

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**CARLA EUGÊNIA RÊGO GONÇALVES**

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS UTILIZANDO MATERIAL FRESADO  
E CIMENTO**

São Luís

2019

**CARLA EUGÊNIA RÊGO GONÇALVES**

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS UTILIZANDO MATERIAL FRESADO  
E CIMENTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

São Luís

2019

Gonçalves, Carla Eugênia Rêgo.

Estudo de estabilização de solos utilizando material fresado e cimento /  
Carla Eugênia Rêgo Gonçalves. – São Luís, 2019.

108 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade  
Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1.Pavimentos. 2.Estabilização de solos. 3.Resíduo asfáltico fresado.

**CARLA EUGÊNIA RÊGO GONÇALVES**

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS UTILIZANDO MATERIAL  
FRESADO E CIMENTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

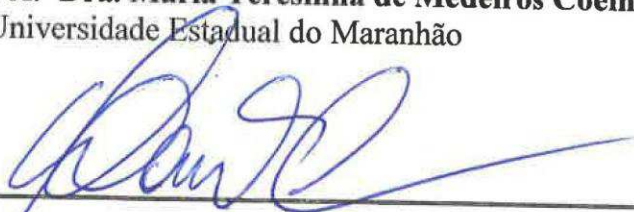
Aprovado em: 05 / 07 / 2019

**BANCA EXAMINADORA**



---

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



---

**1º membro: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana**  
Universidade Estadual do Maranhão



---

**2º membro: Prof. Me. Mariyaldo Costa Duarte**  
Universidade Estadual do Maranhão

À minha mãe, meu porto  
seguro.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de qualquer coisa, agradeço a Deus, a grande razão de tudo, por me dar forças em todos os momentos da vida.

Segundamente, agradeço a minha família. Meus pais, Simone Maria e Carlos Flávio, por sempre fazerem o possível para me proporcionar as melhores oportunidades ao longo da minha vida; e meu irmão, Pedro Lucas, minha companhia diária, amigo com quem sempre posso contar.

Agradeço também a todos os amigos que fiz durante o curso e que junto comigo fizeram parte dessa caminhada. Eles, sem dúvida, a tornaram mais leve e prazerosa.

Não poderia deixar de agradecer também a minha professora e orientadora, Maria Teresinha, que dedicou seu tempo a me ajudar e corrigir da melhor forma possível a minha pesquisa.

## RESUMO

A estabilização é uma técnica bastante utilizada quando se tem a necessidade de melhorar um solo, principalmente para fins rodoviários. Este trabalho tem o objetivo de aplicar essa técnica para um solo da região de São Luís do Maranhão, utilizando a estabilização granulométrica e química, simultaneamente. A estabilização granulométrica se deu pela utilização de asfalto residual fresado, também conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), e a química pela adição de cimento. Inicialmente foram realizados ensaios com os materiais virgens para caracterização dos mesmos, e posteriormente foram propostas misturas com diferentes teores de materiais. Com estas misturas foram confeccionados corpos de prova para serem utilizados nos ensaios de CBR e Resistência à Compressão Simples, no qual os resultados foram analisados, comparados entre si e com outras pesquisas. Algumas das misturas atingiram o parâmetro mínimo da resistência que as normas regentes propõem e percebeu-se que a resistência aumentou até certa porcentagem de RAP, diminuindo ao atingir esse ponto além de que a mistura que continha apenas solo e cimento obteve o menor resultado de resistência. Sendo assim, o estudo mostra que há viabilidade no uso do material residual fresado na técnica de estabilização granulométrica combinada à estabilização química, apresentando resultados positivos nas misturas, sendo necessário, cada vez mais, estudos para desenvolver melhores técnicas em sua aplicação.

Palavras-chave: Pavimentos, estabilização de solos, resíduo asfáltico fresado.

## ABSTRACT

Stabilization is a technique widely used when it is necessary to improve a soil, mainly for road purposes. This research has the objective to apply this technique to a soil of the region of São Luís do Maranhão, using the granulometric stabilization and chemical stabilization, simultaneously. The granulometric stabilization was due to the use of residual asphalt milled, also known as RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), and the chemical stabilization by the addition of cement. Initially, tests were performed with the virgin materials to characterize them, and later mixtures with different material contents were proposed. With these mixtures, test specimens were prepared to be used in the CBR and Simple Compressive Strength tests, in which the results were analyzed, compared to each other and to other studies. Some of the mixtures reached the minimum resistance parameter proposed by the regent norms and it was observed that the resistance increased to a certain percentage of RAP, decreasing to reach this point, besides that the mixture containing only soil and cement obtained the lowest resistance result . Thus, the study shows that there is feasibility in the use of the milled residual material in the technique of granulometric stabilization combined with chemical stabilization, presenting positive results in the mixtures, being necessary, increasingly, studies to develop better techniques in its application.

Key words: Pavements, soil stabilization, milling asphalt residue.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seção de um pavimento rígido.....	20
Figura 2- Seção de um pavimento semi-rígido.....	21
Figura 3- Seção de um pavimento flexível.....	21
Figura 4- Fresagem a frio.....	25
Figura 5- Rolo de fresagem padrão.....	26
Figura 6- Superfície resultante da fresagem padrão.....	27
Figura 7- Rolo de fresagem fina.....	27
Figura 8- Superfície resultante da fresagem fina.....	28
Figura 9 - Rolo de uma microfresagem.....	28
Figura 10- Superfície resultante de uma microfresagem.....	29
Figura 11- Perfil de um solo.....	30
Figura 12- Local de retirada do solo.....	36
Figura 13- Solo utilizado na pesquisa.....	37
Figura 14 - Extração do solo.....	37
Figura 15- Material fresado utilizado.....	38
Figura 16 - Retirada do RAP.....	39
Figura 17- Cimento utilizado.....	39
Figura 18- (a) Agregado não destorroado e (b) material sendo destorroado.....	42
Figura 19 - Jogos de peneiras para realizar o ensaio da granulometria.....	43
Figura 20- Limites de Consistência.....	45
Figura 21- (a) Tentativa de formar a bola (b) tentativa de formar o cilindro.....	46
Figura 22- Aparelho de Casagrande.....	47
Figura 23- (a) Cilindro utilizado no ensaio MCT e (b) compactador do ensaio.....	50
Figura 24- Solução equivalente de areia.....	53
Figura 25- (a) Solução até medida de 10cm e (b) solução + solo.....	54
Figura 26- Pistão introduzido na proveta.....	54
Figura 27- Quantidade de grãos calculada de cada fração.....	56
Figura 28- Medição do agregado.....	56
Figura 29- Equipamento de Abrasão Los Angeles.....	58
Figura 30- Frasco de Chapman com areia e água destilada.....	59
Figura 31- (a) Material submerso e (b) retirando excesso de água no pano seco.....	60
Figura 32- Realizando o ensaio de densidade do RAP.....	60

