma camada de pavimento, sendo, a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável.

c) Reforço do subleito:

Reforço do subleito – é uma camada de espessura constante, posta or circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito (Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719, 2006).

d) Sub-base:

Camada complementar à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Segundo a regra geral - com exceção dos pavimentos de estrutura invertida – o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material do reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base (SENÇO, 2005).

e) Base:

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

É a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito (SENÇO, 2005).

f) Revestimentos:

O revestimento deverá, entre outras funções, receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação; necessária, portanto, ser composto de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal (BALBO, 2007).

O Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006) define como sendo uma camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

3.1.2.2 Tipos de Pavimento

3.1.2.2.1 Pavimentos rígidos:

São pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento (Figura 1a). Rompem por tração na flexão, quando sujeitos a deformações (SENÇO, 2005).

Pinto (2001) define que pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

O Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006) explica que é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Segundo Balbo (2007), em um pavimento rígido, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos de carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão de placa, o que proporciona menores magnitudes de esforços verticais (pressões) sobre o subleito. Assim, em linhas gerais, um pavimento com resposta mecânica rígida impõe pressões bem mais reduzidas sobre o subleito, para uma mesma carga aplicada.

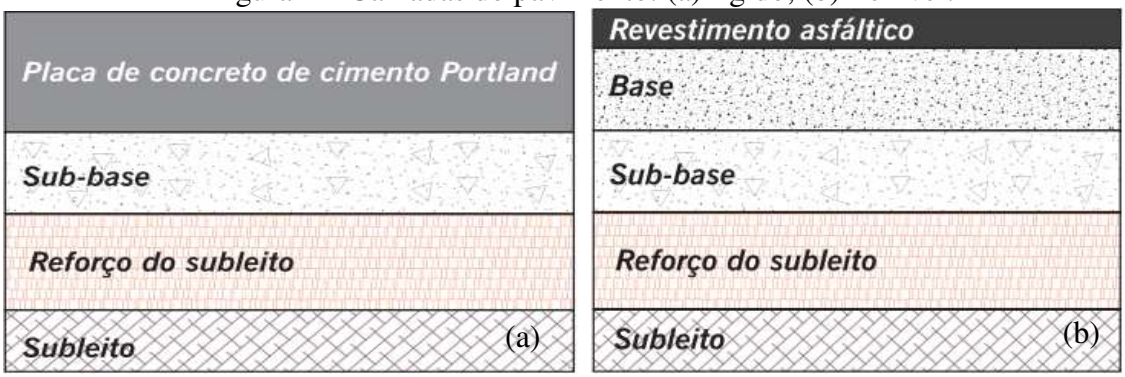
3.1.2.2.2 Pavimentos flexíveis:

Segundo Senço (2005), são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga (Figura 1b).

Pinto (2001) explica que o pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

Segundo Balbo (2007), uma carga atuante sobre um pavimento flexível impõe na estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga.

Figura 1 – Camadas do pavimento: (a) rígido; (b) flexível.



Fonte: Bernucci *et al*. (2007)

3.1.2.2.3 Pavimentos semi-rígidos

O Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006), define pavimentos semi-rígidos aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por placas de concreto de cimento Portland.

Segundo Pinto (2001), o pavimento semi-rígido caracteriza-se por uma base cimentada quimicamente, como exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

3.1.3 Materiais utilizados na pavimentação

Para os materiais de base, sub-base e reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção é uma etapa preliminar que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos. As características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura. Os materiais são basicamente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006) define cal hidráulica como um aglomerante que resulta da calcinação e posterior pulverização por processos de imersão ou suspensão em água, de calcários argilosos a uma temperatura inferior à da fabricação dos cimentos.

Outro material que também vem sendo usado como aditivo e na estabilização química de solos é a cinza volante. De acordo com o Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006), a cinza constitui um subproduto das usinas termelétricas e provém de carvão ou de

combustíveis derivados do petróleo. Sua composição química depende do tipo de combustível queimado na usina.

3.1.3.1 Classificação dos solos para finalidades rodoviárias

Para Balbo (2007), uma classificação ideal de solos seria aquela que busca relacionar o potencial de um solo quanto a uma dada aplicação em camada de pavimento, o que depende não somente de testes de suas propriedades físicas, mas também de suas correlações com o comportamento observado em obras quando empregado.

3.1.3.1.1 Classificação TRB (antigo HRB)

Um sistema de classificação de solos bastante utilizado em pavimentação é o do Highway Research Board (HRB), aprovado em 1945 e que constitui um aperfeiçoamento do antigo sistema a Public Roads Administration, proposto em 1929. Neste sistema, denominado HRB, considera-se a granulometria, o limite de liquidez, o índice de liquidez e o índice de grupo. Este sistema de classificação liga-se intimamente ao método de dimensionamento de pavimentos pelo índice de grupo (Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719, 2006).

Baseia-se tal classificação na granulometria do solo, em seus índices físicos (LL e LP) e no índice de grupo (IG), um parâmetro arbitrário e estimativo da capacidade de suporte do material, que se correlaciona (para os solos de climas temperados) com o valor do CBR do solo por meio de uma expressão (Balbo, 2007).

3.1.3.1.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS

É um sistema de classificação de solos baseado na classificação de Casagrande pelo U.S. Corps of Engineers, em 1952 (SENÇO, 2005).

O Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006) explica que o SUCS se baseia na identificação dos solos de acordo com suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-lhes de acordo com seu comportamento quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações.

Balbo (2007) explica que a simbologia empregada por este sistema classificatório é apresentada fazendo referência a palavras ou expressões da língua inglesa, não devendo ser traduzidas.

3.1.4 Estabilização de Solos

Nardi (2004) explica que é frequente na engenharia rodoviária a existência de solos locais não adequados para a execução da estrutura de bases de pavimentos rodoviários. A utilização do solo local é fator favorável à economia. Para isso, faz-se necessária a alteração de

suas propriedades mecânicas, de forma que o mesmo se enquadre nas especificações rodoviárias. Isso é possível utilizando-se as técnicas de estabilização de solos.

São muitos os procedimentos que se podem utilizar na alteração das propriedades dos materiais, para torná-los aptos a usos específicos e é nisso que se constitui a técnica da estabilização. Pode-se valer de meios mecânicos, da drenagem, de meios elétricos, do calor ou calcinação e de meios químicos (NARDI, 2004).

3.1.4.1 Tipos de estabilização

Modernamente tem-se evitado o uso do termo estabilizar, quando não há adição de estabilizantes do tipo da cal, do cimento etc. Há autores que preferem a designação mais rigorosa "mistura estabilizadas mecanicamente", para diferenciar da adição de estabilizantes químicos (BERNUCCI *et al.*, 2007).

No caso da estabilização química podem-se citar como substâncias estabilizantes: cal hidratada, cimento, cloreto de sódio, sulfato de lignina, cloreto de cálcio, ácido fosfórico e misturas constituídas por cal hidratada e cinza volante (NARDI,2004).

Em projetos de misturas, quando se utilizam os procedimentos da estabilização de solos, geralmente, são fixadas as proporções entre os componentes a serem estudados, menos um, que variará ao longo do processo, servindo como referência de sua ação sobre os outros no produto final. Esse procedimento poderá ser utilizado para cada componente em particular. Os resultados da análise, tradicionalmente, são representados em duas dimensões e sob a forma gráfica cartesiana. Isto ocorre mundialmente na área da estabilização de solos, quando se refere ao aproveitamento de um solo, de mais solos locais ou mesmo no desenvolvimento de novos materiais a serem utilizados na área rodoviária (NARDI, 2004).

3.1.4.1.1 Estabilização granulométrica

Segundo o Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006) são as camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escórias de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações.

Na estabilização mecânica, a granulometria do solo é conservada ou corrigida pela mistura com um ou mais outros solos, antes da compactação, procurando-se assim aumentar a coesão e/ou o ângulo de atrito (NARDI, 2004).

O objetivo principal da estabilização granulométrica é tornar o solo mais resistente aos esforços e mais estável ás deformações e à permeabilidade.

3.1.4.1.2 Estabilização solo-cal

A cal é o estabilizante mais econômico e mais utilizado na estabilização de solos, com aplicação em pavimentações e aterros, sendo utilizado desde a antiguidade. O estudo da aplicação da cal no melhoramento de solos, para pavimentação e fundações superficiais, tem sido realizado em diversas pesquisas, demonstrando sua eficiência no aumento da capacidade de suporte e na redução de recalques (ROSA, 2009).

Segundo o Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719 (2006), o teor de cal mais frequente na mistura é de 5% a 6%, e o processo de estabilização ocorre, por modificação do solo, no que refere à sua plasticidade e sensibilidade à água; por carbonatação, que é uma cimentação fraca; e por pozolanização, que é uma cimentação forte.

Os quatro tipos básicos das reações que ocorrem em misturas solo-cal: carbonatação, troca catiônica, floculação-aglomeração e finalmente, reações pozolânicas. A carbonatação, de "ação imediata", ocorre quando o dióxido de carbono presente nas minúsculas bolhas de ar existentes nos poros do solo e da cal hidratada entra em contato com a matriz solo-cal, refazendo o carbonato de cálcio, gerando o aparecimento de grãos de grandes dimensões, entrelaçando os demais corpos sólidos do solo e compactando o sistema (GUIMARÃES, 2002 *apud* LOPES, 2011).

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), o solo-cal possui maior tempo de cura em relação ao solo-cimento para que haja reações responsáveis pelo aumento de resistência. Seu poder de estabilização varia com sua pureza e origem. As reações rápidas (imediatas) provocam a floculação e permuta iônica, permitindo uma redução da plasticidade, que se traduz em uma melhor trabalhabilidade dos solos, e diminuição da expansibilidade. Já as reações lentas (ação cimentante) são resultantes as reações pozolânicas e de carbonatação. Sendo que a cura do processo em geral é altamente influenciada pela temperatura.

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Sendo mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (INGLES & METCALF, 1972 *apud* ROSA, 2009).

Para verificar qual aditivo mais indicado a ser utilizado na estabilização de solos deve-se levar em consideração a granulometria do solo e a plasticidade. Solos com média a alta

plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994 *apud* ROSA, 2009).

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente máximo (γ_d) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o γ_d continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987 *apud* ROSA, 2009).

Segundo Rosa (2009), de acordo com as diretrizes do TRB (1987) diversas propriedades dos solos naturais afetam as reações pozolânicas do solo-cal, em alguns casos estas são inibidas e não se observa grande produção de agentes cimentantes. Algumas das propriedades e características mais importantes de um solo que influenciam a capacidade de reagir com a cal são:

- pH;
- Teor de carbono orgânico;
- Presença de excessivas quantidades de íons de sódio (+ Na);
- Drenagem natural;
- Mineralogia da argila;
- Grau de intemperização;
- Presença de carbonatos, sulfatos, ou ambos;
- Quantidade de ferro extraível;
- Relação sílica-sesquióxido, e;
- Relação sílica-alumina.

3.1.4.1.3 Estabilização solo-cinza

Segundo Mallmann (1996), passou a haver uma maior preocupação com o estudo dos efeitos das cinzas sobre o meio ambiente, devido ao seu elevado grau de toxidade, a partir da crescente produção destes resíduos nos países que utilizam a queima de carvão como energia.

Conforme Nardi (2004), a cinza volante é uma pozolana heterogênea, na qual as propriedades físicas e químicas variam com a composição do carvão, temperatura de combustão e método de retirada da mesma. Ainda explica que em uma mistura suas reações químicas podem não se verificar caso não haja quantidade suficiente de água na mistura. Muitas cinzas não são reativas e outras o são demais. Deve-se procurar usar cinzas de boa reatividade para produzir uma mistura de boa qualidade.

A adição de cinza volante a solos que inicialmente não seriam adequados à estabilização com cal parte do princípio que adição de material pozolânico como as cinzas

volantes, auxiliavam nos níveis de reação com a cal, quando no solo não existia, originalmente, a quantidade desejada de pozolana. De acordo com Nardi (1975), a estabilização pozolânica provém da reação entre a cinza volante e cal, formando um composto que possui propriedades cimentantes (LOPES, 2011).

3.1.4.1.4 Estabilização solo-cal-cinza

É a pasta que influencia decisivamente na cimentação do material inerte, tendo como fator preponderante a variação relativa entre as proporções da cinza volante, cal hidratada e água. A adição do solo produz um conglomerado pozolânico maciço, de características satisfatórias à pavimentação. Em função dos teores de água na mistura pode-se utilizar a tecnologia do concreto ou da pavimentação. Para o último caso a estabilização de solos, tradicionalmente, é baseada nas curvas de compactação (NARDI, 2004).

Em princípio solos arenosos, com escassez de argila coloidal, não reagem satisfatoriamente à cal. Para a estabilização desses solos, quando o consumo de cimento é muito elevado (economicamente inviável) ou quando a correção da granulometria não é possível (por falta de outros materiais), a adição de cinza volante pode torná-los reativos à cal. A função da cinza volante é, então, substituir a fração fina (argila) do solo, uma vez que pode reagir com a cal, embora o tamanho da cinza seja diferente do da argila (ROSA, 2009).

As reações que ocorrem em sistemas constituídos de materiais como solo, cinza volante, cal e água são relativamente complexas. Segundo Mateos (1961) uma ideia geral do fenômeno físico-químico envolvido é que quando cal e cinza volante são misturadas ao solo, parte desta cal combina-se com as partículas do solo e uma segunda parte, com dióxido de carbono presente nas fases ar e água do solo, e a parcela remanescente, combina-se com a cinza volante, em uma reação de natureza pozolânica (ROSA, 2009).

Quando se adiciona cal e cinza volante a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas. Essas alterações dependem de diversos fatores, entre eles: tipo de solo, tipo e teor de cal, tipo e teor cinza, energia de compactação, período e condições de cura (ROSA, 2006).

A adição de pequenas quantidades de cal modificará as propriedades do solo. A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES & METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRB, 1987 *apud* ROSA, 2009)

A adição de materiais pozolânicos, tais como a cinza volante, auxiliam na produção de níveis de reação desejados com a cal. Consoli *et al* (2001), ao estudar um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que os novos materiais constituídos pelas

misturas entre o solo e os resíduos apresentaram desempenho bastante superior em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade (ROSA, 2009).

A compactação está intimamente ligada à densidade da matéria e afeta diretamente sua resistência. Um decréscimo de massa específica aparente seca de 80,09 KN/m³ a 48,05 KN/m³ frequentemente produzirá uma redução de 25% na resistência à compressão do material, segundo Ahlberg e Barenberg (1970), que estudaram uma mistura de sílica em pó com superfície de 3770 cm²/g e cal hidratada (MALLMANN ,1996).

Em relação ao tempo de cura, embora a norma brasileira estabeleça critérios para verificação da resistência apenas até os 28 dias, trabalhos apontam um crescimento da resistência para 60 e 90 dias de cura. Segundo Rosa (2009), as resistências dos corpos de prova de 60 dias apresentam resultados em torno de 50% mais altos que os corpos de prova de 28 dias e as resistências dos corpos de prova de 90 dias apresentaram resultados em torno de 65% mais altos que os corpos de prova de 60 dias. Isso mostra que o tempo de cura é um fator de grande importância na resistência da mistura.

Mallamann (1996) observou que até os 7 dias de cura na temperatura de 10 a 21ºC os valores foram iguais a zero, apontando que o fator temperatura influencia os resultados de resistência mais do que o tempo de cura. Cita também que Mateos concluiu que a temperatura é responsável pela aceleração da reação pozolânica e que a atividade pozolânica é fortemente influenciada pela temperatura.

Segundo Nardi (1975), a presença de matéria orgânica influencia negativamente a reação e a água utilizada deverá estar livre de impurezas como óleo, ácidos e matéria orgânica.

3.2 COLETA DE MATERIAIS

3.2.1 O Solo

O solo utilizado no trabalho foi coletado na Avenida dos Portugueses, no bairro Anjo da Guarda, próximo a Universidade Federal do Maranhão (Figura 2), em uma jazida que hoje se encontra esgotada tendo em vista sua utilização na forma de matéria prima para fabricação de materiais cerâmicos para a construção civil com tijolos e telhas. Foram realizadas 2 coletas de solo no local. A primeira coleta foi insuficiente para a realização de todos os ensaios propostos, logo existiu a necessidade de uma segunda coleta. A Figura 3 ilustra a coleta do solo utilizado.

Figura 2 – Localização da retirada de amostra de solo.

Fonte: Google Maps (2016)

Figura 3 – Coleta da amostra de solo.

Fonte: Próprio autor (2016)

3.2.2 A Cinza Volante

A cinza volante (Figura 4) utilizada no trabalho foi cedida pela indústria geradora do resíduo, porém, conforme termo de sigilo firmado, não é possível maior identificação. Foram realizadas 2 coletas de amostra. A primeira coleta também foi insuficiente para a realização de todos os ensaios, existindo assim a necessidade de uma segunda.

Figura 4 – Amostra de cinza volante.

Fonte: Próprio autor (2016)

3.2.3 Cal

O trabalho foi iniciado com a utilização da cal hidratada CH-II, da marca JKAL, vendida em sacos de 15 kg. Com o decorrer do trabalho sua quantidade também mostrou-se insuficiente, sendo necessário a obtenção de uma maior quantidade. Porém o produto não foi mais encontrado no mercado da região com as mesmas características. Dessa forma optou-se em continuar a pesquisa utilizando a única opção de cal hidratada que havia no mercado. Assim foi utilizada como segunda opção a cal hidratada CH-I, da marca Supercal, sendo que os 2 tipos de cal são regulamentadas pela NBR 7175. A Figura 5 ilustra a amostra de cal hidratada (CH-I). A retirada da cal para os ensaios foi gradativa e na medida de cada traço para não haver reação de carbonatação do cálcio e prejudicar a qualidade dos corpos de prova.

Figura 5 – Amostra de cal hidratada.

Fonte: Próprio autor (2016)

3.3 ENSAIOS

Para uma boa análise dos materiais utilizados nesse trabalho, foram realizados ensaios de caracterização do solo utilizado bem como a verificação de seus índices físicos e sua resistência. Todos os ensaios foram realizados de acordo com suas respectivas normas vigentes e são descritos detalhadamente nesse capítulo. Na realização dos ensaios, houve a participação de profissional experiente e habilitado no manuseio dos equipamentos para maior confiabilidade nos processos e nos resultados.

3.3.1 Granulometria

A composição granulométrica de um solo permite o conhecimento das porcentagens das partículas constituintes em função de suas dimensões, iniciando assim, a caracterização do material, o que representa um elemento constituinte da fundação em que se apoia um pavimento, quer como constituinte das próprias camadas do pavimento (SENÇO, 2005).

Ensaio regulamentado pela norma DNER-ME 051/94, denominada Solos – Análise granulométrica – método de ensaio.

A análise granulométrica é constituída de 2 etapas, o peneiramento (grosso e fino) e a sedimentação.

No peneiramento o material é espalhado para secar e depois passa por um processo de quarteamento para dividir e homogeneizar a amostra. Cerca de 1500 g são separadas para o peneiramento grosso, e outra porção com aproximadamente 200 g é passada pela peneira de 2,0 mm para o peneiramento fino (Figura 6) e determinação da umidade higroscópica.

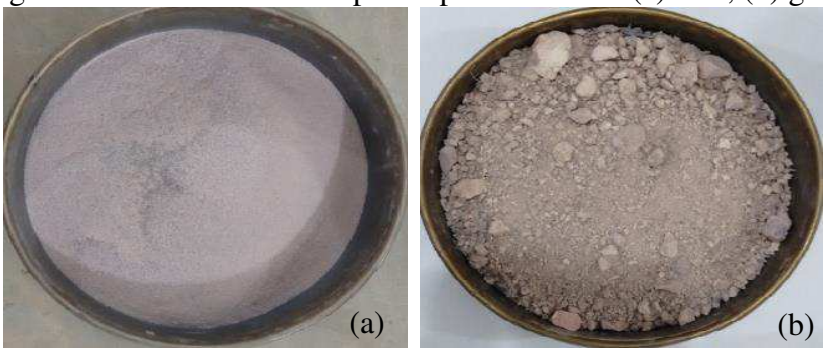
O material separado para o peneiramento grosso será lavado na peneira de abertura de 2,00 mm e o do fino na peneira de 0,075 mm (Figura 7). Logo após o material retido em cada peneira deverá ser seco em estufa com temperatura de 100º a 105ºC. Depois é realizado o peneiramento por um conjunto de peneiras com abertura de 50,8mm; 25,4 mm; 9,5 mm; 4,8 mm; 2,0 mm; 0,42 mm e 0,075 mm, inclusive com tampa e fundo (Figura 8).

Após a agitação das peneiras com um auxílio de um agitador mecânico será determinado a massa retida acumulada de cada peneira (Figura 9).

Por diferença em relação à massa total, obtém-se a massa que passa em cada peneira, a qual é apresentada numa relação percentual. Normalmente, os resultados referem-se às porcentagens que passam. Em alguns casos, utilizam as porcentagens retidas (SENÇO, 2005).

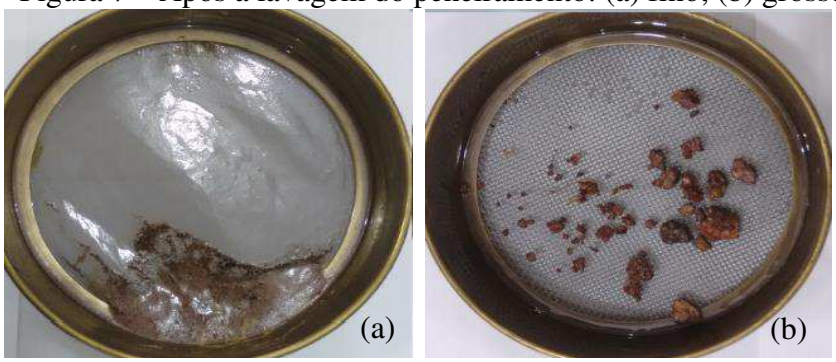
Já a sedimentação consiste em medir a velocidade de deposição das partículas num meio líquido, associando-se os valores ao diâmetro dessas partículas (Lei de Stokes) (SENÇO, 2005).

Figura 6 – Amostras de solo para o peneiramento: (a) fino; (b) grosso.



Fonte: Próprio autor (2015)

Figura 7 – Após a lavagem do peneiramento: (a) fino; (b) grosso.

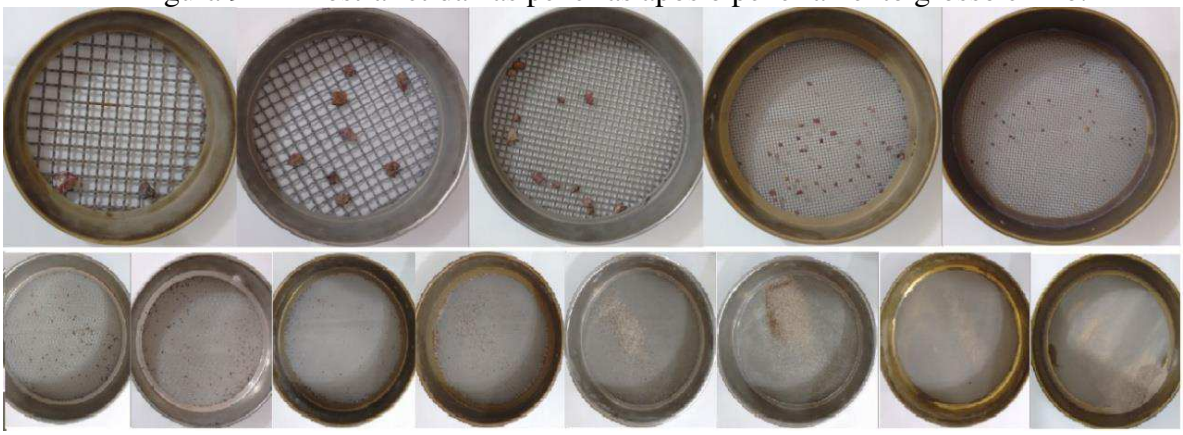


Fonte: Próprio autor (2015)

Figura 8 – Conjunto de peneiras.

Fonte: Próprio autor (2015)

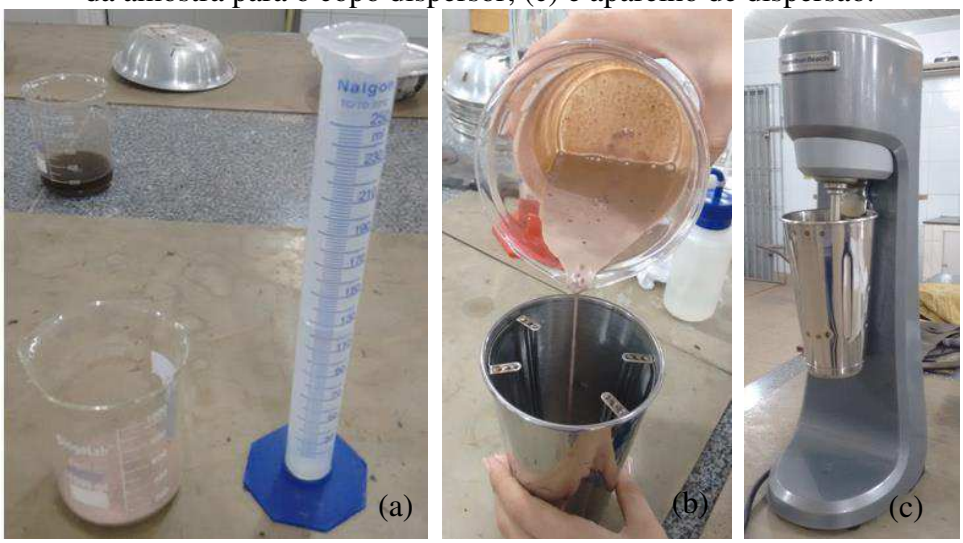
Figura 9 – Amostra retida nas peneiras após o peneiramento grosso e fino.



Fonte: Próprio autor (2015)

A amostra para o ensaio de sedimentação é constituída de 120g se o for arenoso ou 70 g se for siltosos e argilosos. Depois de pesado o material, coloca-se em um béquer o material adicionado de 125 ml de defloculante com o tempo mínimo de descanso de 12 horas (Figura 10a). Após o tempo, é feita a transferência do material para o copo do aparelho difusor (Figura 10b), lavando as paredes do béquer com água destilada. O material é mantido em dispersão no aparelho difusor por um tempo que varia de 5 a 15 min dependendo do seu valor de IP (Figura 10c).

Figura 10 – Etapas da sedimentação: (a) amostra de solo e defloculante; (b) transferência da amostra para o copo dispersor; (c) e aparelho de dispersão.

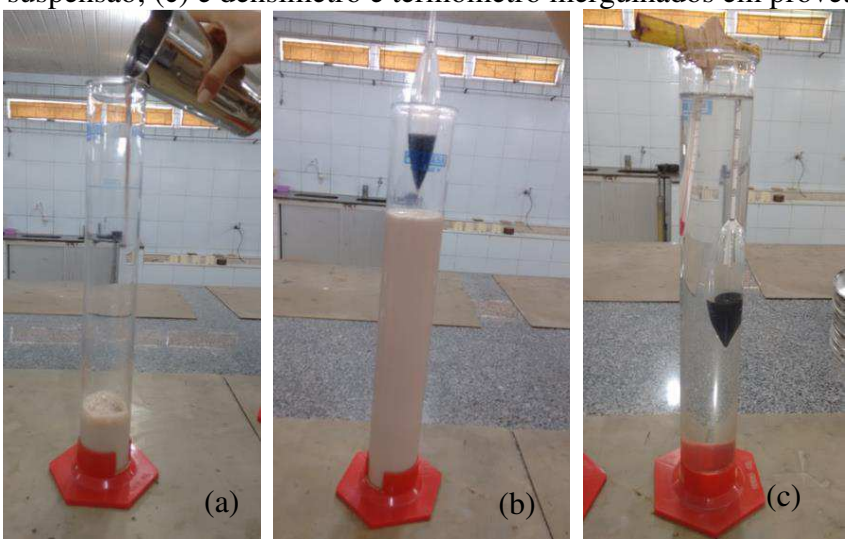


Fonte: Próprio autor (2016)

Após o tempo de dispersão o material é transferido para uma proveta de 1000 ml (Figura 11a), lavando a parede do copo dispersor com água destilada para não ficar material preso. Completa-se a proveta com água destilada até atingir 1000 ml. A boca da proveta é tampada com uma mão e a outra mão segura a sua base para executar movimentos energéticos

de rotação durante 1 minuto que permitirão a mistura continuar em dispersão após o acréscimo de água destilada. Logo após a agitação, o densímetro é mergulhado cuidadosamente a suspensão (Figura 11b) e são iniciadas as leituras em seus tempos e anotada as respectivas temperaturas da água no momento da leitura (Figura 11c).

Figura 11 – Etapas da sedimentação: (a) transferência da suspensão a proveta; (b)mergulho do densímetro na suspensão; (c) e densímetro e termômetro mergulhados em proveta com água.



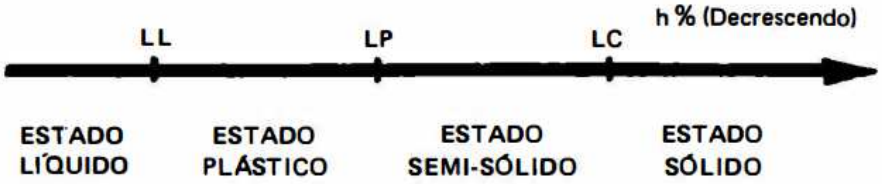
Fonte: Próprio autor (2016)

3.3.2 Limites de Consistência

SENÇO (2005) explica que a influência das frações finas do solo não fica definida apenas pela granulometria, e, assim, com apenas esse ensaio, não se pode ter noção exata do comportamento do conjunto de partículas. As propriedades plásticas dependem da umidade do solo, da forma das partículas e da composição química e mineralógica dessas partículas. Daí serem necessários outros ensaios para definir as propriedades que podem interessar ao estudo.

A figura 12 ilustra os estados de consistências e suas fronteiras, ou seja, os limites de consistência.

Figura 12 – Limites de consistência.



Fonte: Caputo (1988)

3.3.2.1 Limite de Liquidez

Ensaio regulamentado pela norma DNER-ME 122/94, denominada Solos – determinação do limite e liquidez – método de referência e método expedito.

A norma define como, teor de umidade do solo com o qual se unem, em um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo colocado na concha de um aparelho normalizado (Casagrande), sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho. O limite de liquidez marca a transição do estado plástico ao estado líquido. É representado por LL, expresso em porcentagem.

Para o ensaio de Limite de Liquidez utilizam-se os seguintes equipamentos, como ilustra a Figura 13:

a) Aparelho padronizado Casagrande;

b) Cinzel com seção padronizada para abertura de 1 cm;

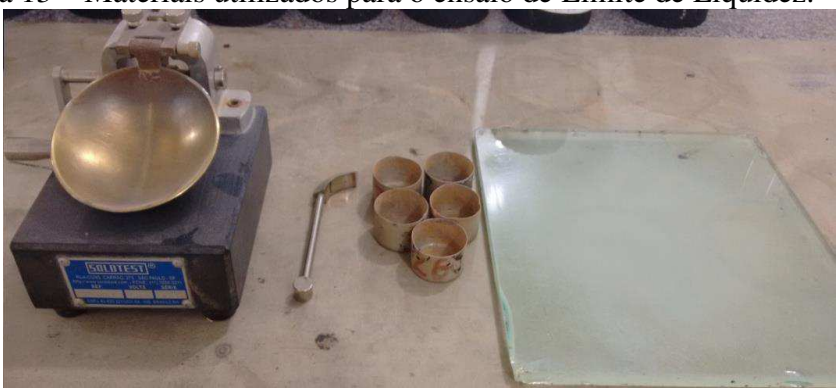
c) Balança sensível a 0,01g;

d) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;

e) Espátula com lâmina flexível de cerca de cm de comprimento e 2 cm de largura;

f) Cápsulas de alumínio para colocar amostras de solo.

Figura 13 – Materiais utilizados para o ensaio de Limite de Liquidez.

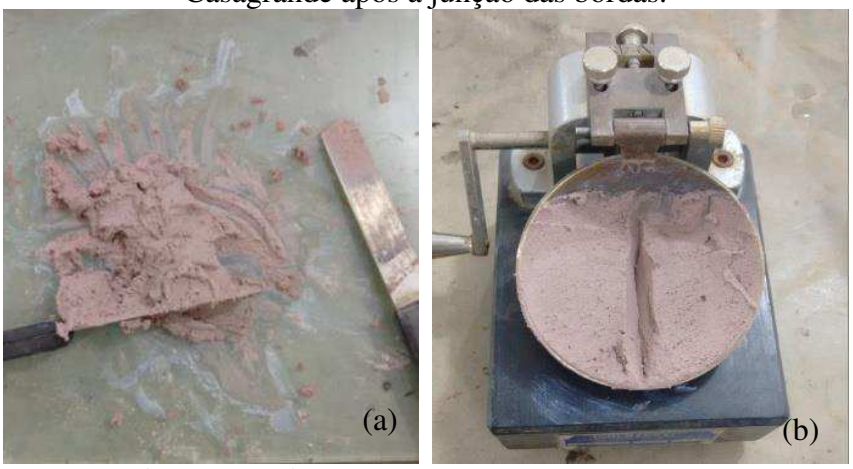


Fonte: Próprio autor (2015)

O ensaio é realizado com cerca de 70 g de material passante na peneira de Nº 40. Acrescenta-se cerca de 15 a 20 cm³ de água ao material que é homogeneizado com espátula até a sua uniformidade tornando-se uma massa plástica (Figura 14a). Depois toma-se uma porção suficiente da mistura e coloca-se na concha de tal modo que ocupe aproximadamente 2/3 da superfície da concha. A massa do solo é alisada até que ela se apresente com 1 cm de espessura no ponto de máxima espessura.

Com o cinzel, é feito uma abertura, de cerca de 1 cm. Depois de feito a abertura, começa-se a girar a manivela do aparelho numa velocidade de aproximadamente duas voltas por segundo até que as bordas inferiores de canelura se unam (Figura 14b). Anota-se o número de golpes necessários até a junção das bordas.

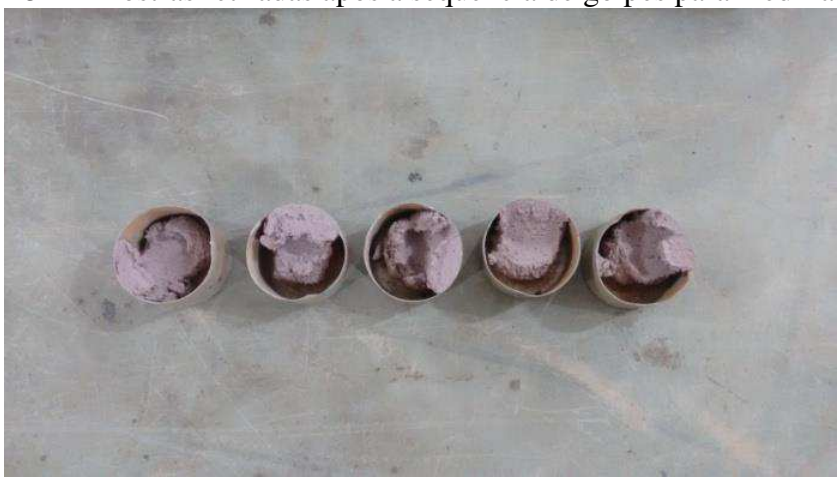
Figura 14 – Etapas do Limite de Liquidez: (a) preparo da amostra; (b) concha do aparelho Casagrande após a junção das bordas.



Fonte: Próprio autor (2015)

Depois é colhida uma porção do solo da amostra ensaiada para pesagem e é retirada a unidade através de estufa (Figura 15).

Figura 15 – Amostras retiradas após a sequência de golpes para medir a umidade.



Fonte: Próprio autor (2015)

Realizando o processo no mínimo 5 vezes, variando apenas o teor de unidade é possível montar uma reta gráfica com o teor de umidade na abscissa em escala aritmética e o número de golpes nas ordenadas em escala logarítmica. O valor da ordenada correspondente a 25 golpes levará ao valor do limite de liquidez da amostra apontado na abscissa.

3.3.2.2 Limite de Plasticidade

O ensaio de Limite de Plasticidade é regulamentado pela norma DNER-ME 082/94, denominada Solos – determinação do limite de plasticidade.

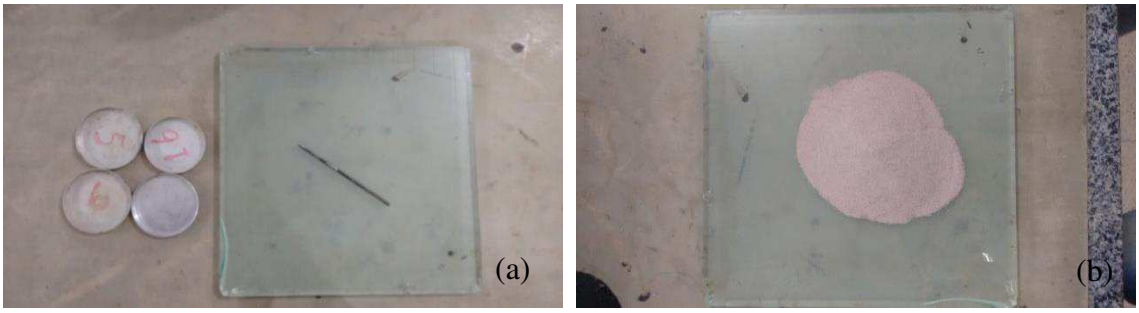
Corresponde à transição do estado de consistência semissólida para o estado de consistência plástica com o aumento da umidade.

Para o ensaio de Limite de Liquidez utilizam-se os seguintes equipamentos como ilustra a Figura 13a:

a) Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
b) Espátula com lâmina flexível de cerca de 8 cm de comprimento e 2 cm de largura;
c) Placa de vidro de superfície esmerilhada;
d) Cilindro de comparação de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento;
e) Balança com capacidade de 200 g, sensível a 0,01 g;
f) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105ºC e 110ºC;
g) Cápsulas de alumínio para colocar as amostras de solo.

A realização do ensaio é feita com 50 g de amostra seca (Figura 16b).

Figura 16 – Materiais e amostra de solo utilizado para a determinação do Limite de Plasticidade.