Figura 33- Rotarex .....	62
Figura 34- Manuseamento do rotarex .....	62
Figura 35- Aparência do RAP após o rotarex .....	63
Figura 36- Cilindro e golpeador do ensaio .....	64
Figura 37- Mistura M4 pronta para receber umidificação .....	66
Figura 38- Equipamento posto em água para ensaio CBR.....	67
Figura 39- Molde e soquete – ensaio Resistência à compressão simples .....	68
Figura 40- (a) Misturas separas para ensaio e (b) mistura na bandeja .....	69
Figura 41- Extrator de amostras .....	70
Figura 42- (a) Corpo envolto com papel filme e (b) envolto com 2° plástico	71
Figura 43- Corpos de prova na câmara úmida .....	71
Figura 44- Corpos pré-rompimento na água .....	72
Figura 45- Prensa eletrônica .....	72
Figura 46- (a) Corpo na máquina e (b) aparência do corpo após rompimento ....	73
Figura 47- Tentativa do ensaio limite de plasticidade.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de classificação – método TRB.....	41
Tabela 2 - Classificação do agregado do ensaio índice de forma .....	57
Tabela 3 - Composição do solo.....	74
Tabela 4 - Resultado dos ensaios para classificação MCT.....	82
Tabela 5 - Tipos de grão – índice de forma .....	84
Tabela 6 - Classificação dos grãos .....	84
Tabela 7 - Resultado abrasão Los Angeles .....	84
Tabela 8 - Resultado densidade do solo .....	85
Tabela 9 - Resultado densidade e absorção do RAP .....	85
Tabela 10 - Resultado do ensaio teor de ligante asfáltico .....	86
Tabela 11 - Compactação do solo .....	86
Tabela 12 - Compactação M1 .....	87
Tabela 13 - Compactação M2 .....	88
Tabela 14 - Compactação M3 .....	89
Tabela 15 - Compactação M4 .....	90
Tabela 16 - Resultados compactação .....	91
Tabela 17 - Umidades ótimas adotadas.....	92
Tabela 18 - Ensaio CBR - solo.....	93
Tabela 19 - Resultado ensaio resistência à compressão simples.....	94
Tabela 20 - Valores da resistência em misturas teor 3% de cimento .....	95
Tabela 21 - Comparativo de resultados .....	97
Tabela 22 - Comparativo de resultados .....	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Materiais mais utilizados para base e sub-base.....	23
Quadro 2 - Especificações para materiais de base e sub-base.....	23
Quadro 3 - Faixas de granulometria propostas pelo DNIT.....	33
Quadro 4 - Misturas utilizadas na pesquisa.....	40
Quadro 5 - Tipos de solos classificação MCT e suas utilidades.....	52
Quadro 6 -Quantidade de agregado em relação à sua dimensão máxima.....	55
Quadro 7 - Misturas utilizadas na pesquisa e suas respectivas simbologias.....	76
Quadro 8 - Granulometria solo, RAP E misturas.....	77
Quadro 9 - Coeficientes para cálculo do IG.....	81
Quadro 10 - Alturas e resultados do Equivalente de Areia.....	83

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representação dos tipos de granulometria.....	44
Gráfico 2 - Ensaio limite de liquidez.....	47
Gráfico 3 - Exemplo de curvas resultantes do ensaio mini-MCV .....	49
Gráfico 4 - Curvas de compactação MCV .....	49
Gráfico 5 - Determinação do solo método MCT .....	51
Gráfico 6 - Curva granulométrica do solo .....	74
Gráfico 7 - Curva granulométrica do RAP .....	75
Gráfico 8 - Enquadramento da mistura M1 na faixa F .....	77
Gráfico 9 - Enquadramento da mistura M2 na faixa D .....	78
Gráfico 10 - Enquadramento da mistura M3 na faixa D .....	78
Gráfico 11 - Enquadramento da mistura M8 na faixa D .....	79
Gráfico 12 - Enquadramento da mistura M9 na faixa C.....	79
Gráfico 13 - Enquadramento da mistura M10 na faixa B.....	80
Gráfico 14 - Classificação do solo pelo método MCT .....	83
Gráfico 15 - Compactação do solo .....	87
Gráfico 16 - Compactação da mistura M1 .....	88
Gráfico 17 - Compactação da mistura M2 .....	89
Gráfico 18 - Compactação da mistura M3 .....	90
Gráfico 19 - Compactação da mistura M4 .....	91
Gráfico 20 - Relação umidade ótima x teor de RAP nas misturas .....	92
Gráfico 21 - Ensaio CBR - solo .....	93
Gráfico 22 - Relação resistência x teor de RAP .....	96

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	17
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
2.1 OBRAS RODOVIÁRIAS .....	18
2.2 PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO .....	19
2.3 PAVIMENTO .....	19
<b>2.3.1 Pavimento rígido</b> .....	20
<b>2.3.2 Pavimento semi-rígido</b> .....	20
<b>2.3.3 Pavimento flexível</b> .....	21
2.3.3.1 Revestimento asfáltico .....	21
2.3.3.2 Base e sub-base .....	21
2.3.3.3 Reforço do subleito .....	24
2.3.3.4 Regularização do subleito .....	24
2.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTO .....	24
2.5 FRESAGEM DE PAVIMENTO .....	24
<b>2.5.1 Fresagem a frio</b> .....	24
<b>2.5.2 Fresagem à quente</b> .....	25
<b>2.5.3 Classificação de fresagem de pavimento</b> .....	25
2.5.3.1 Quanto à espessura de corte .....	25
2.5.3.1.1 Fresagem superficial .....	25
2.5.3.1.2 Fresagem rasa .....	25
2.5.3.1.3 Fresagem profunda .....	26
2.5.3.2 Quanto à rugosidade resultante na pista .....	26
2.5.3.2.1 Fresagem padrão .....	26
2.5.3.2.2 Fresagem fina .....	27
2.5.3.2.3 Microfresagem .....	28
2.6 SOLO .....	29
<b>2.6.1 Origem e formação</b> .....	29

<b>2.6.2 Classificação dos solos</b> .....	31
<b>2.6.3 O solo e a engenharia civil</b> .....	31
<b>2.7 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS</b> .....	32
<b>2.7.1 Estabilização mecânica</b> .....	32
<b>2.7.2 Estabilização física</b> .....	33
<b>2.7.3 Estabilização química</b> .....	33
<b>2.8 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE</b> .....	33
<b>2.9 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS QUIMICAMENTE COM CIMENTO</b> .....	34
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	36
<b>3.1 MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	36
<b>3.1.1 Solo</b> .....	36
<b>3.1.2 RAP</b> .....	38
<b>3.1.3 Cimento</b> .....	39
<b>3.1.4 Misturas</b> .....	40
<b>3.2 ENSAIOS REALIZADOS</b> .....	41
<b>3.2.1 Ensaio para a classificação TRB</b> .....	41
<b>3.2.1.1 Granulometria</b> .....	42
<b>3.2.1.2 Limites de Consistência</b> .....	44
<b>3.2.1.2.1 Limite de plasticidade</b> .....	45
<b>3.2.1.2.2 Limite de liquidez</b> .....	46
<b>3.2.1.2.3 Índice de plasticidade</b> .....	48
<b>3.2.2 Ensaio para a classificação MCT</b> .....	48
<b>3.2.2.1 Compactação Mini-MCV</b> .....	48
<b>3.2.2.2 Perda de massa por imersão</b> .....	50
<b>3.2.2.3 Classificação MCT</b> .....	51
<b>3.2.3 Equivalente de areia</b> .....	52
<b>3.2.4 Índice de forma</b> .....	55
<b>3.2.5 Abrasão Los Angeles</b> .....	57
<b>3.2.6 Densidade e absorção</b> .....	58
<b>3.2.7 Teor de ligante asfáltico</b> .....	61
<b>3.2.8 Ensaio de compactação Proctor</b> .....	64
<b>3.2.9 Índice de suporte Califórnia</b> .....	66
<b>3.2.10 Resistência à compressão simples</b> .....	68
<b>4 RESULTADOS</b> .....	73

4.1 RESULTADOS PARA CLASSIFICAÇÃO TRB .....	73
<b>4.1.1 Análise granulométrica .....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.2 Limites de consistência .....</b>	<b>80</b>
4.1.2.1 Limite de plasticidade.....	80
4.1.2.2 Limite de liquidez.....	80
4.1.2.3 Índice de plasticidade .....	81
<b>4.1.3 Classificação TRB.....</b>	<b>81</b>
4.2 RESULTADOS PARA CLASSIFICAÇÃO MCT .....	82
4.3 EQUIVALENTE DE AREIA.....	83
4.4 ÍNDICE DE FORMA .....	83
4.5 ABRASÃO LOS ANGELES .....	84
4.6 DENSIDADE E ABSORÇÃO .....	84
4.7 TEOE DE LGANTE ASFÁLTICO.....	85
4.8 COMPACTAÇÃO PROCTOR .....	85
4.9 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA .....	92
4.10 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	93
4.11 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	94
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>99</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>
<b>7 APÊNDICES .....</b>	<b>104</b>
APÊNDICE A – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO M1 .....	105
APÊNDICE B – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO M2 .....	106
APÊNDICE C – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO M3 .....	107
APÊNDICE D – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO M4.....	108



## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, as estradas se apresentam, atravessando vastas extensões territoriais, ligando dois ou mais pontos possibilitando o deslocamento das pessoas, animais e veículos; em sua maioria com finalidade tanto política, militar, religiosa ou comercial (BERNUCCI *et al*, 2006).

Por conta desta importância, o investimento na infraestrutura de transporte tornou-se algo importantíssimo para o desenvolvimento de cidades principalmente no quesito econômico. As técnicas de execução avançaram cada vez mais e hoje conta-se com um vasto número de artifícios para melhor satisfazer as necessidades de cada obra, incluindo técnicas para melhoramento de materiais, como o solo (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O solo é um dos materiais mais utilizados em obras viárias e é encontrado em larga abundância na natureza, além de ter baixo-custo em comparação aos outros materiais. No entanto, nem sempre o solo encontrado a disposição para a execução da obra apresenta propriedades, características ou resistência adequadas para compor o pavimento e sustentar os esforços de tráfego. As possíveis soluções para contornar o problema são substituir o solo ruim para um de qualidade superior, adequar o projeto à situação ou aperfeiçoar o solo já existente (BRITO *et PARANHOS*, 2017).

A melhor solução irá depender de circunstâncias de área de execução, logística, comodidade e principalmente financeira, pois o custo de transporte do solo bom pode sair mais caro do que o previsto.

Por conta disso, a técnica de estabilização do solo vem sendo cada vez mais utilizada na execução de obras, tanto por sua comodidade quanto pelo custo em relação às outras maneiras de solução (ROJAS, 2015).

Dentre os métodos de estabilização de solos temos a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizante químico.

Para a execução de uma estabilização de solo bem sucedida, é necessário a realização de ensaios laboratoriais e testes de campo, embora os ensaios de laboratório resultem em resistências maiores do que o material correspondente do campo, eles ajudam a avaliar a eficácia dos materiais estabilizados em campo e auxiliam na determinação do tipo de estabilizante e de sua quantidade. Estabilidade, força, compressibilidade, permeabilidade e durabilidade do volume são as propriedades do solo que mais interessam aos engenheiros, e a compreensão destas características é crucial para obter a estabilidade do solo (MAKUSA, 2013).

O presente estudo acadêmico aborda a investigação da estabilização granulométrica e química do solo, com o material proveniente da fresagem de pavimentos, também conhecido como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e cimento realizando ensaios laboratoriais e pesquisa bibliográfica para obtenção de respostas coerentes.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A estabilização química de um solo pode ser feita utilizando variados materiais.

Para este trabalho foi feita a escolha de estabilizar o solo com a junção de dois materiais, o cimento e o material fresado (RAP).

O cimento é um material já bastante utilizado para esta técnica de melhoramento do solo e apresenta resultados satisfatórios e convincentes.

Para realizar este presente estudo foram feitas inúmeras pesquisas bibliográficas e observou-se que o uso do RAP, material proveniente da remoção de camadas de um pavimento defeituoso, não é tão comum, mas já vem sendo utilizado e estudado para a estabilização de solos e vem tendo bons resultados. Assim, além de ter a função de melhorar o solo, ainda estará sendo reciclado – trazendo benefícios ao meio ambiente- e reduzindo consideravelmente custos de projeto e execução.

A justificativa para tal estudo é a hipótese de que a combinação de tais materiais – que por si só já trazem bons resultados- irá cumprir muito bem o papel de elevar as propriedades e resistência do solo, além de trazer benefícios já citados para o meio ambiente com a reutilização de material fresado.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Geral

Estudar a estabilização do solo para pavimentação utilizando material fresado residual (RAP) e cimento.

### 1.3.2 Específicos

- Estudar as propriedades físicas e mecânicas do solo original;
- Estudar as propriedades físicas e mecânicas do RAP;
- Estudar as propriedades físicas e mecânicas do solo estabilizado com RAP e cimento;
- Comparar os resultados obtidos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 OBRAS RODOVIÁRIAS

As obras de pavimentação rodoviária estão estritamente ligadas ao desenvolvimento das cidades. As técnicas se ampliaram com o tempo e melhoraram tanto as percepções de projeto quanto a execução das obras.

No Brasil, as obras viárias tiveram um grande impulsionamento, principalmente, na década de 50, quando, fruto do intenso intercâmbio de técnicos do DNER, criou-se uma grande transferência de tecnologia vinda dos Estados Unidos (DNER, 1996).

Este tipo de obra é muito abrangente e está ligada a diversas áreas e estudos como geologia, drenagem e mecânica dos solos, além de segurança rodoviária e engenharia de tráfego.