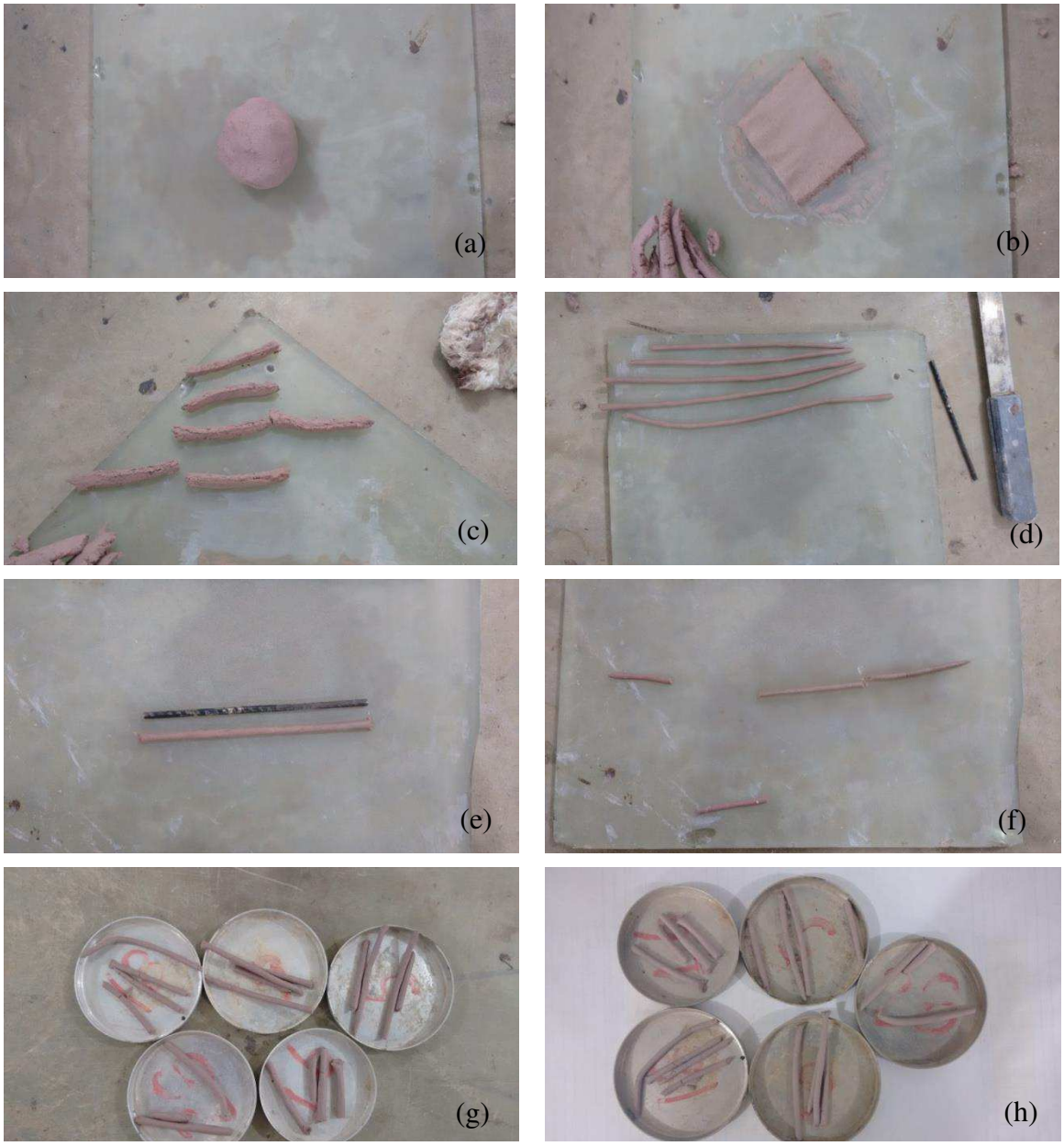


Fonte: Próprio autor (2015)

É adicionada água à amostra aos poucos e homogeneizando com a espátula até formar uma massa plástica. Separa-se cerca de 20 g da massa e inicia-se um movimento helicoidal rolando a massa com a mão sobre a placa de vidro até obter uma corda cilíndrica de aproximadamente 3 mm de diâmetro. Após atingir o diâmetro corta-se o cilindro em 6 a 8 pedaços e amassa novamente para repetição do ensaio até que o cilindro se solo desagregue sob a pressão da rolagem e não seja possível formar um novo cilindro com o solo.

Após essa etapa transferem-se imediatamente os pedaços de solo para pesagem e retirada da umidade. As operações são repetidas até se obter pelo menos três valores de umidade que não tenham diferença de mais de 5 % da média. O limite de plasticidade é expresso pela média aritmética dos valores encontrados. A Figura 17 ilustra as etapas de realização do ensaio.

Figura 17 – Etapas de execução do ensaio de Limite de Plasticidade; (a) moldagem do solo; (b) amassamento do solo; (c) fita de solo; (d) moldagem helicoidal das fitas; (e) comparação com o cilindro padrão de 3 mm; (f) desagregação do cilindro; (g) amostras na umidade de desagregação; (h) amostras secas em estufa.



Fonte: Próprio autor (2015)

3.3.2.3 Índice de Plasticidade

Um índice elevado de plasticidade indica um solo que pode absorver grande quantidade de água, absorção essa que provoca aumento sensível de volume. Com a retirada da água, tem-se elevada contração que, no campo, significa elevado recalque. Nessas condições, o solo apresenta inconvenientes com o suporte, devido à instabilidade. Ao contrário, solos com baixo índice de plasticidade, ou NP, não apresentam esses inconvenientes (SENÇO, 2005).

A determinação do índice de plasticidade é feita por meio dos valores obtidos nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.

$$IP = LL - LP, \text{ em } \%$$

Os solos são classificados da seguinte forma devido ao índice de plasticidade:

a) Fracamente plásticos ---------- $1 < IP < 7$

b) Mediamente plásticos ---------- $7 < IP < 15$

c) Altamente plásticos ----------$IP > 15$

3.3.3 Compactação

Compactação é a forma de diminuir os vazios do solo comprimindo-os por meio de agentes mecânicos.

Ralph R. Proctor, em 1933, na Califórnia observou que a densidade atingida na operação de compactação dependia da umidade do solo, quando da compactação. Essa observação serviu de base para a construção de toda uma técnica de compactação e a prévia determinação de qual a umidade mais conveniente para se obter um máximo de compactação para uma determinada energia (SENÇO, 2005).

O ensaio de Compactação é regulamentado pela norma DNER-M 162/94, denominada Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

Para o ensaio de Compactação utilizam-se os seguintes equipamentos:

a) Molde cilíndrico metálico de 15,24 ± 0,05 cm de diâmetro interno e 17,78 ± 0,02 cm de altura e cilindro complementar com mesmo diâmetro do molde;

b) Disco espaçador metálico de 15,00 ± 0,05 cm de diâmetro e de altura igual a 6,35 ± 0,02 cm;

c) Soquete metálico cilíndrico, de face inferior plana, de diâmetro igual a 5,0 ± 0,01 cm, pesando 4,536 ± 0,01 kg, e com altura de queda igual a 45,72 ± 0,15 cm;

d) Extrator de amostra de molde cilíndrico;

e) Balança com capacidade de 20 kg, sensível a 1 g;

f) Balança com capacidade de 1 kg, sensível a 0,1 g;

g) Estufa capaz de manter a temperatura a 110ºC ± 5ºC;

h) Régua de aço biselada, rija, de cerca de 30 cm de comprimento;

i) Bandeja de alumínio com capacidade de cerca de 20 l, com fundo de diâmetro mínimo de 25 cm;

j) Papel de filtro circular de cerca de 15 cm de diâmetro;

k) Cápsulas de alumínio para colocar amostras de solo.

Separa-se cerca de 6000 g para o ensaio. O primeiro passo consiste da homogeneização do solo com a adição de água (Figura 18).

Figura 18 – Adição de água na amostra.

Fonte: Próprio autor (2016)

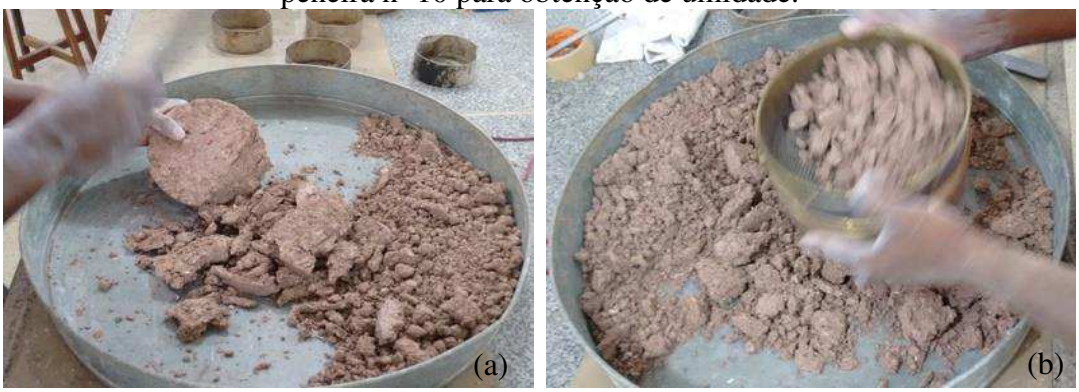
Consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente 1000 cm³, em quatro ou cinco camadas sucessivas, sob a ação de determinada quantidade de golpes que varia de acordo com a energia de compactação, aplicados por meio de um soquete, pesando 4,5 Kg, caindo de 45,7 cm de altura (Figura 19a). Após a compactação das camadas o conjunto molde solo deve ser pesado para determinação de sua massa específica (Figura 19b). Logo após é realizada a desmoldagem do material utilizando um extrator de amostra (Figura 19c).

Figura 19 – Etapas de Compactação: (a) compactação por camadas; (b) pesagem do conjunto molde solo; (c) extração da amostra de solo.

Fonte: Próprio autor (2016)

Depois da desmoldagem do solo, faz-se a fragmentação da amostra compactada (Figura 20a). Utilizando a peneira de abertura de 2 mm retira-se uma quantidade de material que passa para determinação da umidade (Figura 20b).

Figura 20 – Etapas de Compactação: fragmentação da amostra; (b) material passado na peneira nº 10 para obtenção de umidade.



Fonte: Próprio autor (2016)

O procedimento é repetido para diferentes teores de umidade, determinando-se, para cada um deles, a massa específica aparente seca. Com valores obtidos traça-se a curva MEAS =f(u), onde se obterá o ponto correspondente a $MEAS_{máx}$ e U_{ot}.

Para o traçado da curva é conveniente a determinação de no mínimo cinco pontos, procurando-se fazer com que dois deles se encontrem no ramo seco, um próximo a umidade ótima e os outros dois no ramo úmido.

3.3.4 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Rosa (2009) explica que o ensaio de compressão simples tem sido utilizado na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores que influenciam sobre a resistência dos solos tratados. Por essa razão esta pesquisa não irá realizar o ensaio de CBR para as misturas com a adição de cal, apenas para o solo natural e as misturas solo cinza.

A norma DNER-ME 180/94 denominada Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples, é regulamentadora do ensaio.

Para o ensaio de RCS foram utilizados:

a) Molde cilíndrico de aço com 10 cm de diâmetro interno e 36 cm de altura;
b) Disco espaçador de aço com 10 cm de altura;
c) Soquete de compactação de aço com 4,54 Kg de massa e uma altura de queda livre de 45,72 cm. A face de compactação no pé do soquete é plana e circular;
d) Balança com capacidade de 10 kg, sensível a 0,1 g;
e) Espátula de lâmina flexível, de cerca de 20 cm de comprimento;
f) Máscara de proteção à respiração;
g) Luvas de borracha;
h) Bandeja de alumínio com capacidade de cerca de 20 l, com fundo de diâmetro de 25 cm;
i) Extrator de amostra de molde cilíndrico;
j) Papel Filme de PVC;
k) Sacos plásticos com capacidade de 20 litros com cerca de 45 cm de altura;
l) Caixa de isopor de 120 litros;
m) Serragem úmida de madeira;
n) Prensa automática de ruptura com capacidade de 5000 Kgf, que permite a aplicação continua de carga, com velocidade de 0,1 a 50,8 mm/min, até a ruptura do corpo de prova;

Para a realização do ensaio, o solo é homogeneizado, seco ao ar e passado na peneira de 25,4 mm. As quantidades de solo, cinza e cal são pesadas de acordo com as porcentagens de cada traço, tomando como a porcentagem de solo apenas o valor de sua massa seca.

De acordo com DNER-ME 180/94 o CP é moldado de forma a atingir a $MEAS_{máx}$ e a $U_{ót}$ do material encontrado com o ensaio de compactação. Para isso é fixado a energia de compactação desejada, podendo ser 0,59 MN.m por m³ para a Normal, 1,29 MN.m por m³ para a Intermediária e 2,69 MN.m por m³ para a Modificada.

É fixada a altura de 20 cm para o corpo de prova, obtendo dessa forma o volume de material compactado. Com a utilização da fórmula retirada da norma DNER-ME 180/94 é possível obter o número de golpes por camada para uma quantidade de camadas estipuladas.

$$n = \frac{E.V}{9{,}8.P.H.Nc}$$

Onde,

n – número de golpes por camada;

E – energia de compactação (trabalho por unidade de volume) em N.m/m³;

V – volume do material compactado em m³;

H – altura do soquete em m;

N_c – número de camadas.

Dessa maneira obteve-se para o Proctor Intermediário 4 camadas com 25 golpes cada.

Utilizando os dados de $MEAS_{máx}$ e $U_{ót}$ é calculado a quantidade exata de água a ser adicionada à mistura assim também como a massa exata de material para cada camada a fim de ao final da compactação das 4 camadas obter um CP com os 20 cm de altura.

A compactação é realizada dentro de um monde cilíndrico por meio de um soquete (Figura 21a). Durante a compactação do CP é retirada uma quantidade de cerca de 60 g de material para o cálculo da umidade, o qual é posto em estufa com temperatura em torno de 105ºC por um tempo de 24 h. Após a compactação é realizada sua extração por meio de um extrator de amostra. Em seguida pesa-se o CP e é feita a medição de sua altura. A partir disso é possível obter os valores de MEAS e umidade.

O próximo passo é o condicionamento do CP para que ele não venha a perder ou ganhar umidade do ambiente. O corpo de prova é enrolado em papel filme de PVC e posto dentro de um saco plástico sendo vedado com fita adesiva (Figura 21b). Após o procedimento ele é levado para dentro de uma caixa de isopor cheia de serragem úmida de madeira, com a finalidade de conservar a temperatura do ambiente durante os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias (Figura 21c).

Figura 21 – Equipamentos e etapas da compactação: (a) conjunto de molde, espaçador e soquete; (b) CPs dentro do saco plástico; (c) CPs dentro do isopor com serragem úmida.

Fonte: Próprio autor (2016)

No trabalho optou-se por não deixar os CPs submersos em água durante 24 h antes da ruptura já que algumas pesquisas publicadas apontam não haver diferença significativa nos resultados de resistência a compressão simples. Após o tempo de cura de cura é realizada a ruptura do CP (Figura 22). A compressão foi realizada por uma prensa automática, adotando a velocidade de ruptura de 0,1 mm/min até o ponto de ruptura.

Figura 22 – Ruptura do corpo de prova.

Fonte: Próprio autor (2016)

3.3.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração (RT) foi desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro para concreto, e posteriormente adaptado para uso com solo. A aplicação de duas forças concentradas diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico gera, ao longo de seu diâmetro, tensões de tração perpendiculares a este diâmetro. Este ensaio possui facilidade e

rapidez de execução, e utiliza basicamente os mesmos equipamentos usados para obtenção da resistência à compressão do concreto (FALCÃO; SOARES, 2002 *apud* ROSAS, 2013).

Conforme Villar et al. (2007) *apud* Rosas (2013), o valor da resistência à tração de solos é muito baixo se comparado com a resistência à compressão ou cisalhamento. No entanto, com a busca de um melhor entendimento do processo de fissuramento dos solos, uma maior atenção vem sendo dada a este tipo de estudo.

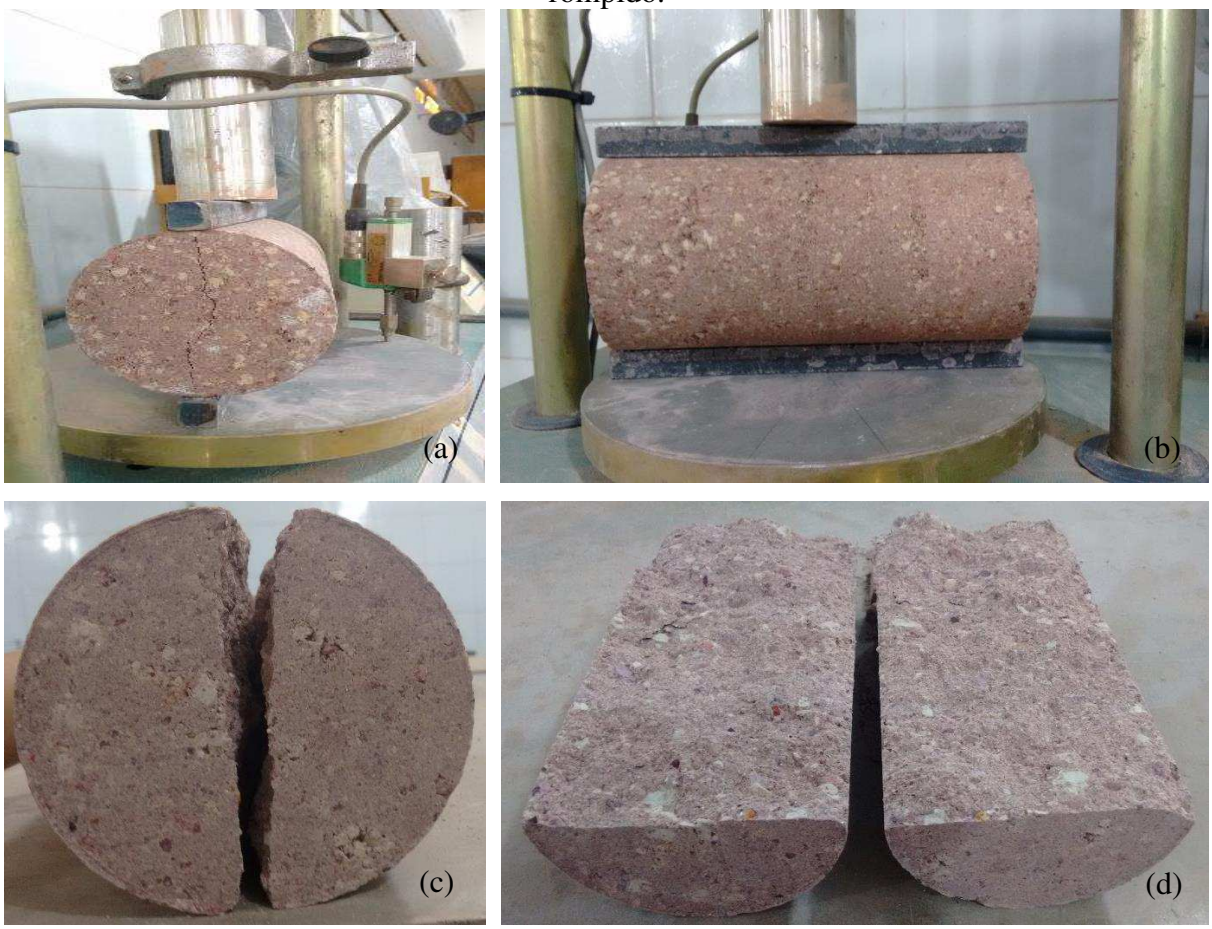
A norma DNER-ME 181/94 denominada Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral, é regulamentadora do ensaio.

Para o ensaio de RTCD foram utilizados:

a) Molde cilíndrico de aço com 10 cm de diâmetro interno e 36 cm de altura;
b) Disco espaçador de aço com 10 cm de altura;
c) Soquete de compactação de aço com 4,54 Kg de massa e uma altura de queda livre de 45,72 cm. A face de compactação no pé do soquete é plana e circular;
d) Balança com capacidade de 10 kg, sensível a 0,1 g;
e) Espátula de lâmina flexível, de cerca de 20 cm de comprimento;
f) Máscara de proteção à respiração;
g) Luvas de borracha;
h) Bandeja de alumínio com capacidade de cerca de 20 l, com fundo de diâmetro de 25 cm;
i) Extrator de amostra de molde cilíndrico;
j) Papel Filme de PVC;
k) Sacos plásticos com capacidade de 20 litros com cerca de 45 cm de altura;
l) Caixa de isopor de 120 litros;
m) Serragem úmida de madeira;
n) Prensa automática de ruptura com capacidade de 5000 Kgf, que permite a aplicação continua de carga, com velocidade de 0,1 a 50,8 mm/min, até a ruptura do corpo de prova;
o) 2 frisos de aço com seção transversal de 1x1 cm e 22 cm de comprimento;

Os procedimentos de moldagem, condicionamento e tempo de cura adotado para os CPs no ensaio de RTCD é igual ao dos CPs de RCS, já explicado no item 2.3.4, divergindo apenas no processo de ruptura que está ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Ruptura do corpo de prova: (a) vista frontal na prensa de rupatura; (b) vista lateral na prensa de ruptura; (c) detalhe frontal do CP rompido; (d) vista interna do CP rompido.



Fonte: Próprio autor (2016)

Após os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, foi realizada a ruptura dos CPs. A tração por compressão diametral foi realizada por meio de adaptações na prensa automática, com a centralização de 2 frisos de aço no centro inferior e superior do CP, utilizando uma velocidade de ensaio de 1,44 mm/min até o ponto de ruptura.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela expressão:

$$RTCD = \frac{2.F}{100.\pi.d.l}$$

Onde,

RTCD – resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F – carga máxima obtida no ensaio, em N;

d – diâmetro do corpo de prova, em cm;

l – altura do corpo de prova, em cm.