É uma obra de custo bastante elevado que se dá principalmente por gastos com materiais e equipamentos pesados específicos para a execução de cada camada, muitas vezes havendo sua utilização conjugada ao longo da obra (DNER, 1996).

Com várias considerações minuciosas o processo até a entrega da obra está dividido em projeto, planejamento, orçamento e execução, sendo o primeiro o primordial para o bom andamento da obra em todos os aspectos (DNER, 1996).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNER (1996), o projeto de uma obra rodoviária comporta três etapas:

- Estudos preliminares: determinação preliminar de estudo das condições da área.

Que brange, dentre outros:

- Estudo de tráfego;
- Estudo geológico;
- Estudo hidrológico;
- Estudo geotécnico;
- Estudo topográfico.

-Anteprojeto: definição de alternativas e estimativas do custo da obra.

-Projeto executivo: abrange o detalhamento do anteprojeto e faz a representação da obra a ser executada. Nesta fase são complementados os estudos e desenvolvidos os seguintes projetos:

- Projeto Geométrico;
- Projeto de Terraplenagem;
- Projeto de Drenagem;

- Projeto de Obras complementares;
- Projeto de Pavimentação.

O último citado, Projeto de Pavimentação, é o que gera maior importância para o aprofundamento deste estudo e será caracterizado a seguir.

## 2.2 PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

Para a realização do projeto de pavimentação é necessário fazer previamente a investigação do subleito e a escolha dos materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento.

Em relação à investigação do subleito os ensaios terão a finalidade de conhecer a resistência do solo do local em que a obra será realizada, assim poderá ser identificado se o mesmo corresponde aos esforços que irá sofrer com o tráfego estimado. A identificação de um solo resistente não necessitará nenhuma intervenção, ao contrário de que se descubra um solo não resistente, suscetível a recalques e outros problemas haverá a necessidade de interceder o local com soluções plausíveis. Geralmente é feito o reforço do subleito, que é uma camada de solo feita com material de empréstimo com características e condições melhores que as do subleito e que será abordado de forma mais aprofundada posteriormente (DNER, 1996).

Em relação à escolha dos materiais de pavimentação, os estudos e ensaios irão apontar os materiais mais indicados para cada camada que tem características e comportamentos individuais e o material utilizado em cada uma delas deve ter os valores mínimos dos devidos parâmetros indicados e que também serão abordados mais profundamente posteriormente (DNER, 1996).

Os estudos são feitos através dos ensaios de caracterização do solo que podem ser tanto laboratoriais como em campo.

## 2.3 PAVIMENTO

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras limitadas, construída sobre a cota final da terraplenagem, destinada técnica e economicamente a suportar os esforços vindos do tráfego de veículos e do clima, e a proporcionar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2006).

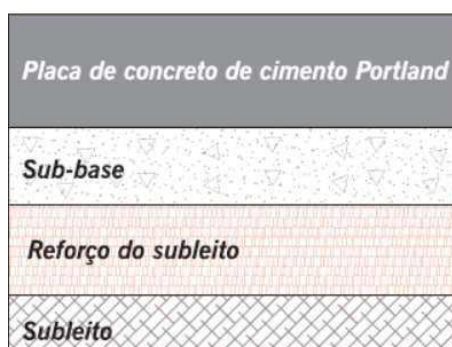
O pavimento é classificado em três tipos: pavimento rígido, pavimento asfáltico e pavimento semi-rígido.

### 2.3.1 Pavimento rígido

Segundo Bernucci et al. (2006), os pavimentos de concreto são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland (figura 1). Nesses pavimentos a espessura é escolhida em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas abaixo que o compõe. As placas podem ser do tipo armadas ou não com barras de aço. É comum representar a subcamada desse pavimento como sub-base, pois a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos.

Apesar de ter um investimento inicial mais caro, pavimentos deste tipo têm grande durabilidade e resistência e por conta disso necessitam de menos manutenções, economizando em termos de longo prazo. Uma de suas principais diferenças é a forma de distribuição ao longo do terreno que acontece de forma horizontal, enquanto o pavimento flexível distribui as cargas de forma vertical. Dessa forma, não há a necessidade de um solo tão perfeito –quanto se deve ter no pavimento flexível - pois as cargas são distribuídas por uma área maior (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 1: Seção de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al* (2006).

### 2.3.2 Pavimento semi-rígido

De acordo com o DNIT (2006) é o pavimento que possui base cimentada por conta de algum aglutinante com propriedades cimentícias. Um exemplo é um pavimento com alguma camada, seja base ou sub-base, de solo cimento e revestimento asfáltico. A figura 2 mostra as camadas de um pavimento desse tipo.

Figura 2: Seção de um pavimento semi-rígido

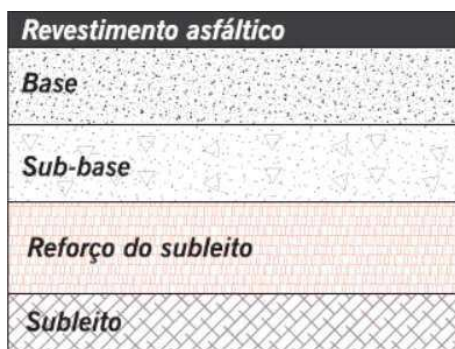


Fonte: Abada (2008).

### 2.3.3 Pavimento flexível

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura (figura 3) repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 3: Seção de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al (2006).

#### 2.3.3.1 Revestimento asfáltico

Bernucci *et al.* (2006, p. 09) define que “o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento”.

Este tipo revestimento é uma mistura de agregados minerais de variados tamanhos com ligantes asfálticos (que podem ser a quente, a frio ou emulsões) e pode ser fabricada em usinas específicas ou até mesmo na própria pista .

A dosagem e escolha dos materiais vão depender dos requisitos técnicos que se buscam ou necessitam no local. Dentre os tipos mais comuns de revestimento, tem-se:

-Concreto asfáltico (CA): é um dos tipos mais utilizados nas rodovias brasileiras. É composto por um agregado miúdo, agregado graúdo e o ligante asfáltico e pode ter adição de compostos aditivos para melhoramento de alguma característica específica (BERNUCCI *et al*, 2006).

-Camada porosa de atrito (CPA): tipo de revestimento geralmente mais utilizado em regiões chuvosas. Tem a finalidade funcional de aumentar a aderência entre a pista e alto poder de percolação da água da chuva até as sarjetas, diminuindo a lâmina d'água podendo reduzir o número de acidentes (BERNUCCI *et al*, 2006).

-Stone Matrix Asphalt (SMA): mistura asfáltica composta de agregados minerais graduados, ligante asfáltico, material de enchimento e fibras de celulose. É utilizado principalmente em regiões de tráfego pesado ou intenso, pois é muito resistente e durável (BERNUCCI *et al*, 2006).

Dentre outras, as misturas citadas acima são as mais utilizadas e conhecidas.

#### 2.3.3.2 Bases e sub-bases

A base é a camada logo abaixo do revestimento e tem função de receber e distribuir de forma uniforme os esforços proveniente do tráfego, enquanto a sub-base é a camada complementar a ela quando não se é recomendado o assentamento direto da base no subleito ou reforço do subleito ou quando se tem a necessidade de uma camada muito espessa, sendo recomendável sua divisão em duas (SENÇO,2007).

Os materiais mais utilizados para estas camadas estão esquematizados no quadro

1.

Quadro1: materiais mais utilizados para base e sub-base



Fonte: Adaptado de DNIT (1996).

Cada uma dessas camadas tem suas recomendações específicas em relação às características do material (quadro 2).

Quadro 2: Especificações para material de base e sub-base

	SUB-BASE	BASE
CBR	$\geq 20\%$	$\geq 80\%$ - TRÁFEGO PESADO $\geq 60\%$ - TRÁFEGO LEVE
EXPANSÃO	$\leq 1\%$	$\leq 0,5\%$
IG	0	-
LIMITE DE LIQUIDEZ	-	$\leq 25\%$
ÍNDICE PLASTICIDADE	-	$\leq 6\%$

Fonte: Adaptado de DNIT (1996).



### 2.3.3.3 Reforço do subleito

De acordo com o Manual de Pavimentação (DNER-1996), reforço do subleito é a camada existente para casos de pavimentos muito grossos, construída com o objetivo de diminuir a espessura da própria sub-base. Para esta camada deve-se usado material de empréstimo com CBR maior que o subleito e expansão  $\leq 1\%$  (DNIT, 1996).

### 2.3.3.4 Regularização do subleito

Este serviço é implementado quando tem-se a necessidade de tratar o leito da estrada para receber o pavimento. Tem espessura variável.

## 2.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Bernucci *et al.* (2006) fala que, reciclagem de pavimento é o processo de reuso de misturas asfálticas antigas e danificadas para fabricação de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes excedentes, resultados da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP ou EAP novos, quando necessários, e também com adição de aglomerantes hidráulicos, quem podem ser diferentes tipos de cimento ou cal.

A técnica mais comum de reciclagem de pavimentos é a fresagem. Utilizando maquinários específicos, essa técnica tem proporcionado economia e benefícios ao meio ambiente por conta de seu reaproveitamento de praticamente todo material retirado (BERNUCCI *et al.*, 2006).

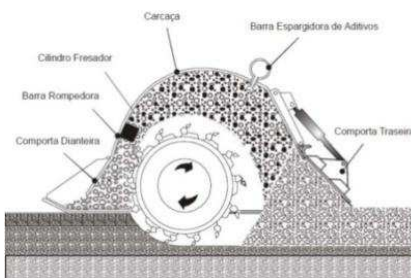
## 2.5 FRESAGEM DE PAVIMENTOS

De acordo com DNIT 159/2011 -ES, a fresagem é um processo mecânico que consiste na realização da retirada ou desbaste de uma ou mais camadas de um pavimento. É realizada através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante. É classificado de duas maneiras quanto a forma de execução: fresagem a frio ou fresagem a quente.

### 2.5.1 Fresagem a Frio

De acordo com Bonfim (2007), este processo (figura 4), é realizado na temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do pavimento. O único tipo de aquecimento, apesar de desprezível no processo, refere-se à energia liberada pelo impacto dos dentes de corte no pavimento durante a fresagem.

Figura 4: Fresagem a frio



Fonte: DNIT (2006).

## 2.5.2 Fresagem a Quente

O processo da fresagem a quente é semelhante ao da fresagem a frio, mas com a ressalva de que o revestimento está quente. Segundo Bonfim (2007), nesse tipo de fresagem, não ocorre uma modificação importante da granulometria do material, considerando apenas a desagregação do mesmo, possibilitando assim a produção da mistura com o material novo proveniente de usina de asfalto.

## 2.5.3 Tipos de fresagem de pavimentos

A fresagem de pavimentos pode ser classificada tanto quanto a espessura de corte quanto a rugosidade da pista.

### 2.5.3.1 Quanto à espessura de corte

É classificado em espessura de corte superficial, rasa e profunda.

#### 2.5.3.1.1 Fresagem superficial

Este tipo de fresagem é indicado apenas para reparação de defeitos da superfície do pavimento. Também é conhecida como fresagem de recuperação. Os principais defeitos reparados com essa técnica são a exsudação e deformações plásticas (BONFIM, 2007).

#### 2.5.3.1.2 Fresagem rasa

Fresagem realizada nas camadas superiores do pavimento, com profundidade em torno de 5 cm. É utilizado principalmente para tratar de defeitos funcionais e remendos superficiais. Este tipo de fresagem é bastante utilizado na correção do greide do pavimento (BONFIM, 2007).

A fresagem rasa produz uma textura que irá aumentar a resistência ao cisalhamento entre a nova camada de revestimento e o pavimento antigo (DNER, 1996).

### 2.5.3.1.3 Fresagem profunda

De acordo com Bonfim (2007), a fresagem profunda é aquela em que o corte atinge níveis significativos, podendo alcançar, além da camada de revestimento, a profundidade das camadas de ligação, de base e até da sub-base do pavimento. É utilizado para tratar de recuperações no aspecto estrutural e para a execução de serviços para requadramento de buracos e remendos.

### 2.5.3.2 Quanto à rugosidade resultante da pista

Esta condição de fresagem está totalmente ligada ao tipo de cilindro utilizado para desbaste e velocidade de aplicação (BONFIM, 2007).

#### 2.5.3.2.1 Fresagem Padrão

Fresagem executada com o cilindro Standart (figura 5) contendo um espaçamento lateral entre os dentes de 15 mm. Geralmente é utilizado em serviços de recapeamento asfáltico. Quando utilizada se tem a necessidade de executar uma nova camada de revestimento (BONFIM, 2007).

A figura 6 mostra uma superfície de pavimento resultante deste tipo de fresagem.

Figura 5: Rolo de fresagem padrão



Fonte: DVS, (2018).

Figura 6: Superfície resultante da fresagem padrão



Fonte: Bonfim (2007).

#### 2.5.3.2.2 Fresagem Fina

Neste tipo de fresagem utiliza-se o cilindro com um espaçamento lateral entre os dentes de 8 mm (figura 7). Utilizado principalmente para aplicação de microrrevestimento e regularização da pista (BONFIM, 2007).

A figura 8 mostra uma superfície de pavimento resultante deste tipo de fresagem.

Figura 7: Rolo de fresagem fina



Fonte: DVS (2018).

Figura 8: Superfície resultante da fresagem fina



Fonte: Bonfim (2007).

#### 2.5.3.2.3 Microfresagem

Executada utilizando cilindro com espaçamento lateral entre os dentes de 2 a 3mm (figura 9). Este tipo de fresagem aumenta a aderência do pneu e pista sendo dispensável qualquer tipo de revestimento posterior (BONFIM, 2007).

A figura 10 mostra uma superfície de pavimento resultante deste tipo de fresagem.

Figura 9: Rolo de microfresagem



Fonte: DVS (2018).