4. RESULTADOS

Avaliou-se em laboratório o comportamento mecânico de várias composições de materiais:

(i) Solo 1 e 2 em seu estado natural;

(ii) Mistura 1: solo 1 com a adição de cinza volante na proporção de 12%;

(iii) Mistura 2: solo 2 com a adição de cinza volante na proporção de 12%;

(iv) Mistura 3: solo 1 com a adição de cal hidratada (CH-II);

(v) Mistura 4: solo 2 com a adição de cal hidratada (CH-I);

(vi) Mistura 5: solo 1 com a adição de cinza volante e cal hidratada (CH-II), fixando a porcentagem de cal em 4% e cinza volante em 12%;

(vii) Mistura 6: solo 2 com a adição de cinza volante e cal hidratada (CH-I), fixando a porcentagem de cal em 4% e cinza volante em 12%;

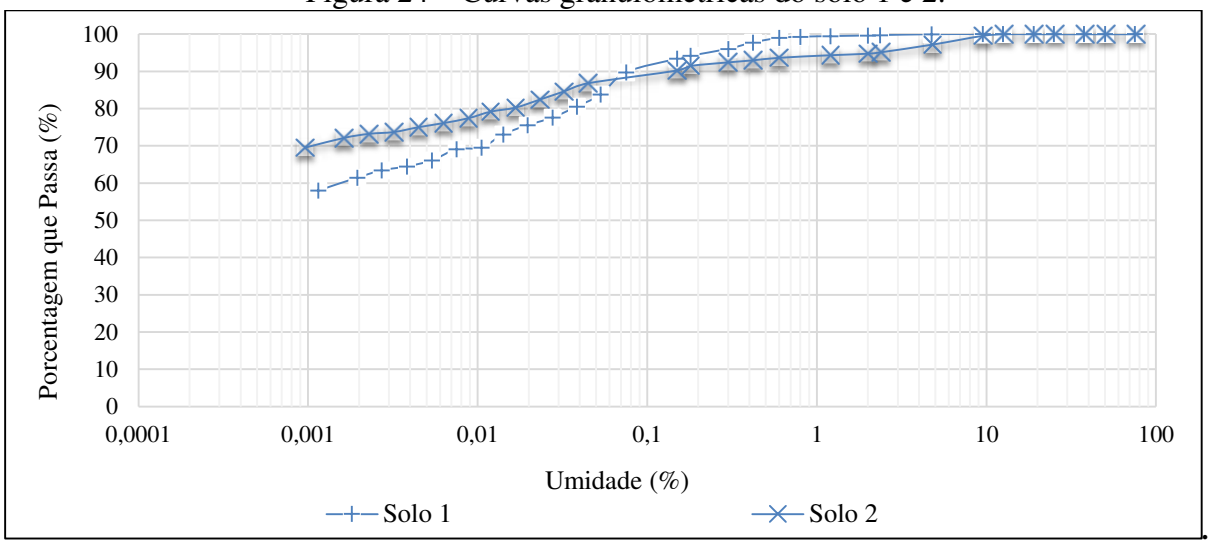
Resultando em um total de 8 amostras.

Com as análises mecânicas das propriedades do solo natural torna-se possível comparar o ganho de resistência obtido após as estabilizações químicas nas misturas. Com a variação das misturas fixando suas proporções é possível identificar a influência de cada reagente químico sobre os resultados de resistência a compressão simples em laboratório.

4.1 GRANULOMETRIA

As curvas granulométricas do solo 1 e 2, estão representadas na Figura 24 e Apêndices de A à D.

Figura 24 – Curvas granulométricas do solo 1 e 2.



Fonte: Próprio autor (2016)

A Tabela 1 contém as porcentagens correspondentes a cada parcela de material contido nas 2 curvas. Dessa forma observa-se que o solo 1 possui 58,00% de argila coloidal, enquanto que o solo 2 possui 69,56%.

Tabela 1 – Porcentagens de materiais.

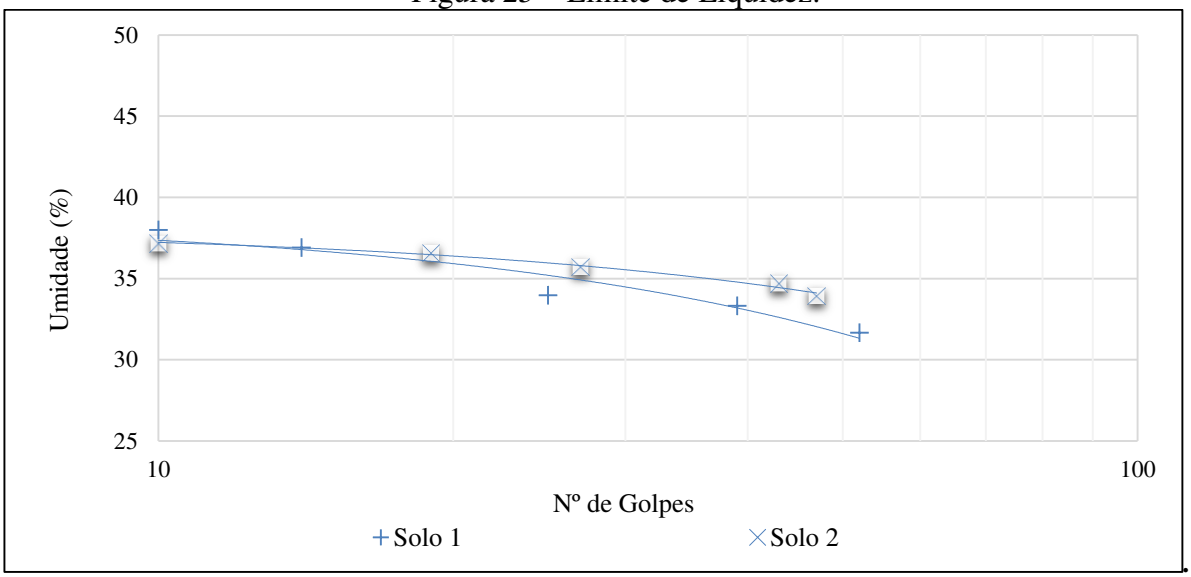
	Solo 1	Solo 2
Pedregulho acima de 2,0 mm (%)	0,39	5,22
Areia grossa 2,0 a 0,42 mm (%)	1,85	2,33
Areia fina 0,42 a 0,075 mm (%)	8,00	5,88
Silte 0,075 a 0,005 mm (%)	23,67	11,51
Argila 0,005 a 0,001 mm (%)	8,08	5,50
Argila coloidal 0,001 mm (%)	58,00	69,56

Fonte: Próprio autor (2016)

4.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Foram realizados os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade do Solo 1 e 2, e logo após foram calculados seus Índices de Plasticidade (Apêndices E e F). A Figura 25 contém os pontos em dispersão de cada material ensaiado e suas respectivas retas ajustadas linearmente para a obtenção da umidade aos 25 golpes, correspondentes ao valor do LL.

Figura 25 – Limite de Liquidez.



Fonte: Próprio autor (2016)

A Tabela 2 fornece os valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade dos materiais. Nota-se assim que os Índices de Plasticidade nos dois solos são iguais.

Tabela 2 – Resumo de Limites de Consistência.

	Solo 1	Solo 2
LL (%)	35	36
LP (%)	25	26
IP (%)	10	10

Fonte: Próprio autor (2016)

4.3 CLASSIFICAÇÃO

Por meio das curvas granulométricas e Limites de Consistência foi possível a classificação dos solos em questão. Observando por meio da Tabela 3 que não houve mudança de classificação TRB (Anexo A) e SUCS (Anexo B e C), comprovando que os dois possuem as mesmas características físicas.

Tabela 3 – Classificação TRB e SUCS.

	Solo 1	Solo 2
Classificação TRB	A-4	A-4
Classificação SUCS	CL	CL

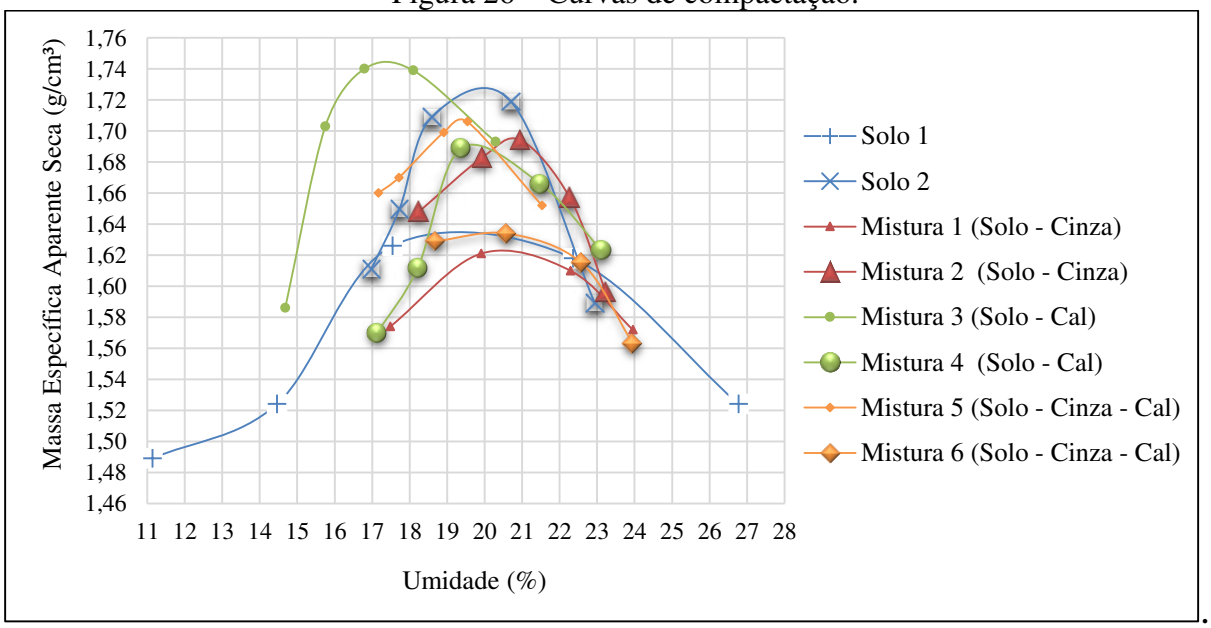
Fonte: Próprio autor (2016)

4.4 COMPACTAÇÃO

4.4.1 Compactação

Para os solos 1 e 2, e para cada uma das 6 misturas foram realizados ensaios de compactação com Energia de Proctor Intermediário, sendo as curvas apresentadas na Figura 26 e Apêndices de G à N. A partir das curvas foram obtidos os parâmetros de projeto, ou seja, a Massa Específica Aparente Seca Máxima ($MEAS_{máx}$) e a Umidade Ótima (U_{ot}) para compactação dos corpos de prova visando o ensaio mecânico de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD).

Figura 26 – Curvas de compactação.



Fonte: Próprio autor (2016)

A Tabela 4 contém o resumo de tais curvas, notando-se que a Umidade Ótima das misturas variou entre 17,38% e 20,80% estando o solo natural entre esse intervalo com U_{ot} de 19,40 e 20,00%. Já em relação a $MEAS_{máx}$ os resultados variaram entre 1,623 g/cm³ e 1,745 g/cm³, estando entre esse intervalo o $MEAS_{máx}$ dos solos naturais correspondente a 1,637 e 1,728 g/cm³.

Tabela 4 – Resumo de $MEAS_{máx}$ e Uót.

	Solo 1	Solo 2	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5	Mistura 6
MEASmáx (g/cm³)	1,637	1,728	1,623	1,696	1,745	1,692	1,707	1,634
Uót (%)	19,40	20,00	20,50	20,80	17,38	19,60	20,20	20,20

Fonte: Próprio autor (2016)

É possível observar que a mistura 1 apresentou $MEAS_{máx}$ menor e U_{ot} maior em relação ao solo 1. A mistura 2, também obteve uma $MEAS_{máx}$ menor em relação ao solo 2, porém uma U_{ot} maior. A mistura 3 apresentou $MEAS_{máx}$ maior e U_{ot} menor em relação ao solo 1, tendo comportamento inverso ao estudado por pesquisadores, que afirmam que a cal hidratada tende a diminuir a MEAS e a sua umidade (TRB, 1987). Já a mistura 4, apresentou $MEAS_{máx}$ menor e U_{ot} menor em relação ao solo 2, indo de acordo as afirmações dos pesquisadores em relação as propriedades da cal hidratada. Na mistura 5, junção da cinza com a cal, o valor da $MEAS_{máx}$ e da U_{ot} aumentaram em relação ao solo 1, e a mistura 6 diminuiu a $MEAS_{máx}$ e aumentou a U_{ot} em relação ao solo 2.

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

O solo 1 e as misturas 1, 3 e 5 foram submetidas ao ensaio de compressão simples moldando-se os corpos de prova de acordo com os parâmetros encontrados na curva de compactação. Foram realizadas moldagens de 3 CPs de cada traço para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, totalizando um montante de 72 CPs. O resultado da RCS para cada tempo de cura foi obtido a partir das médias de 3 CPs similares, ou seja, descartando sempre os CPs cujos resultados tivessem uma variação maior que ±10% do valor médio, conforme recomendado pelo DNER-ME 180/94.

A Tabela 5 e a Figura 27 apresentam os valores médios de tensão de ruptura dos CPs ensaiados assim também como os Apêndices O e P. Na Tabela 5 também é possível observar em porcentagem as variações de resistência para os intervalos de tempo de cura adotados.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples.

Resistência à Compressão Simples									
Material	Tensão de Ruptura Média (MPa) em função da cura (dias)			Var. da Resistência (%) em função da cura (dias)			Var. da Resistência (%) em relação ao Solo 1		
	7	14	28	7-14	14-28	7-28	7	14	28
Solo 1	0,64	0,51	0,54	-20,0	6,5	-14,8	-	-	-
Mistura 1	1,00	1,20	0,77	20,1	-35,9	-23,1	56,3	135,3	42,6
Mistura 3	0,86	0,99	0,66	15,4	-34,0	-23,8	34,4	94,1	22,2
Mistura 5	1,18	1,34	1,65	13,1	23,7	39,9	84,4	162,7	205,6

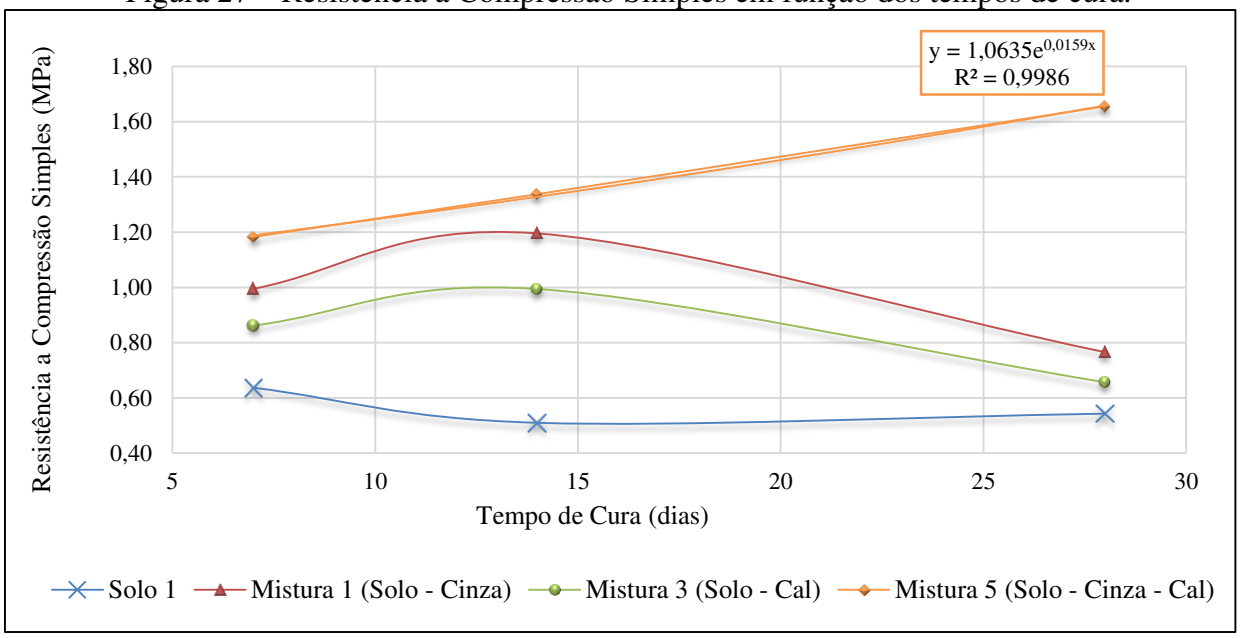
Fonte: Próprio autor (2016)

Observa-se que houve um aumento de resistência nas 3 misturas em relação ao solo 1, ressaltando que para o tempo de cura de 28 dias a mistura 5 apresentou resistência de 1,65

MPa, valor correspondente a um aumento de 205,6% em relação a resistência do solo 1 que é de 0,64 MPa.

As misturas 1, 3 e 5 apresentaram acréscimo de resistência entre os tempos de cura de 7 a 14 dias, destacando-se a mistura 1 com um aumento de 20,1%. No entanto ao comparar seus valores de 14 a 28 dias de cura, nota-se uma perda de resistência de -35,9% e -34,0% nas misturas 1 e 3. Diferente da mistura 5 que apresentou um aumento de resistência considerável em função dos dias de cura, cuja equação está inserida na Figura 27. Utilizando tal equação torna-se possível chegar à resistência de 2,1 MPa, estipulada pelo DNIT 143/2010 para misturas solo-cimento em tempo de cura de 7 dias utilizadas em camadas de base, para a mistura 5 ao 43º dia de cura.

Figura 27 – Resistência à Compressão Simples em função dos tempos de cura.



Fonte: Próprio autor (2016)

4.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

O solo 2 e as misturas de 2, 4 e 6 foram submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral moldando-se os corpos de prova de acordo com os parâmetros encontrados na curva de compactação. Foram realizadas as moldagens de 3 CPs de cada traço para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, totalizando um montante de 36 CPs. O resultado da RTCD para cada tempo de cura foi obtido a partir das médias de 3 CP similares, ou seja, descartando sempre os CPs cujos resultados tivessem uma variação maior que ±10% do valor médio, conforme recomendado pelo DNER-ME 181/94.

A Tabela 6 e a Figura 28 apresentam os valores médios de tensão de ruptura dos CPs ensaiados assim também como os Apêndices Q e R. Na Tabela 6 também é possível observar em porcentagem as variações de resistência para os intervalos de tempo de cura adotados.

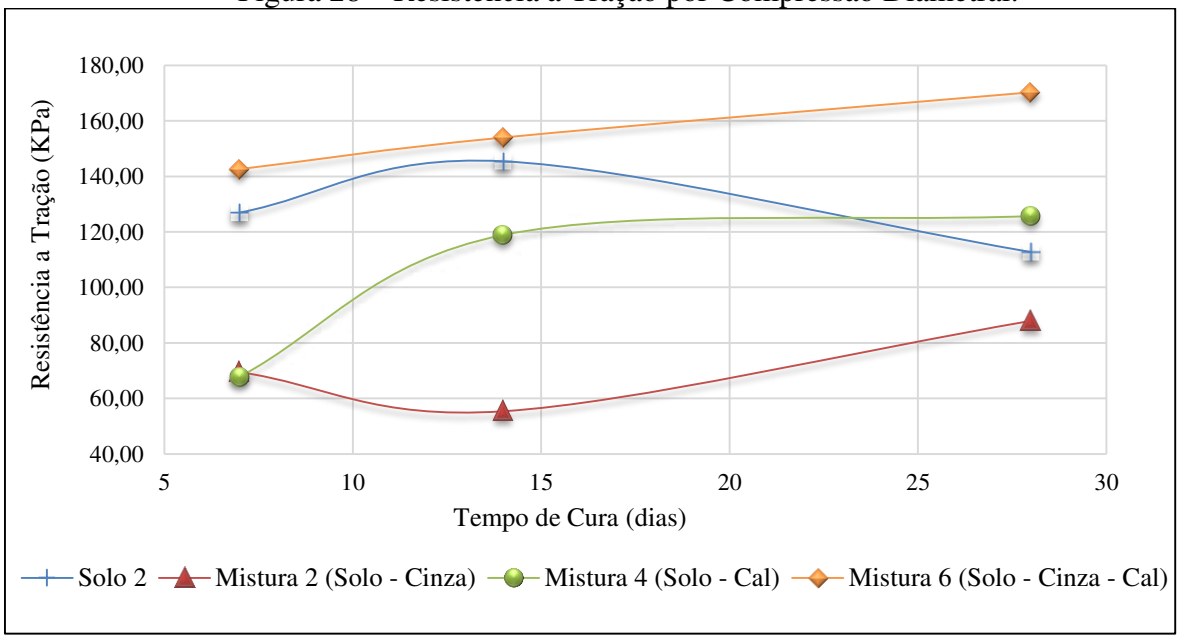
Observa-se na Tabela 6 que houve aumento de resistência apenas na mistura 6 em relação ao solo 2, ressaltando que para o tempo de cura de 28 dias, a mistura apresentou resistência de 170,3 KPa, correspondente a um aumento de 51,1% em relação a resistência do solo natural que é de 112,75 KPa, nesse mesmo período.