Figura 10: Superfície resultante da microfresagem



Fonte: Bonfim (2007).

O material resultante dos procedimentos citados acima é chamado de material fresado ou RAP, da sigla em inglês Reclaimed Asphalt Pavement ou Pavimento Asfáltico Recuperado.

## 2.6 SOLO

Neste presente estudo, temos o solo como maior protagonista. Sendo assim, nada mais justo falar sobre ele em aspectos mais específicos e caracterizá-lo.

O solo serve de base e sustentação para qualquer obra civil e conhecer sobre ele é de extrema importância para determinar características fundamentais do projeto e garantir bom resultado da obra (BRAJA, 2014).

A seguir, será dado algumas de suas características.

### 2.6.1 Origem e formação

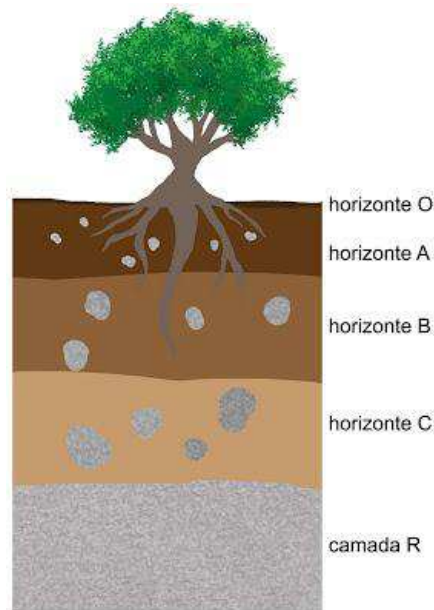
De acordo com Braja (2014), os solos são materiais resultantes do intemperismo ou meteorização das rochas, seja por desintegração mecânica, seja por decomposição química.

A desintegração mecânica ocorre com agentes como água, temperatura e ventos, neste tipo de desintegração se formam solos de partículas mais grossas e intermediárias, e em condições mais especiais, as argilas.

A desintegração química é o processo que ocorre quando há modificação química, o principal agente é a água tendo como os principais mecanismos de ataque a carbonatação, oxidação, hidratação e efeitos químicos da vegetação (CAPUTO, 1988).

De acordo novamente com Caputo (1988), a análise do perfil do solo é um referencial para entendermos a constituição e intemperismos que sofreu. Quando se refere ao perfil do solo, deve-se considerar 5 parcelas, denominadas horizontes. Vale ressaltar que nem todo solo possui todos os horizontes bem definidos. Abaixo, um esquema dos horizontes:

Figura 11: perfil de um solo



Fonte: Só Geografia.

(Disponível em <https://www.sogeografia.com.br>)

- **Horizonte O:** Camada orgânica superficial. Drenado, com cor escura.

- **Horizonte A:** Constituído, basicamente, de rocha alterada e húmus, sendo a região onde se fixa a maior parte das raízes e vivem organismos decompositores e detritívoros.

- **Horizonte E (ou B):** Camada mineral constituída de quantidade reduzida de matéria orgânica, acúmulo de compostos de ferro e minerais resistentes, como o quartzo. Pode ser atingido por raízes mais profundas.

- **Horizonte C:** Camada mineral pouco ou parcialmente alterada.

- **Horizonte R:** Rocha não alterada que deu origem ao solo. Quanto à cor, essa varia de acordo com o material.

### 2.6.2 Classificação dos solos

Os solos podem ser classificados variante a vários métodos. Serão apresentados nesse trabalho, alguns dos métodos para classificar apenas solos para fins rodoviários.



Os métodos mais utilizados são Classificação Unificada (SUCS), Transportation Research Board (TRB) e Miniatura Compacto Tropical (MCT). Os dois últimos foram utilizados para classificação do material deste trabalho e suas metodologias de ensaio serão detalhadas posteriormente.

Mas numa visão geral, o Sistema Unificado de Classificação (Unified Classification System - U. S. C, foi inventado por Arthur Casagrande e classifica o solo em três grandes grupos:

a) Solos grossos - aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é maior que 0,074 mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira nº 200). Neste grupo estão os pedregulhos e areia (CAPUTO, 1988).

b) Solos finos - aqueles cujo diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm. Neste grupo estão as argilas (CAPUTO, 1988).

c) Turfas - solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis. Conhecido popularmente como terra roxa (CAPUTO, 1988).

Esta classificação é baseada nos Limites de Atteberg (LL e LP) e granulometria do solo.

O método Transportation Research Board (TRB) também leva em consideração os limites de Atteberg e granulometria do solo (VILLIBOR et al., 2007) e classifica os solos em fragmentos de pedra, pedregulhos finos ou areias; pedregulhos ou areias siltosa ou argilosas; solos siltosos e solos argilosos.

O Miniatura Compacto Tropical (MCT) foi desenvolvido especialmente para solos de regiões tropicais pois as duas metodologias citadas anteriormente foram desenvolvidas para solo de clima temperado. A metodologia tem ensaios específicos para obter resultados e por fim classificar o solo em questão (VILLIBOR et al., 2007).

### **2.6.3 O solo e a Engenharia Civil**

Como já foi mencionado antes, o conhecimento do solo é de extrema importância para a execução de qualquer construção civil. É ele que vai sustentar o peso da construção, seja ela qual for e a falta de estudos preliminares para obter suas características e comportamento pode levar a enormes catástrofes.

Solos arenosos representam grande instabilidade estrutural por conta de sua suscetibilidade à erosão e baixo índice de erosão se movendo muito facilmente (Campos, 2006).



O solo argiloso, um dos mais comuns no Brasil, é um dos favoritos em certos tipos de construções como barragens e taludes. (Campos, 2006).

O solo siltoso com sua baixa capacidade de coesão e plasticidade, além de grande facilidade de sofrer erosão é um dos mais evitados. (Campos, 2006).

Cada tipo de solo pede um tipo de projeto com materiais e técnicas que mais se adequam a situação do mesmo. Estas técnicas e especificações irão depender de inúmeros fatores como econômicos, disponibilização de materiais, logísticos, climáticos, dentre outros.

Dentre as técnicas de melhoramento, tem-se a técnica de estabilização dos solos, tema deste estudo e falado mais profundamente a seguir.

## 2.7 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Estabilização do solo é uma técnica de melhoramento do solo que consiste em melhorar as características de uma massa de solo fazendo modificações em sua própria estrutura (PALMEIRA, 1990).

Esta técnica pode ocorrer de várias formas sendo classificado em estabilização mecânica, física e química. A escolha de qual tipo será usado vai depender de alguns fatores como econômico, disponibilidade de material e logística, além de que pode ser a feita a combinação das técnicas ao mesmo tempo.

### 2.7.1 Estabilização Mecânica

Nesta técnica não se utiliza nenhum tipo de adição de material. Por meio da compactação tenta-se aumentar sua densidade para conseqüentemente melhorar sua resistência mecânica e durabilidade. Sendo assim, por meio da energia proveniente da compactação o volume de vazios diminui, prejudicando a percolação da água e erosão provocada por ela (SANTOS, 2012).

A compactação ocorre utilizando máquinas como rolos vibratórios que podem ser lisos, do tipo pé de carneiro ou pneumáticos, de placa, de percussão (sapo ou pula-pula), tracionados ou auto-propelidos, motorizados a eletricidade ou combustão interna. O tipo de máquina utilizada vai depender do tipo de solo em questão (UNIPAC, 2009).

Este tipo de estabilização geralmente é utilizado como complementação à outra estabilização.

### 2.7.2 Estabilização Química

Nesta técnica de melhoramento, se adiciona compostos químicos que mudam a estrutura química conferindo mais resistência e compressibilidade, e menor permeabilidade da água. Os estabilizantes mais utilizados são cimento, cal, betume, pozolona, produtos industrializados ou até mesmo resíduos químicos (MAKUSA, 2013).

Para cada tipo de material, há uma norma regente com as propriedades e parâmetros mínimos que devem ser atingidos.

### 2.7.3 Estabilização Granulométrica

Nesta técnica, há a combinação ou junção de outro tipo de solo ou agregado ao solo virgem. Esta combinação deverá fazer com que o solo fique homogêneo e bem graduado para posterior compactação (MAKUSA, 2013).

Se a intenção for utilizar o material como base, a mistura deverá ter sua composição granulométrica encaixada em uma das faixas propostas pelo DNIT, como rege na norma DNIT 141/2010 – ES, além de outros parâmetros propostos.

Da mesma forma se for utilizado como sub-base, se utilizará a norma DNIT 139/2010 – ES, para comparação dos parâmetros propostos.

## 2.8 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE

A norma regente para base estabilizada granulometricamente é a norma DNIT 141/2010 – ES - Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente.

De acordo com a mesma, o material deve apresentar granulometria de acordo com as faixas que são sugeridas abaixo:

Quadro 3: faixas de granulometria propostas pelo DNIT

Peneiras	Para $N > 5 * 10^{\square}$				Para $N < 5 * 10^{\square}$		Tolerância da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	$\pm 7$
1"	-	75-90	100	100	100	100	$\pm 7$
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	$\pm 7$
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	$\pm 5$
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	$\pm 5$
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	$\pm 2$
Nº200	2-8	5-15	5-15	out/25	6-20	6-20	$\pm 2$

Fonte: Adaptado de DNIT 141/2010.

Além dos seguintes parâmetros:

- Índice Suporte Califórnia –  $ISC \geq 60\%$  para Número  $N \leq 5 \times 10^6$ ,  $ISC \geq 80\%$  para Número  $N > 5 \times 10^6$ , e Expansão  $\leq 0,5\%$ ;
- Ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), não deve apresentar desgaste superior a  $55\%$ ;
- A fração que passa na peneira n° 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a  $25\%$ , e índice de plasticidade inferior ou igual a  $6\%$ ; quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que  $30\%$ ;
- A porcentagem do material que passa na peneira n° 200 não deve ultrapassar  $2/3$  da porcentagem que passa na peneira n° 40.

No caso da sub-base, regida pela NORMA DNIT 139/2010 – ES -Pavimentação – Sub-Base Estabilizada Granulometricamente, os parâmetros são os seguintes:

- Índice de Grupo - IG igual a zero;
- A fração retida na peneira n° 10 no ensaio de granulometria deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais.
- Índice de Suporte Califórnia –  $ISC \geq 20\%$  e Expansão  $\leq 1\%$ ;
- No caso de solos lateríticos, os materiais submetidos aos ensaios acima podem apresentar Índice de Grupo diferente de zero e expansão  $> 1,0\%$ , desde que no ensaio de expansibilidade (DNER-ME 029/94) apresente um valor inferior a  $10\%$ .

## 2.9 BASE E SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM CIMENTO

O cimento é um dos materiais mais utilizados na estabilização química (SARTORI, 2015). Seu uso apresenta, principalmente, uma modificação da fração argilosa do solo que faz com que perca a sua plasticidade podendo aumentar sua resistência (PEREIRA, 1970).

De acordo com a norma DER/PR ES-P 11/05 – Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento, a resistência à compressão simples da mistura, aos sete dias, deve atender aos seguintes limites:

- sub-base: 1,2 a 2,1 MPa.
- base: 1,5 a 2, 1 MPa.

Para a sub-base foi utilizada a norma DNIT 140/2010 – ES pavimentação – sub-base de solo melhorado com cimento. De acordo com a norma, os teores usuais de cimento situam-se na faixa de 2 a  $4\%$ , em peso, em relação ao total da mistura.

Dentre as especificações da mesma, tem-se:

- Cimento Portland: Deve obedecer às exigências da Norma DNER-EM 036/95, juntamente com as da Norma NBR 5732:1991 ou NBR 5735:1991;

- Água: Deve ser isenta de teores nocivos, como sais, ácidos, álcalis ou matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais;

-Solo: Os solos empregados na execução de sub-base de solo melhorado com cimento devem ser os provenientes de ocorrências de materiais. Devem apresentar as seguintes características, quando submetidos aos ensaios:

a) Porcentagem passando na peneira n° 200, máximo de 50%

b) Índice de plasticidade, máximo de 18%

c) Limite de liquidez, máximo de 40%

- Mistura projetada de solo-cimento e água : Deve ser deixada solta para curar, por um período mínimo de 72 horas. Após o qual, deve satisfazer às seguintes características:

a) Índice de Grupo IG = 0, quando submetida aos ensaios de caracterização da alínea “c” da subseção 5.1;

b) Índice de Suporte Califórnia ISC 30% e expansão máxima de 1% pelo método DNER ME 049/94, obtidos de acordo com a energia de compactação da norma DNER-ME 129/94 (Método B);

c) O ensaio do Índice de Suporte Califórnia deve ser realizado até a penetração de 12,7mm (0,5 polegada), de modo a ser possível o traçado, com precisão, da curva pressão - penetração. Na impossibilidade de atingir a penetração, o corpo-de-prova deve ser destorroadado, recomeçando o processo mediante a moldagem de novos corpos-de-prova.

Para a estabilização da base com o cimento, utiliza-se a revisão da norma DNER – ES 304/97 - Pavimentos Flexíveis – Base De Solo Melhorado Com Cimento.

A norma também pede teores de cimento ente 2% e 4%. E as especificações da água e cimento são iguais a da norma de sub-base (norma DNIT 140/2010). Em relação ao solo tem-se algumas diferenças, a seguir:

Solo: Os solos empregados na execução de base de solo melhorado com cimento serão os provenientes de ocorrências de materiais, devendo apresentar as seguintes características, quando submetidos aos ensaios das normas DNER-ME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94:

a) Composição granulométrica enquadrada em uma das faixas propostas

b) A fração que passa na peneira n° 40 deverá apresentar limite de liquidez igual ou inferior a 40% e índice de plasticidade igual ou inferior a 18%;

### 3 Metodologia

A metodologia do presente trabalho iniciou-se com pesquisas bibliográficas sobre o referido tema para assim definir-se os métodos de pesquisa e ensaios.