Tabela 6 – Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Resistência à Tração por Compressão Diâmetral									
Material	Tensão de Ruptura Média (KPa) em função da cura (dias)			Var. da Resistência (%) em função da cura (dias)			Var. da Resistência (%) em relação ao Solo 2		
	7	14	28	7-14	14-28	7-28	7	14	28
Solo 2	126,93	145,38	112,75	14,5	-22,4	-11,2	-	-	-
Mistura 2	69,48	55,38	87,89	-20,3	58,7	26,5	-45,3	-61,9	-22,0
Mistura 4	67,70	118,89	125,69	75,6	5,7	85,7	-46,7	-18,2	11,5
Mistura 6	142,63	154,02	170,30	8,0	10,6	19,4	12,4	5,9	51,1

Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 28 – Resistência à Tração por Compressão Diametral.



Fonte: Próprio autor (2016)

Já nas misturas 2 e 4, houve queda de RTCD, obtendo pior resultado a mistura 2, com acréscimo de cinza volante. A mistura com cal hidratada, no entanto, ultrapassou a RCTD

do solo natural apenas no tempo de dura de 28 dias, porém não ficando muito distante do seu valor, com um acréscimo de 11,5%.

Admite-se assim que a estabilização solo-cinza e solo-cal, não se mostraram eficientes para a estabilização do solo estudado, diferentemente de quando utilizados em associação, solo-cinza-cal.

5. CONCLUSÃO

Observou-se que as misturas solo-cinza, solo-cal e solo-cal-cinza aumentam a rigidez e as propriedades mecânicas do solo, tornando-o apto para ser utilizado em camadas de pavimento.

Verificou-se com o ensaio de compactação que houve alteração de $MEAS_{máx}$ e U_{ot} quando comparados os solos da primeira e segunda coletas, apesar de possuírem a mesma classificação. Assim também como as misturas utilizando a cinza da primeira coleta, com a da segunda e a cal hidratada CH-II com a CH-I. Fator esse que nos permite dizer que o solo 1 e o solo 2 podem apresentar comportamentos mecânicos diferentes, da mesma forma que a mistura 1 em relação a 2, a 3 em relação a 4 e a 5 em relação a 6. Dessa maneira, tornou-se inviável montar uma correlação matemática entre os ensaios de RCS e RTCD.

Porém, é possível ainda analisar os ensaios de RCS e RTCD de maneira separada e admitindo que as misturas de ambos possuem materiais com características químicas e físicas diferentes apesar das mesmas proporções.

Dessa maneira com base nos ensaios de RCS, as misturas solo-cinza e solo-cal apresentaram um comportamento inesperado com o decréscimo de resistência com o tempo de cura de 28 dias, mostrando a falta de reatividade com o solo dos agentes quando utilizados separadamente. Já com a misturas solo-cinza-cal, a ação estabilizante ocorreu como esperado, os valores de resistência aumentaram exponencialmente com o passar dos dias, viabilizando sua utilização técnica em camadas de pavimento. Entretanto tal mistura não alcançou a resistência a compressão simples equivalente a 2,1 MPa, desqualificando-a para utilização em uma camada de base, devendo ser realizados outros estudos tendo em vista possíveis aplicações destas misturas em uma camada de sub-base.

Já com base nos ensaios de RTCD observou-se que as misturas solo-cinza, solo-cal apresentaram RTCD inferior ao solo, diferentemente do que havia ocorrido na RCS, em que por mais que as misturas não tenham alcançado uma estabilização satisfatória com o decorrer do tempo de cura, mas inicialmente ainda houve acréscimo de resistência. Pode-se assim descartar as misturas 1, 2, 3 e 4, solo-cinza e solo-cal, pois são soluções técnicas inviáveis de acordo com os ensaios mecânicos realizados.

Diferentemente das mistura solo-cinza-cal, que tanto no ensaio de RCS, como no ensaio de RTCD, houve acréscimo de resistência, comprovando que quando a cinza e a cal são usadas em associação, as reações químicas ocorrem como esperado, viabilizando sua utilização técnica para camadas de pavimentos.

No entanto seria interessante a continuação da pesquisa no intuito de verificar quais proporções de cal e cinza melhor se adequariam para a estabilização do solo estudado. A realização de um estudo químico dos materiais afim de identificar os componentes que tornam um material reagente ou não. Assim também como a realização de mais ensaios mecânicos, como o ensaio de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.

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

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.

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

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

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

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

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **ME 162** – Solos – Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas. Brasília, DF, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **ME 180** – Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Brasília, DF, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **ME 181** – Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diâmetral. Brasília, DF, 1994.

DNIT ES 143: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: 2010a.

LOPES, L. dos S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinza de carvão mineral para camadas de base de pavimentos.** 2011. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MALLMANN, José Eduardo Corrêa. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. 1996. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

NARDI, J. V. **Delineamento e otimização de misturas pozolânicas**. 2004. 111f – Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal: Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. 1975. 178f. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

PINTO, Carlos Souza. **Curso básico de mecânica dos solos. 3ª ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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

ROSA, Amanda Dalla. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ROSAS, Letícia Reis Batista. **Resistência à tração de solos estabilizados com cal e cimento em Sinop-MT**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, 2013.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: Editora Pini, 2005, 1 vol.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO 1.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (PENEIRAMENTO) - SOLO 1

RESUMO DA GRANULOMETRIA (%)	
Pedregulho acima de 2,0 mm	**0,393**
Areia grossa 2,0 a 0,42mm	**1,853**
Areia fina 0,42 a 0,075	**8,001**
Menor que 0,075mm	**89,753**

UMIDADE (%)			
Cápsula nº	40	44	101
Solo Úmido+Cap (g)	73,54	77,54	78,2
Solo seco+cap (g)	72,48	76,33	77,13
Cápsula (g)	18,43	15,98	18,81
Água (g)	1,06	1,21	1,07
Solo Seco (g)	54,05	60,35	58,32
Umidade Higroscópica (%)	1,96	2,00	1,83
Umidade Média (%)	**1,934**		

AMOSTRA TOTAL SECA	
Amostra Total Úmida (g)	2000
Pedregulho Retido # 10 (g)	7,72
Passando # 10 Úmido (g)	1992,28
Passando # 10 Seco (g)	1954,5
Amostra Total Seca (g)	1962,22

AMOSTRA PARCIAL SECA	
Amostra Parcial Úmida (g)	200
Amostra Parcial Seca (g)	196,205

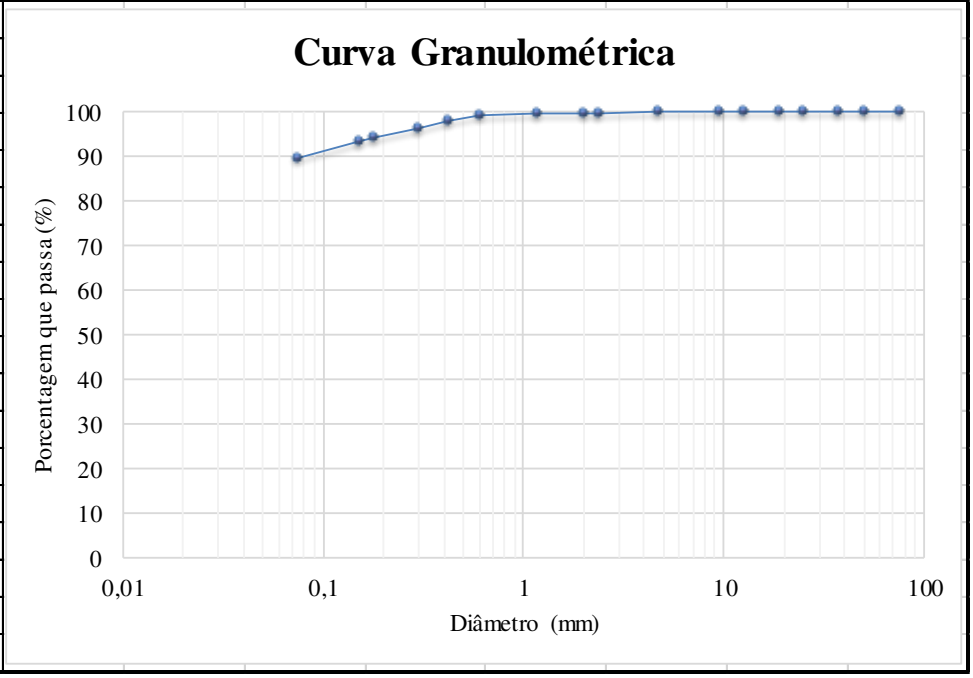
PENEIRAMENTO GROSSO

PENEIRA		Peso Seco Retido (g)		% que passa da Amostra Total
#	mm	Parcial	Acumulado	
3"	75	0	0	100
2"	50	0	0	100
1"1/2	37,5	0	0	100
1"	25	0	0	100
3/4"	19	0	0	100
1/2"	12,5	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	100
Nº 4	4,75	0,97	0,97	99,95
Nº 8	2,36	4,63	5,6	99,71
Nº 10	2	2,12	7,72	99,61

PENEIRAMENTO FINO

PENEIRA	Peso Seco Retido (g)		% que passa amostra parcial	% que passa amostra total
# / mm	Parcial	Acumulado		
16 / 1,2	0,31	0,31	99,842	99,45
20 / 0,8	0,35	0,66	99,664	99,27
30 / 0,6	0,57	1,23	99,373	98,98
40 / 0,42	2,42	3,65	98,140	97,75
50 / 0,3	3,4	7,05	96,407	96,03
80 / 0,18	3,61	10,66	94,567	94,19
100 / 0,15	1,61	12,27	93,746	93,38
200 / 0,075	7,14	19,41	90,107	89,75

PENEIRA	% Passa
75	100
50	100
37,5	100
25	100
19	100
12,5	100
9,5	100
4,75	99,95
2,36	99,71
2	99,61
1,18	99,45
0,6	98,98
0,425	97,75
0,3	96,03
0,18	94,19
0,15	93,38
0,075	89,75



APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO 1.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SEDIMENTAÇÃO) - SOLO 1

RESUMO DA GRANULOMETRIA E SEDIMENTAÇÃO (%)

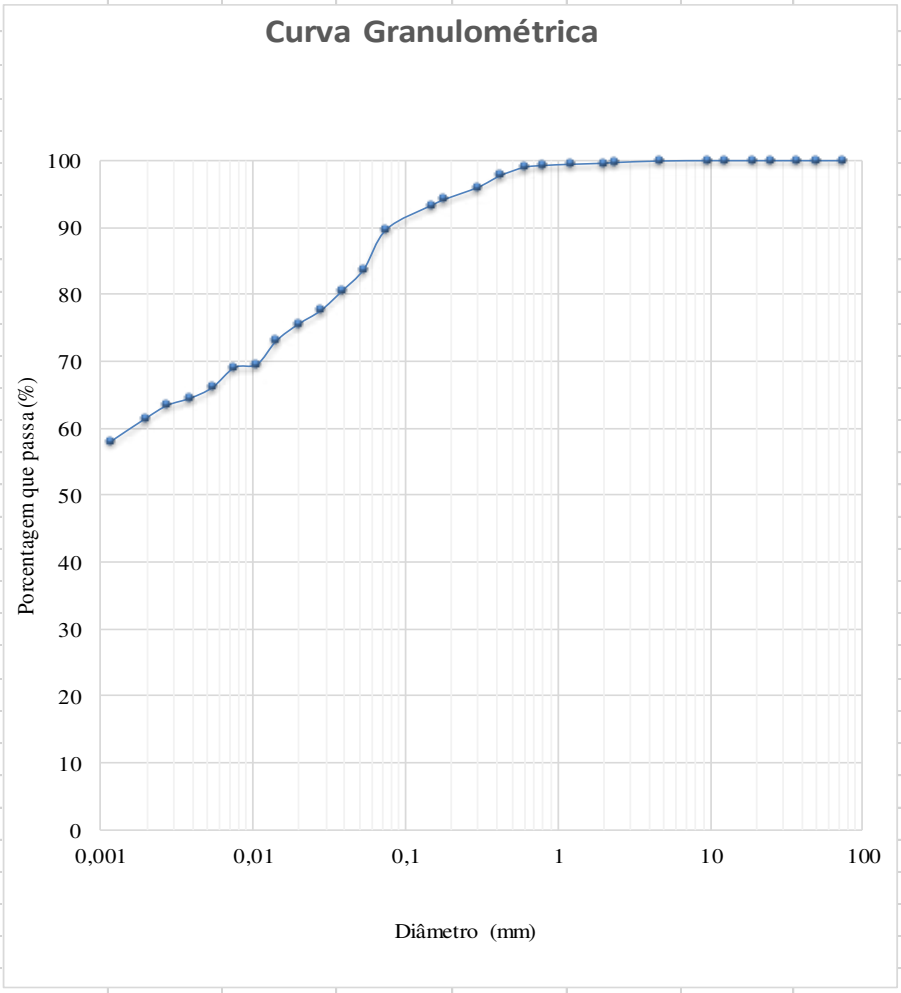
Pedregulho acima de 2,0mm	**0,39**	Silte 0,075 a 0,005mm	**23,67**
Areia grossa 2,0 a 0,42mm	**1,85**	Argila 0,005 a 0,001mm	**8,08**
Areia fina 0,42 a 0,075mm	**8,00**	Argila coloidal 0,001mm	**58,00**

SEDIMENTAÇÃO

Cap.	Tara	T. + S.U.	T. + S.S.	Umidade	Umidade média (%)		Volume (dm³):	1000
1	16,63	69,1	67,03	4,11			γc (g/cm³):	1
20	18,19	75,69	73,25	4,43	**4,25**		γg(g/cm³):	2,50
61	14,86	68,05	65,9	4,21			Amostra úmida (g):	70

Tempo (s)	**Temp. (°C)**	**L (g/cm³)**	**L0 (g/cm³)**	**a (cm)**	**η**	**γa**	**φ (mm)**	**% < D**
30	25,1	1,0373	1,00342	7,786	9,061E-06	1	0,053121	83,76
60	25,1	1,036	1,00342	8,126	9,061E-06	1	0,038373	80,55
120	25,1	1,0348	1,00342	8,439	9,061E-06	1	0,027652	77,58
240	25	1,034	1,00345	8,538	9,080E-06	1	0,019689	75,54
480	25	1,033	1,00345	8,799	9,080E-06	1	0,014133	73,07
900	24,9	1,0316	1,00347	9,165	9,100E-06	1	0,010545	69,55
1800	24,5	1,0315	1,00356	9,191	9,180E-06	1	0,0075	69,07
3600	25,3	1,0301	1,00337	9,557	9,021E-06	1	0,005361	66,08
7200	25,1	1,0295	1,00342	9,714	9,061E-06	1	0,00383	64,48
14400	25,4	1,029	1,00335	9,844	9,002E-06	1	0,002717	63,42
28800	25	1,0283	1,00345	10,027	9,080E-06	1	0,001948	61,45
86400	24,6	1,027	1,00354	10,367	9,160E-06	1	0,001148	58,00

PENEIRA	**% Passa**
75	100
50	100
37,5	100
25	100
19	100
12,5	100
9,5	100
4,75	99,95
2,36	99,71
2	99,61
1,2	99,45
0,8	99,27
0,6	98,98
0,42	97,75
0,3	96,03
0,18	94,19
0,15	93,38
0,075	89,75
0,053	83,76
0,038	80,55
0,028	77,58
0,020	75,54
0,014	73,07
0,011	69,55
0,008	69,07
0,005	66,08
0,004	64,48
0,003	63,42
0,002	61,45
0,001	58,00



APÊNDICE C – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO DO SOLO 2.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (PENEIRAMENTO) - SOLO 2

RESUMO DA GRANULOMETRIA (%)	
Pedregulho acima de 2,0 mm	**5,221**
Areia grossa 2,0 a 0,42mm	**2,325**
Areia fina 0,42 a 0,075	**5,881**
Menor que 0,075mm	**86,572**

UMIDADE (%)			
Cápsula nº	36	47	
Solo Úmido+Cap (g)	75,48	68,2	75,59
Solo seco+cap (g)	75,38	68,12	75,49
Cápsula (g)	17,45	17,45	12,34
Água (g)	0,1	0,08	0,1
Solo Seco (g)	57,93	50,67	63,15
Umidade Higroscópica (%)	0,17	0,16	0,16
Umidade Média (%)	**0,163**		

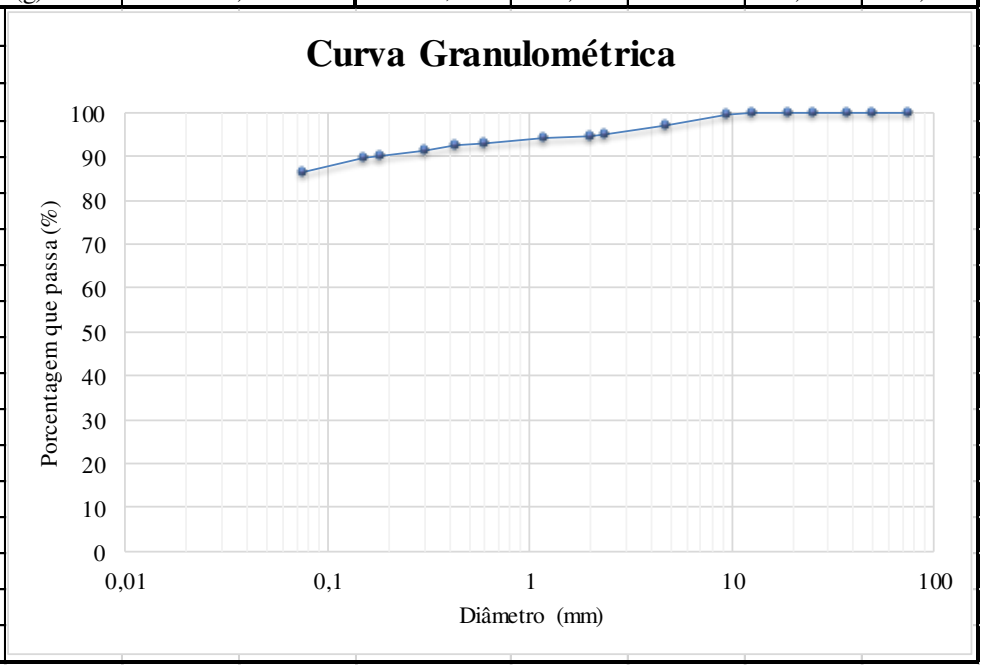
AMOSTRA TOTAL SECA	
Amostra Total Úmida (g)	1500
Pedregulho Retido # 10 (g)	78,2
Passando # 10 Úmido (g)	1421,8
Passando # 10 Seco (g)	1419,5
Amostra Total Seca (g)	1497,7

AMOSTRA PARCIAL SECA	
Amostra Parcial Úmida (g)	70
Amostra Parcial Seca (g)	69,30

PENEIRAMENTO GROSSO				
PENEIRA		Peso Seco Retido (g)		% que passa da Amostra Total
#	mm	Parcial	Acumulado	
3"	75	0	0	100
2"	50	0	0	100
1"1/2	37,5	0	0	100
1"	25	0	0	100
3/4"	19	0	0	100
1/2"	12,5	0	0	100
3/8"	9,5	6,5	6,5	99,57
Nº 4	4,75	35,1	41,6	97,22
Nº 8	2,36	30,6	72,2	95,18
Nº 10	2	6	78,2	94,78

PENEIRAMENTO FINO				
PENEIRA	Peso Seco Retido (g)		% que passa amostra parcial	% que passa amostra total
# / mm	Parcial	Acumulado		
16 / 1,2	0,3	0,3	99,567	94,37
20 / 0,8	0,5	0,8	98,846	93,68
30 / 0,6	0,5	1,3	98,124	93,00
40 / 0,42	0,4	1,7	97,547	92,45
50 / 0,3	0,7	2,4	96,537	91,50
80 / 0,18	0,9	3,3	95,238	90,27
100 / 0,15	0,4	3,7	94,661	89,72
200 / 0,075	2,3	6	91,342	86,57

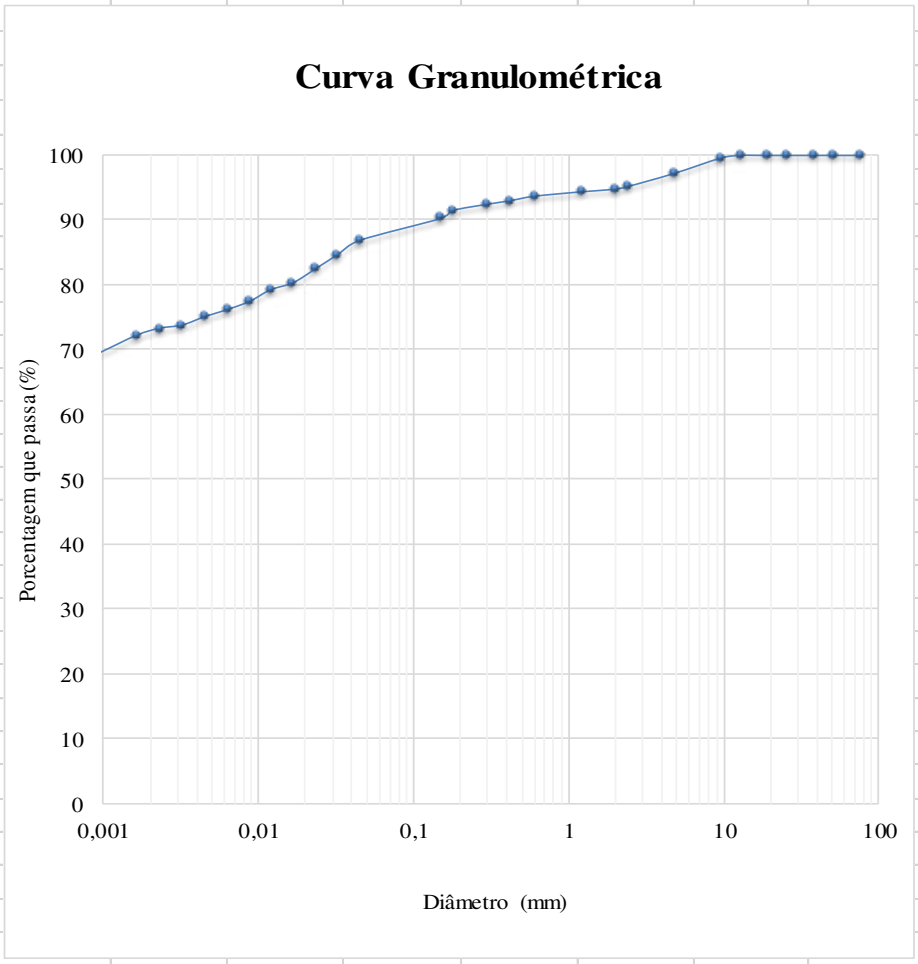
PENEIRA	% Passa
75	100
50	100
37,5	100
25	100
19	100
12,5	100
9,5	99,57
4,75	97,22
2,36	95,18
2	94,78
1,18	94,37
0,6	93,00
0,425	92,45
0,3	91,50
0,18	90,27
0,15	89,72
0,075	86,57



APÊNDICE D – TABELA DE ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO DO SOLO 2.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SEDIMENTAÇÃO) - SOLO 2								
RESUMO DA GRANULOMETRIA E SEDIMENTAÇÃO (%)								
Pedregulho acima de 2,0mm			**5,22**		Silte 0,075 a 0,005mm		**11,51**	
Areia grossa 2,0 a 0,42mm			**2,33**		Argila 0,005 a 0,001mm		**5,50**	
Areia fina 0,42 a 0,075mm			**5,88**		Argila coloidal 0,001mm		**69,56**	
SEDIMENTAÇÃO								
Cap.	Tara	T. + S.U.	T. + S.S.	Umidade	Umidade média (%)		Volume (dm³):	1000
2	16,6	68,9	68,3	1,16			γc (g/cm³):	1
6	13,2	67,3	66,7	1,12	**1,013**		γg(g/cm³):	2,67
33	17	69,8	69,4	0,76			Amostra úmida (g):	70
Tempo (s)	**Temp. (°C)**	**L (g/cm³)**	**L0 (g/cm³)**	**a (cm)**	**η**	**γa**	**φ (mm)**	**% < D**
30	26	1,043	1,00320	6,297	8,886E-06	0,9969	0,044776	86,85
60	26	1,042	1,00320	6,558	8,886E-06	0,9968	0,032311	84,66
120	26	1,041	1,00320	6,820	8,886E-06	0,9968	0,023298	82,48
240	26	1,040	1,00320	6,971	8,886E-06	0,9968	0,016656	80,30
480	26	1,0395	1,00320	7,101	8,886E-06	0,9968	0,011887	79,21
900	26	1,0387	1,00320	7,310	8,886E-06	0,9968	0,008808	77,46
1800	26	1,0381	1,00320	7,467	8,886E-06	0,9968	0,006295	76,15
3600	26	1,0376	1,00320	7,598	8,886E-06	0,9968	0,00449	75,06
7200	26	1,0370	1,00320	7,754	8,886E-06	0,9968	0,003207	73,75
14400	25,5	1,0369	1,00332	7,781	8,982E-06	0,9968	0,002284	73,26
28800	25,5	1,0364	1,00332	7,911	8,982E-06	0,9970	0,001629	72,18
86400	25,5	1,0352	1,00332	8,225	8,982E-06	0,9970	0,000959	69,56

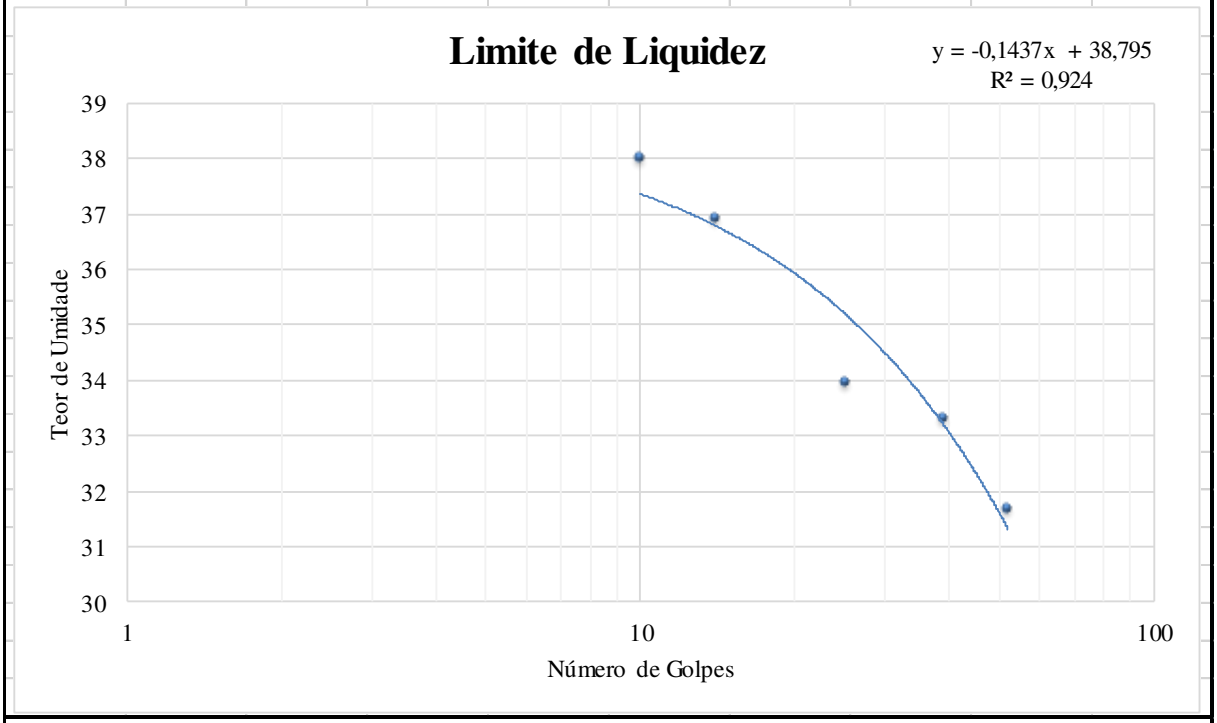
PENEIRA	% Passa
76,2	100
50,8	100
38,1	100
25,4	100
19,1	100
12,7	100
9,5	99,57
4,8	97,22
2,4	95,18
2	94,78
1,2	94,37
0,6	93,68
0,42	93,00
0,3	92,45
0,18	91,50
0,15	90,27
0,045	86,85
0,032	84,66
0,023	82,48
0,017	80,30
0,012	79,21
0,009	77,46
0,006	76,15
0,004	75,06
0,003	73,75
0,002	73,26
0,002	72,18
0,001	69,56



APÊNDICE E – TABELA DE ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO 1.

DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIEZ E PLÁSTICIDADE - SOLO 1					
Limite de Liquidez (LL):	**35,2**	Limite de Plasticidade (LP):	**25**	Índice de Plasticidade (IP):	**10,2**

Determinação do Limite de Liquidez (LL)						
Cápsula nº	9	24	31	36	46	**Limite de Liquidez (LL)**
Cápsula (g)	4,73	4,26	4,71	4,2	4,92	
Solo Úmido+Cap (g)	21	20,84	23,05	24,01	22,84	
Solo seco+cap (g)	16,52	16,37	18,4	19,06	18,53	
Nº de Golpes	10	14	25	39	52	
Teor de Umidade (%)	38	36,91	33,97	33,31	31,67	**35,2**

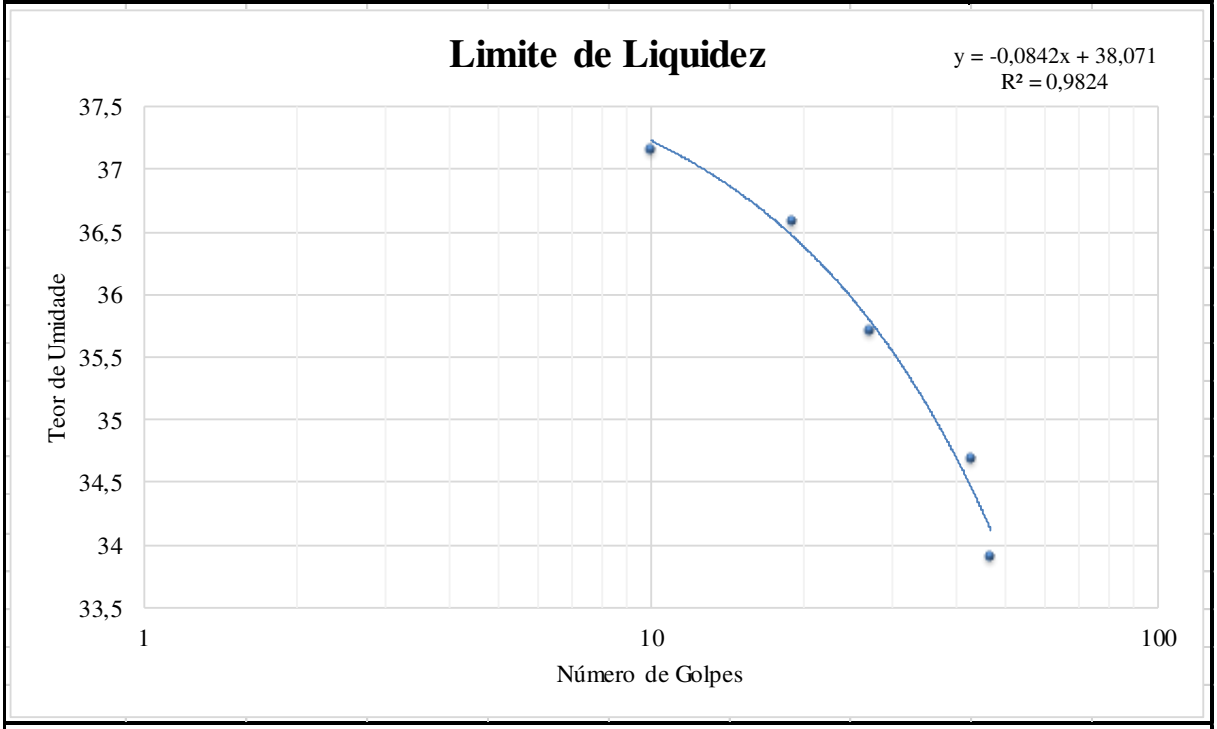


Determinação do Limite de Plasticidade (LP)						
Cápsula nº	5	6	18	28		**Limite de Plasticidade (LP)**
Cápusla (g)	7,6	8,41	8,25	8,09		
Solo Úmido+Cap (g)	10,26	11,06	10,58	10,43		
Solo seco+cap (g)	9,72	10,56	10,11	9,97		
Teor de Umidade (%)	25,47	23,26	25,27	24,47		**24,62**

APÊNDICE F – TABELA DE ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO 2.

DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIEZ E PLASTICIDADE - SOLO 2						
Limite de Liquidez (LL):	**35,97**	Limite de Plasticidade (LP):	**26**	Índice de Plasticidade (IP):		**9,97**

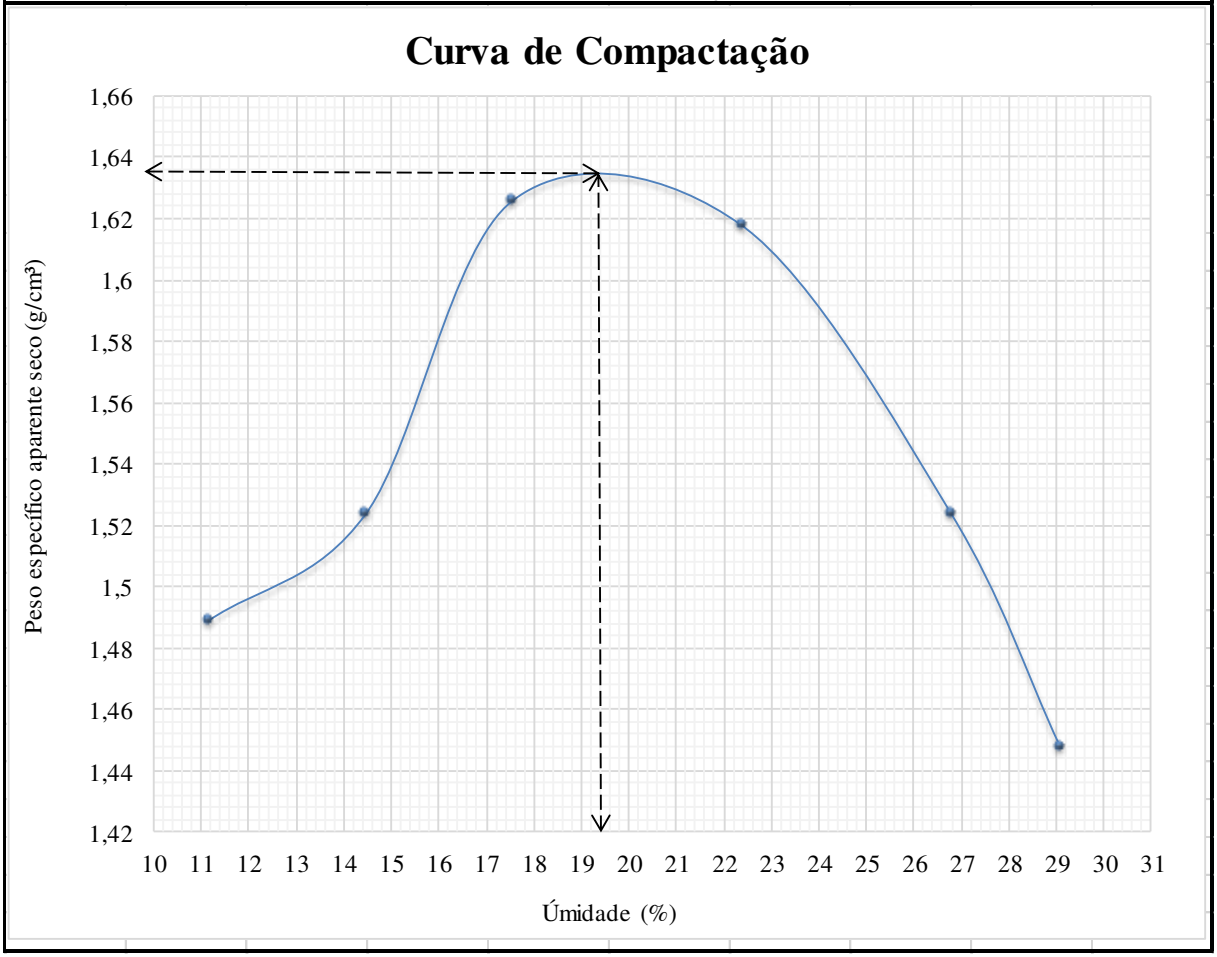
Determinação do Limite de Liquidez (LL)						
Cápsula nº	8	14	33	35	41	**Limite de Liquidez (LL)**
Cápsula (g)	4,66	4,23	4,42	4,4	4,37	
Solo Úmido+Cap (g)	22,93	24,65	22,32	23,54	21,43	
Solo seco+cap (g)	17,98	19,18	17,61	18,61	17,11	
Nº de Golpes	10	19	27	43	47	
Teor de Umidade (%)	37,16	36,59	35,71	34,69	33,91	**35,97**



Determinação do Limite de Plasticidade (LP)						
Cápsula nº	11	23	30	31		**Limite de Plasticidade (LP)**
Cápusla (g)	9,1	7,7	7,5	8,1		
Solo Úmido+Cap (g)	11,9	10,8	10,9	10,9		
Solo seco+cap (g)	11,3	10,2	10,2	10,3		
Teor de Umidade (%)	27,27	24	25,93	27,27		**26,12**

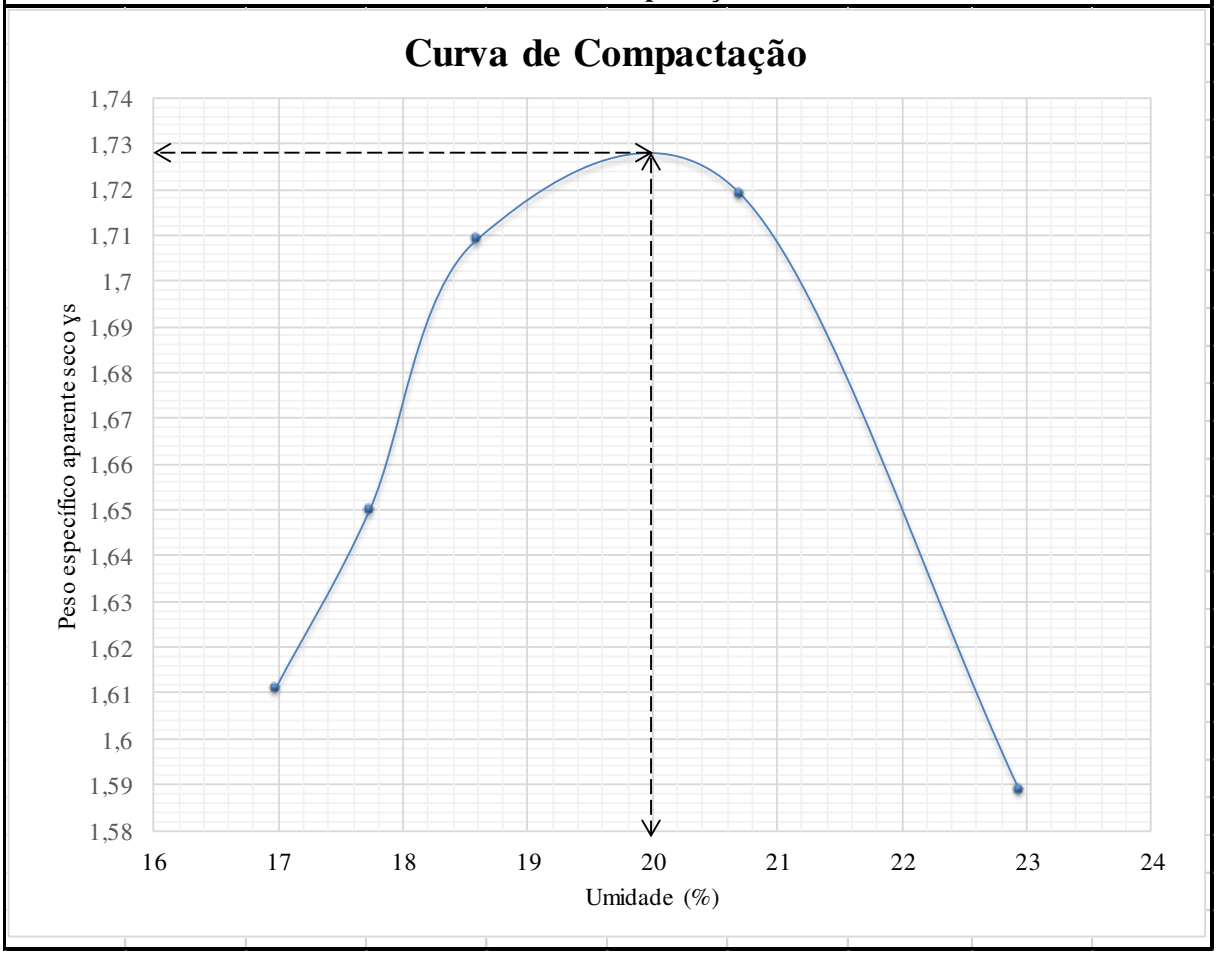
APÊNDICE G – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO 1.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - SOLO 1						
Proctor	26	Umidade Ótima	**19,40**			
Peso da Amostra (g)	6000	Densidade Máxima (g/cm³)	**1,637**			
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	2069,55	2073,19	2080,6	2071,8	2081,34	2190,86
Peso do Molde (g)	4262,4	4300,4	4239,7	4282,2	4301,4	4868,5
Peso do Molde + Solo (g)	7687,4	7916,3	8216,4	8385,3	8322,9	8962,8
Nº da Cápsula	44	58	1	61	101	34
Peso da Cápsula (g)	16,76	15,17	14,73	18,41	18,47	13,90
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	93,45	77,35	69,97	63,51	63,36	71,34
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	85,76	69,50	61,72	55,27	53,88	58,41
Umidade (%)	11,135	14,455	17,54	22,357	26,77	29,065
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,655	1,744	1,911	1,98	1,932	1,869
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,489	1,524	1,626	1,618	1,524	1,448
Curva de Compactação						



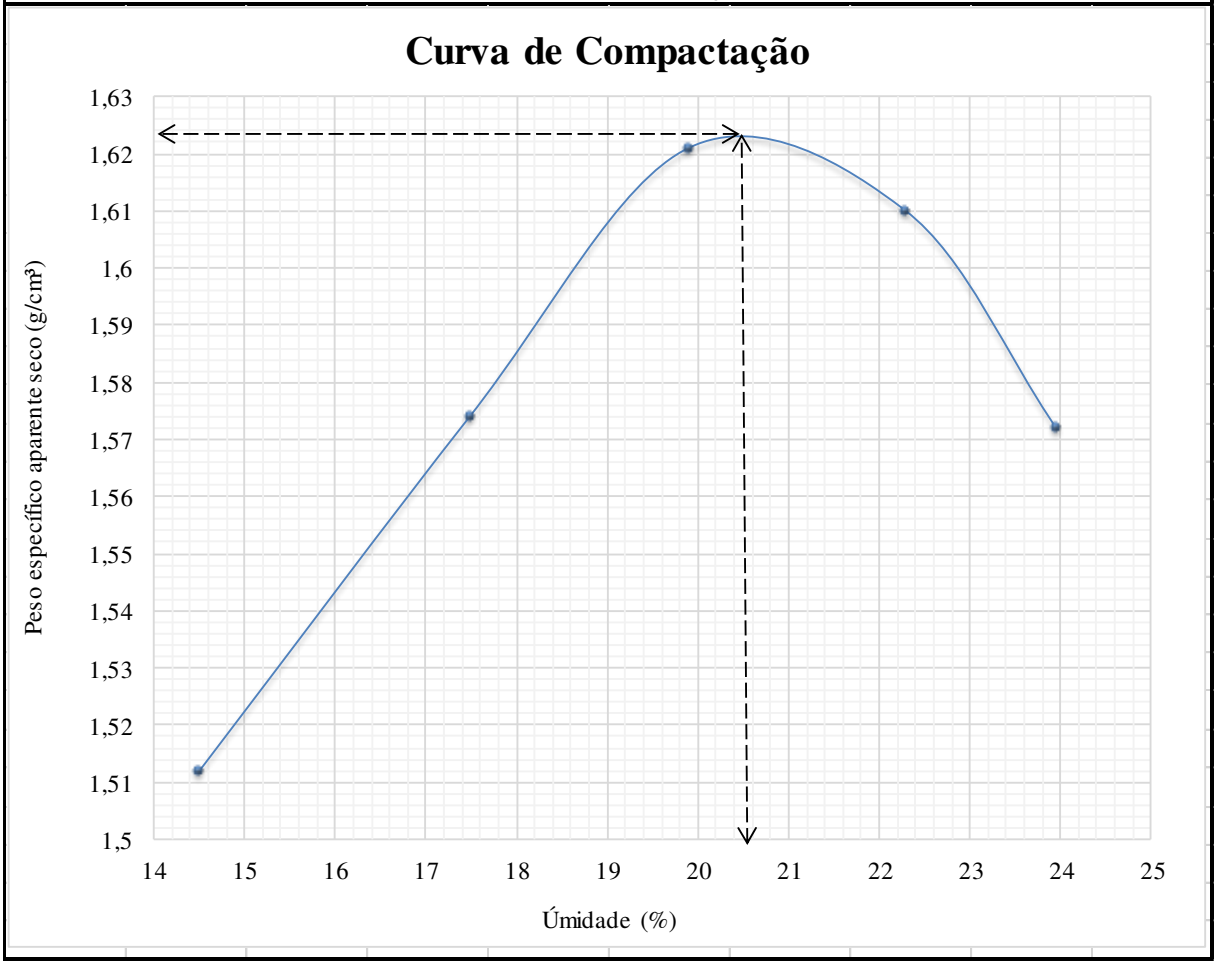
APÊNDICE H – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO 2.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - SOLO 2						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima	**20**		
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)	**1,728**		
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	940,97	940,97	940,97	940,97	
Peso do Molde (g)	1962,1	1962,1	1961,9	1961,9	1961,9	
Peso do Molde + Solo (g)	3735,3	3789,9	3868,8	3914,4	3799,5	
Nº da Cápsula	8	42	59	2	47	
Peso da Cápsula (g)	16,70	17,50	15,50	16,50	17,90	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	80,10	67,30	57,60	54,40	52,20	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	70,90	59,80	51,00	47,90	45,80	
Umidade (%)	16,974	17,73	18,592	20,701	22,939	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,884	1,942	2,027	2,075	1,953	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,611	1,65	1,709	1,719	1,589	
Curva de Compactação						



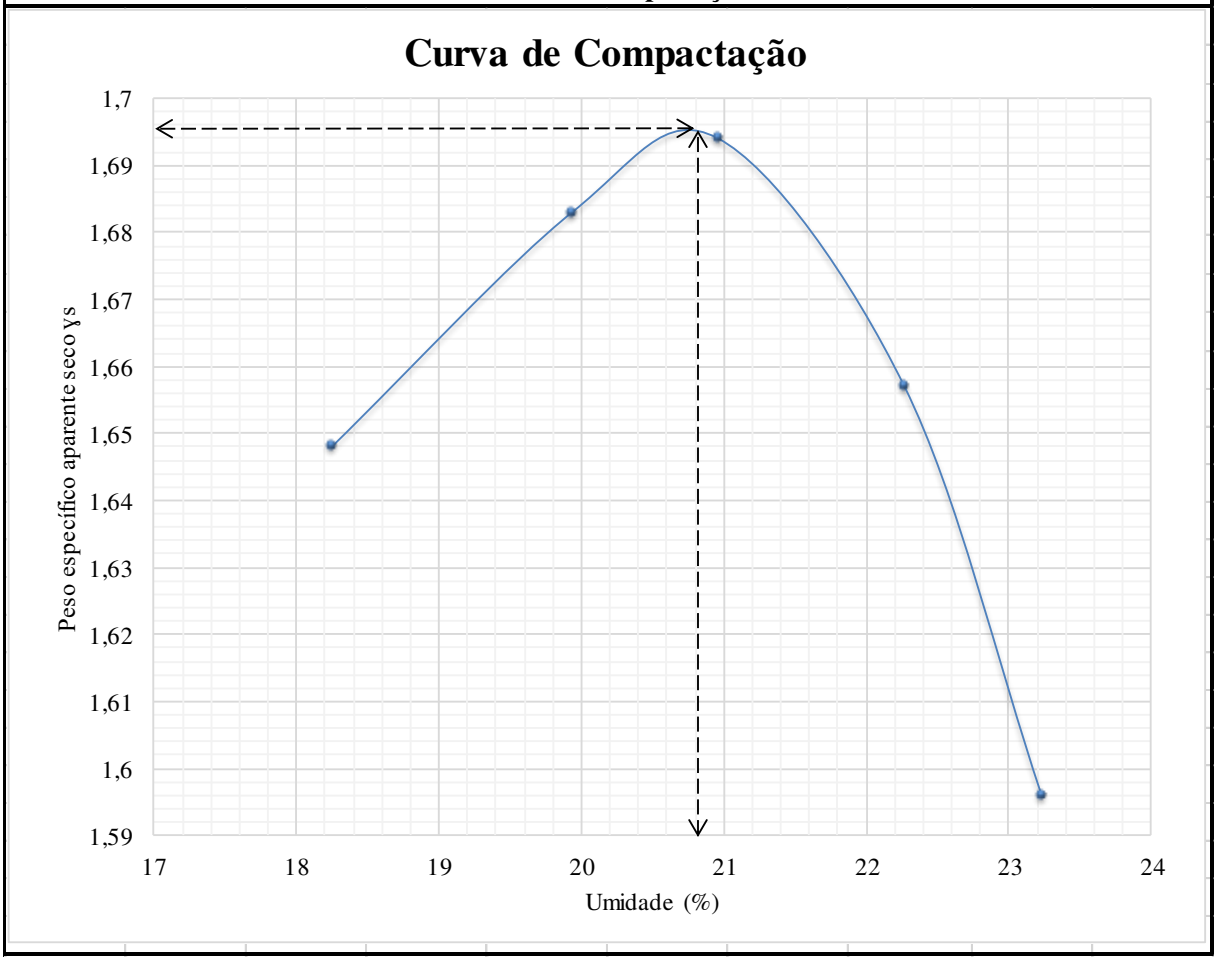
APÊNDICE I – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 1.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 1						
Proctor	26	Umidade Ótima	**20,5**			
Peso da Amostra (g)	6000	Densidade Máxima (g/cm³)	**1,623**			
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	2081,34	2081,34	2081,34	2081,34	2081,34	
Peso do Molde (g)	4303,1	4303,1	4303,1	4303,1	4303,1	
Peso do Molde + Solo (g)	7906,9	8152,5	8349,7	8401,2	8359,2	
Nº da Cápsula	2	20	21	33	58	
Peso da Cápsula (g)	16,50	18,25	18,92	16,92	16,77	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	85,30	92,58	83,56	80,08	74,32	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	76,59	81,52	72,83	68,57	63,20	
Umidade (%)	14,495	17,481	19,904	22,285	23,95	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,731	1,849	1,944	1,969	1,949	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,512	1,574	1,621	1,61	1,572	
Curva de Compactação						



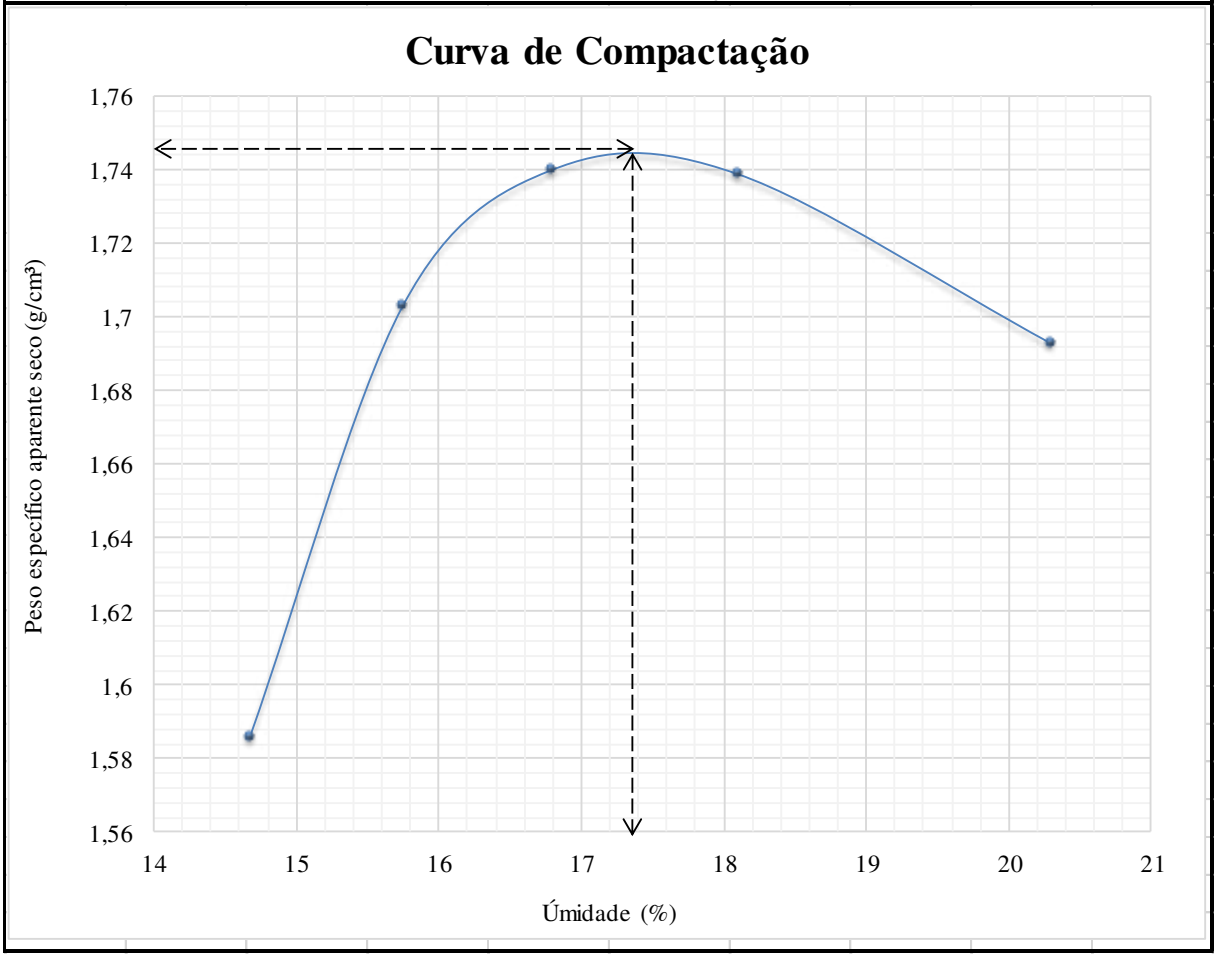
APÊNDICE J – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 2.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 2						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima		**20,8**	
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)		**1,696**	
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	940,97	940,97	940,97	940,97	
Peso do Molde (g)	1962	1962	1962	1962	1962	
Peso do Molde + Solo (g)	3795,8	3862,2	3889,9	3868,8	3812,6	
Nº da Cápsula	47	19	20	36	8	
Peso da Cápsula (g)	17,90	20,00	18,20	17,50	16,80	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	63,90	60,30	66,10	46,60	53,40	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	56,80	53,60	57,80	41,30	46,50	
Umidade (%)	18,252	19,94	20,96	22,269	23,232	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,949	2,019	2,049	2,026	1,967	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,648	1,683	1,694	1,657	1,596	
Curva de Compactação						



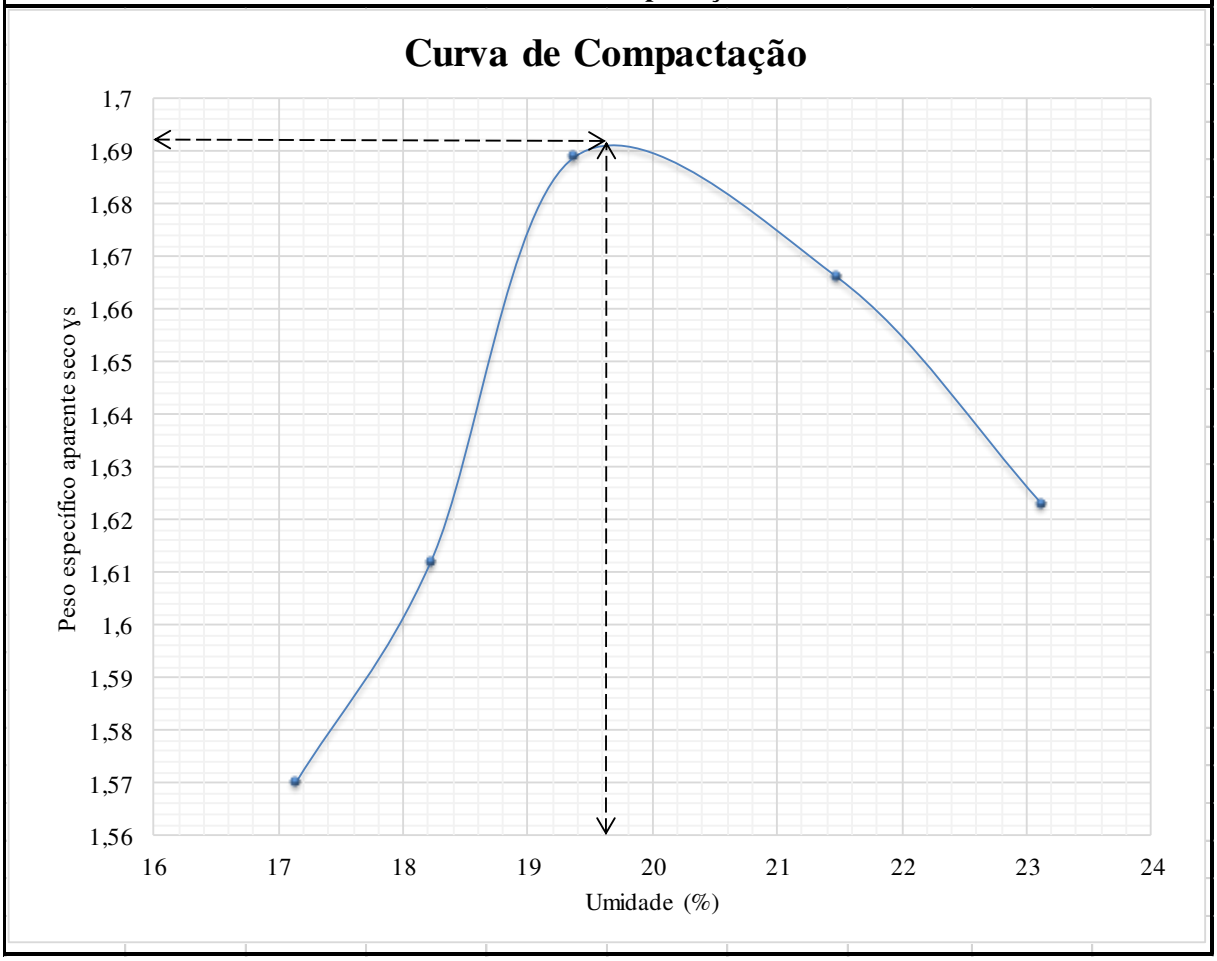
APÊNDICE K – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 3.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 3						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima		**17,38**	
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)		**1,745**	
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	940,97	940,97	940,97	940,97	
Peso do Molde (g)	1962,5	1962,5	1962,5	1962,5	1962,5	
Peso do Molde + Solo (g)	3674,2	3817,1	3874,2	3894,9	3878,9	
Nº da Cápsula	61	SN	9	33	36	
Peso da Cápsula (g)	15,00	12,50	18,20	17,00	17,50	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	73,60	71,30	80,80	66,60	66,70	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	66,10	63,30	71,80	59,00	58,40	
Umidade (%)	14,677	15,748	16,791	18,095	20,293	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,819	1,971	2,032	2,054	2,037	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,586	1,703	1,74	1,739	1,693	
Curva de Compactação						



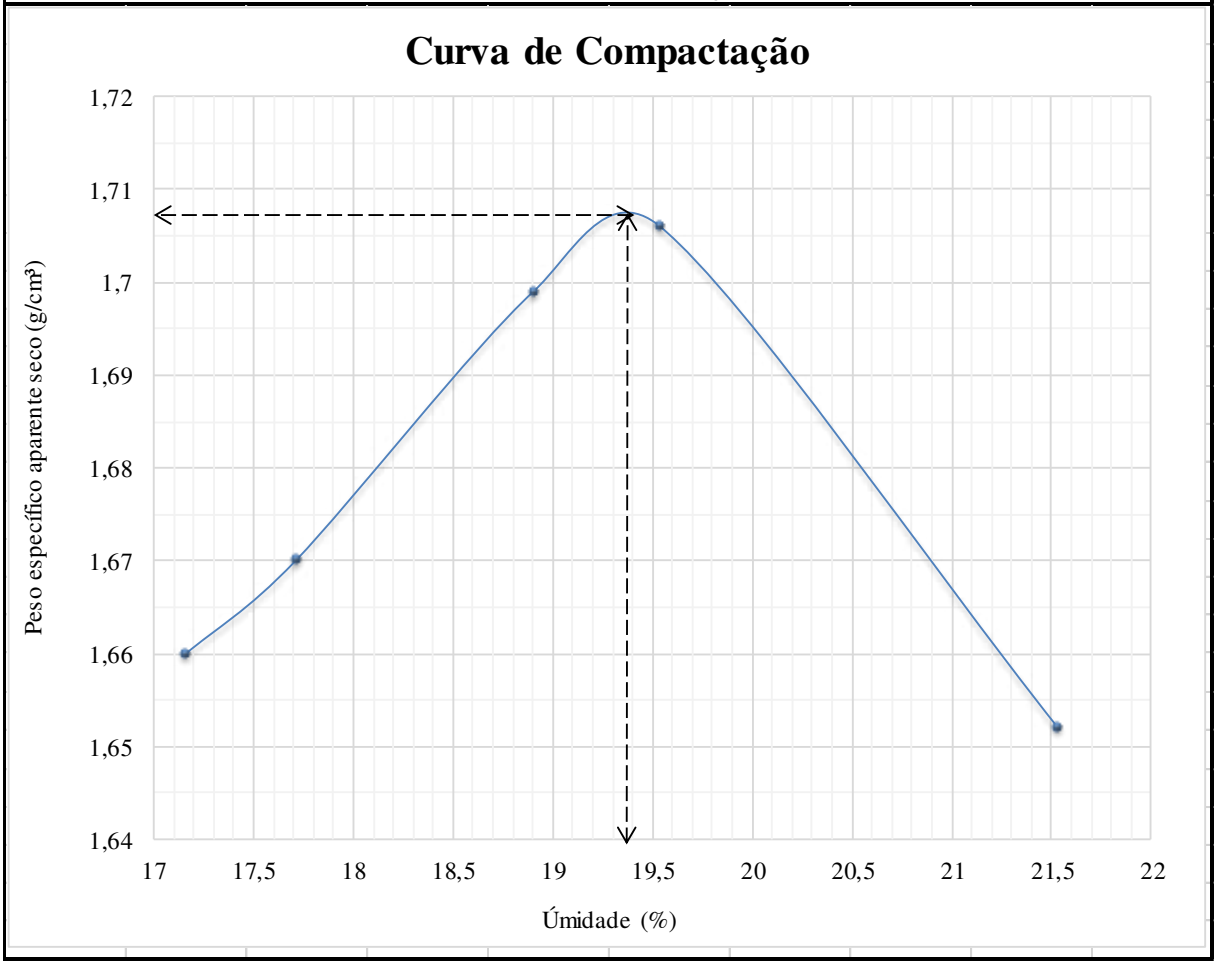
APÊNDICE L – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 4.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 4						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima	**19,60**		
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)	**1,692**		
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	940,97	940,97	940,97	940,97	
Peso do Molde (g)	1962	1962	1962	1962	1962	
Peso do Molde + Solo (g)	3692,7	3755,7	3858,6	3866,5	3842	
Nº da Cápsula	39	20	59	57	39	
Peso da Cápsula (g)	17,70	18,30	15,60	16,20	17,70	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	67,60	78,00	57,50	65,40	65,10	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	60,30	68,80	50,70	56,70	56,20	
Umidade (%)	17,136	18,218	19,373	21,481	23,117	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,839	1,906	2,016	2,024	1,998	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,57	1,612	1,689	1,666	1,623	
Curva de Compactação						



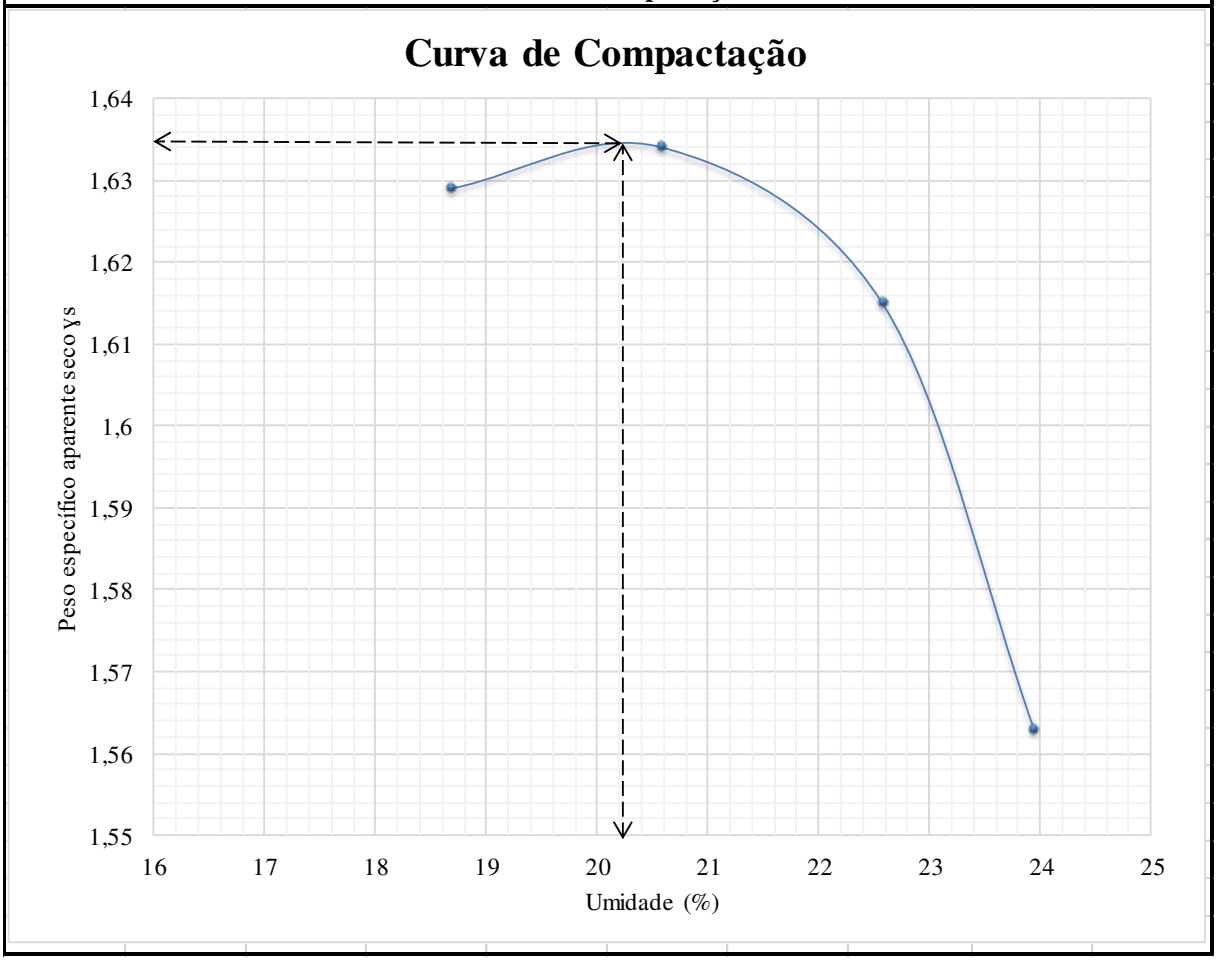
APÊNDICE M – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 5.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 5						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima		**19,38**	
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)		**1,707**	
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	1005,3	1005,3	1005,3	940,97	
Peso do Molde (g)	1962,2	1916,2	1916,2	1916,2	1962,2	
Peso do Molde + Solo (g)	3792,8	3892,6	3947,2	3966,5	3851,7	
Nº da Cápsula	19	61	19	35	235	
Peso da Cápsula (g)	20,00	15,00	20,00	17,90	15,20	
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	67,10	67,50	63,40	59,50	73,90	
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	60,20	59,60	56,50	52,70	63,50	
Umidade (%)	17,164	17,713	18,904	19,54	21,532	
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,945	1,966	2,02	2,039	2,008	
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,66	1,67	1,699	1,706	1,652	
Curva de Compactação						



APÊNDICE N – TABELA DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 6.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - MISTURA 6						
Proctor	Intermediário 21 golp. 3 cam.		Umidade Ótima	**20,2**		
Peso da Amostra (g)	3000		Densidade Máxima (g/cm³)	**1,634**		
Dados da Compactação						
Volume do Molde (cm³)	940,97	940,97	940,97	940,97		
Peso do Molde (g)	1962,1	1962,1	1961,9	1961,9		
Peso do Molde + Solo (g)	3780,6	3816	3824,8	3785		
Nº da Cápsula	2	8	19	20		
Peso da Cápsula (g)	16,50	16,70	19,90	18,20		
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	56,50	61,80	57,90	59,60		
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	50,20	54,10	50,90	51,60		
Umidade (%)	18,694	20,588	22,581	23,952		
Peso Especifico Aparente (g/cm³)	1,933	1,97	1,98	1,937		
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm³)	1,629	1,634	1,615	1,563		
Curva de Compactação						



APÊNDICE O – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS MISTURAS 3 E 5.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES									
MISTURA 3									
Umid. Ótima (%)	17,38								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	25	26	27	13	14	15	1	2	3
Umid. Moldag. (%)	18,14	17,59	-137,91	18,16	18,11	17,93	5,39	17,59	-137,91
Umid. Romp. (%)	16,78	16,77	16,86	16,72	16,52	16,90	16,84	17,13	16,98
Carga de Rup. (kgf)	737	677	643	751	797	825	473	524	570
Tensão de Rup. (MPa)	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	0,6	0,7	0,7
Tem. M. de Rup. (MPa)	0,86			0,99			0,66		
Δ Média (%)	7,5	-1,3	-6,2	-5,1	0,8	4,3	-9,4	0,3	9,1
MISTURA 5									
Umid. Ótima (%)	19,38								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	31	32	33	19	20	21	7	8	9
Umid. Moldag. (%)	19,86	19,58	18,78	18,12	19,00	19,44	19,68	19,38	19,32
Umid. Romp. (%)	18,92	18,62	18,64	18,70	18,63	19,06	18,51	18,41	18,45
Carga de Rup. (kgf)	920	966	938	1112	1025	1057	1304	1256	1391
Tensão de Rup. (MPa)	1,2	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3	1,6	1,6	1,7
Tem. M. de Rup. (MPa)	1,18			1,34			1,65		
Δ Média (%)	-2,3	2,6	-0,4	4,4	-3,7	-0,7	-1,0	-4,6	5,6

APÊNDICE P – TABELA RESUMO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO 1 E DAS MISTURAS 1, 3 E 5.

COMPRESSÃO SIMPLES - TENSÃO DE RUPTURA (MPa)						
DIAS DE CURA	**7**		**14**		**28**	
SOLO 1	0,63	0,64	0,65	0,51	0,56	0,54
	0,59		0,51		0,51	
	0,69		0,51		0,56	
MISTURA 1	1,01	1,00	1,12	1,20	0,78	0,77
	0,98		1,27		0,81	
	0,73		1,19		0,71	
MISTURA 3	0,93	0,86	0,94	0,99	0,59	0,66
	0,85		1,00		0,66	
	0,81		1,04		0,72	
MISTURA 5	1,16	1,18	1,40	1,34	1,64	1,65
	1,21		1,29		1,58	
	1,18		1,33		1,75	

APÊNDICE Q – TABELA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO 2 E DAS MISTURAS 2, 4 E 6.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL									
SOLO 2									
Umid. Ótima (%)	20,00								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	40	50	51	28	29	45	1	2	3
Umid. Moldag. (%)	18,89	20,49	20,07	19,40	19,66	19,79	19,73	18,97	18,73
Umid. Romp. (%)	17,53	17,80	14,90	11,82	17,83	18,69	17,26	17,36	17,62
Carga de Rup. (kgf)	415	368	418	471	487	356	409	345	300
Tensão de Rup. (KPa)	124,98	119,44	136,37	140,49	150,28	109,85	124,98	100,52	87,41
Ten. M. de Rup. (KPa)	126,93			145,38			112,75		
Δ Média (%)	-1,5	-5,9	7,4	-3,4	3,4	-24,4	10,8	-10,8	-22,5
MISTURA 2									
Umid. Ótima (%)	19,60								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	48	34	36	42	23	24	13	14	15
Umid. Moldag. (%)	19,81	18,79	18,51	19,68	21,39	18,56	19,20	18,72	19,30
Umid. Romp. (%)	17,00	17,76	17,70	19,08	19,51	14,93	17,56	17,62	17,54
Carga de Rup. (kgf)	208	227	183	145	176	182	258	307	283
Tensão de Rup. (KPa)	67,86	71,10	56,75	46,82	55,68	55,08	81,21	93,81	88,64
Ten. M. de Rup. (KPa)	69,48			55,38			87,89		
Δ Média (%)	-2,3	2,3	-18,3	-15,5	0,5	-0,5	-7,6	6,7	0,9
MISTURA 4									
Umid. Ótima (%)	20,80								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	31	32	33	19	20	21	5	4	6
Umid. Moldag. (%)	17,53	19,08	19,77	19,44	20,28	19,42	21,08	19,31	20,05
Umid. Romp. (%)	16,43	17,32	17,71	17,48	17,76	17,91	19,26	19,34	19,54
Carga de Rup. (kgf)	221	253	191	333	395	387	315	348	390
Tensão de Rup. (KPa)	62,36	73,03	55,65	99,33	120,11	117,68	102,77	114,13	137,25
Ten. M. de Rup. (KPa)	67,70			118,89			125,69		
Δ Média (%)	-7,9	7,9	-17,8	-16,5	1,0	-1,0	-18,2	-9,2	9,2
MISTURA 6									
Umid. Ótima (%)	20,20								
DIAS DE CURA	7			14			28		
Código	49	39	38	25	27	44	16	17	10
Umid. Moldag. (%)	20,87	18,95	18,07	19,38	19,11	20,13	20,46	19,15	23,02
Umid. Romp. (%)	18,40	17,54	17,05	17,37	17,51	19,01	17,16	16,88	21,89
Carga de Rup. (kgf)	632	529	468	519	489	567	633	556	521
Tensão de Rup. (KPa)	192,18	152,00	133,25	151,92	141,81	168,33	184,42	156,18	165,66
Ten. M. de Rup. (KPa)	142,63			154,02			170,30		
Δ Média (%)	34,7	6,6	-6,6	-1,4	-7,9	9,3	8,3	-8,3	-2,7

APÊNDICE R – TABELA RESUMO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO 2 E DAS MISTURAS 2, 4 E 6.

TRAÇÃO POR COMP. DIAMETRAL - TENSÃO DE RUPTURA (KPa)						
DIAS DE CURA	**7**		**14**		**28**	
SOLO 2	124,98	126,93	140,49	145,38	124,98	112,75
	90,10		150,28		100,52	
	60,92		84,42		87,41	
MISTURA 2	71,10	69,48	39,19	55,38	13,56	87,89
	56,75		55,68		10,28	
	52,36		55,08		34,08	
MISTURA 4	62,36	67,70	99,33	118,89	102,77	125,69
	73,03		120,11		114,13	
	55,65		117,68		34,08	
MISTURA 6	125,28	142,63	151,92	154,02	165,66	170,30
	133,25		141,81		143,86	
	152,00		113,04		158,84	

ANEXOS

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLO (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	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 max.	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.

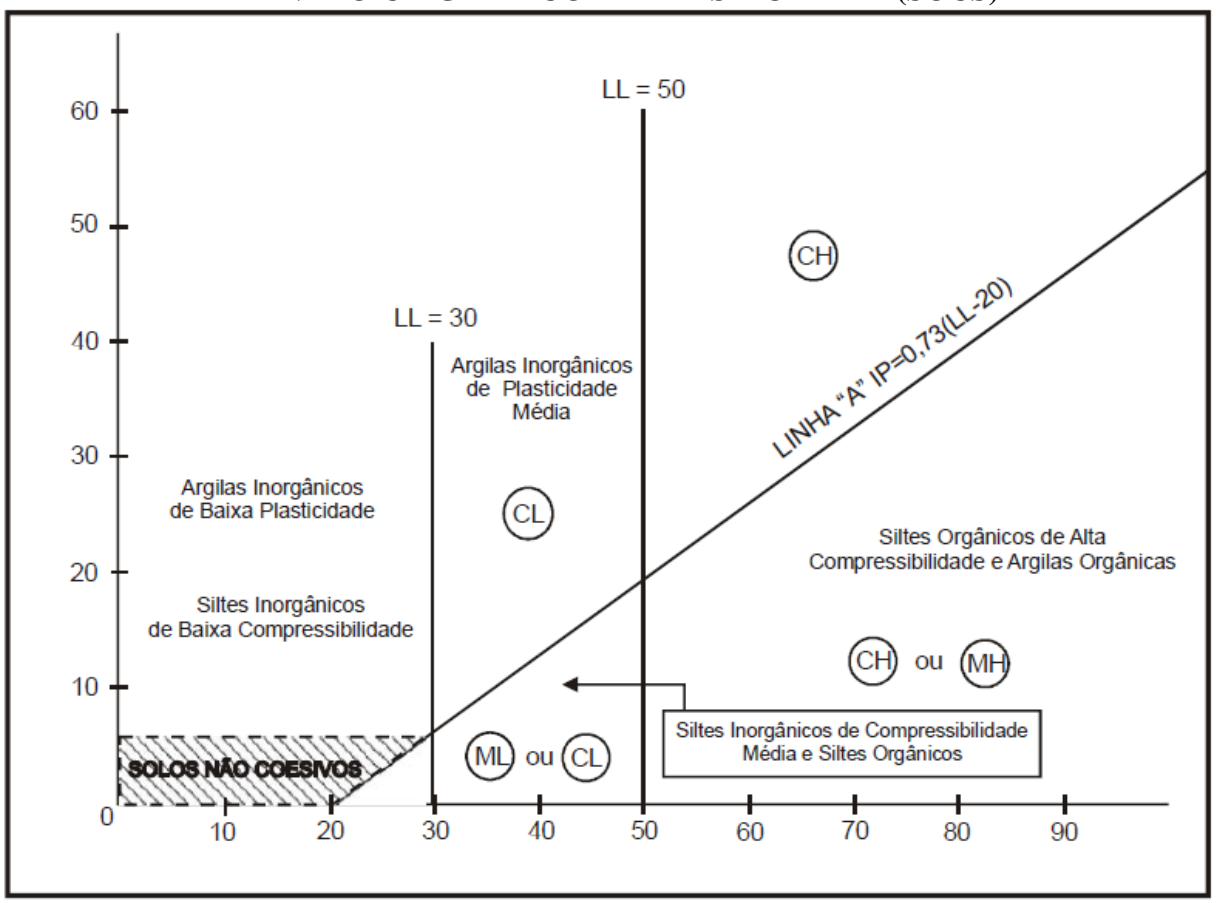
Fonte: Manual de Pavimentação DNIT – IPR 719, (2006)

ANEXO B – SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO - 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.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			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.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			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	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	SILTES e ARGILAS com LL > 50		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes 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.

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

ANEXO C – GRÁFICO DE PLASTICIDADE (SUCS)



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