Os ensaios primeiramente foram realizados nos materiais virgens separadamente para obter-se a caracterização de cada um deles. Obtido os resultados, foi definido as misturas dos materiais e suas devidas porcentagens em cada uma delas. Primeiramente foram arbitrado os percentuais dos materiais para posteriormente verificar se encaixavam-se nas faixas granulométricas propostas pela NORMA DNIT 141/2010 – ES.

Definido as misturas, foram feitos os devidos ensaios nas mesmas para obtenção de resultados posteriormente utilizados para comparação.

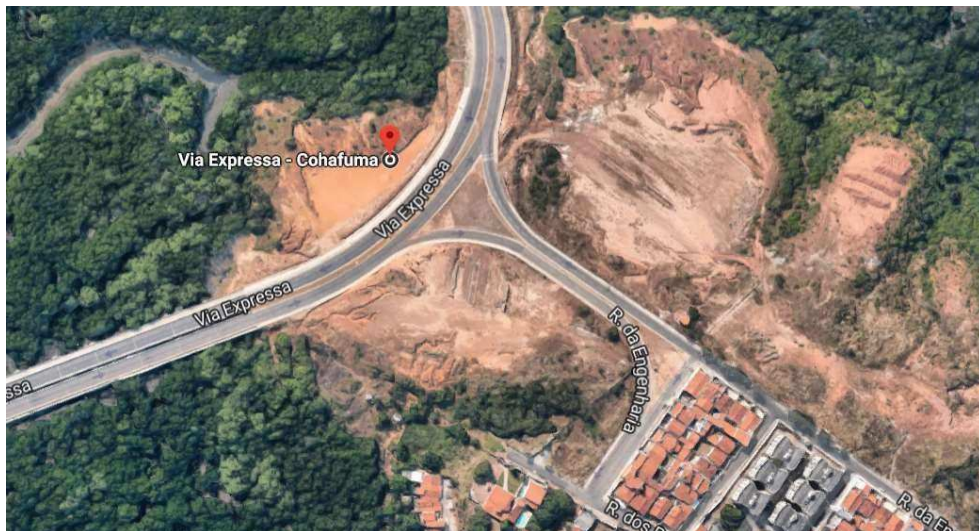
Os materiais e ensaios laboratoriais feitos serão apresentados a seguir.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Solo

O solo utilizado foi coletado na MA – 207, conhecida como Via Expressa, na entrada do bairro COHAFUMA, na cidade de São Luís, Maranhão (figura 12).

Figura 12: Local de retirada do solo



Fonte: Google Maps (2019).

O material (figura 13) foi retirado com o auxílio de pás, picaretas, carro de mão e enxada.

A figura 14 mostra o momento de extração do solo.

Figura 13: Solo utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2019).

Figura 14: Extração do solo



Fonte: Autor (2019).

O material foi armazenado em sacos e baldes em um depósito na Universidade Estadual do Maranhão, ao lado dos laboratórios da mesma. Quando iria se fazer utilização do mesmo, espalhava-se uma considerável quantidade no chão próximo ao laboratório de solos para que pudesse secar ao ar livre.



### 3.1.2 RAP

Foi utilizado o RAP (figura 15) armazenado no laboratório da Universidade Estadual do Maranhão que já tinha sido utilizado em trabalhos anteriores. O mesmo foi coletado na Avenida José Sarney, nas proximidades dos bairros Tirirical, Retiro Natal e Jardim São Cristóvão na cidade de São Luís, Maranhão (figura 16). Por meio de informações das pessoas que acompanharam o momento de corte ou desbaste do material, é sabido que a pista era bastante irregular por conta do grande número de remendos e por isso, o RAP varia bastante, o que é visivelmente perceptível, pois em algumas partes do material percebe-se claramente a presença dos agregados, enquanto outras são bastante frágeis e de aspecto borrachudo. Pela aparência do material conclui-se que ocorreu uma fresagem do tipo rasa.

Figura 15: Material fresado utilizado



Fonte: Autor (2019).

Figura 16: Local de retirada do RAP



Fonte: Matos (2018).

### 3.1.3 Cimento

O cimento utilizado foi o CP IV-32 – Cimento Portland pozolânico (figura 17), cedido pelo laboratório de Concreto da Instituição. De acordo com a NBR 5736 – Cimento Portland Pozolônico, define-se como um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado.

Figura 17: Cimento utilizado



Fonte: Autor (2019).



### 3.1.4 Misturas

Objetivando fazer análise e comparação das características do solo junto ao Rap e cimento, foram realizados testes em diferentes misturas dos mesmos. Foi adotado teores entre 2% e 4% como pede a norma DNIT 140/2010 - ES. O teor de Rap, inicialmente foi arbitrado e depois conferido se a mistura do mesmo com o solo, se enquadrava nas faixas propostas pelo DNIT, na Norma DNIT 141/2010 – ES.

No quadro abaixo, apresenta-se as misturas com os seus respectivos teores de materiais.

Quadro 4: Misturas utilizadas na pesquisa

Mistura	Teor de solo (%)	Teor de RAP (%)	Teor de cimento (%)
M1	77	20	3
M2	57	40	3
M3	42	55	3
M4	97	0	3
M5	43	55	2
M6	33	65	2
M7	31	65	4
M8	32	65	3
M9	22	75	3
M10	12	85	3

Fonte: Autor (2019).

## 3.2 ENSAIOS REALIZADOS

Primeiramente foram feitos ensaios com os materiais virgens objetivando a caracterização e classificação dos mesmos, e posteriormente realizaram-se ensaios com as misturas para a análise de resultados.

### 3.2.1 Ensaios para a classificação do solo pelo método TRB / HRB

Esta classificação é inspirada pela AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials – pois também tem origem na classificação do Public Roads Administration (Almeida, 2005). Fundamenta-se pelos resultados dos ensaios de granulometria, índice de plasticidade e limite de liquidez.

Pelo quadro de classificação, apresentado abaixo, faz-se a classificação por um processo de eliminação da esquerda para direita. O grupo que o solo pertence será o que primeiro se encaixar nos parâmetros do mesmo.

Tabela 1: Tabela de classificação método TRB

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

Fonte: DNIT (2006)

O índice de grupo é calculado pela fórmula :

(I)

$$IG = 0,2 * a + 0,005a * c + 0,01b * d$$

Onde :

- P = % do material que passa na peneira de número 200
- a = p – 35. Se p > 75, a = 40; e se p < 35, a = 0;
- b = p – 15. Se p > 55, b = 55 e se p < 15, b = 0;
- c = LL – 40. Se LL > 60, c = 20 e se LL < 40, c = 0;
- d = IP – 15. Se IP > 30, d = 20 e se IP < 10, d = 0.

### 3.2.1.1 Ensaio de Granulometria

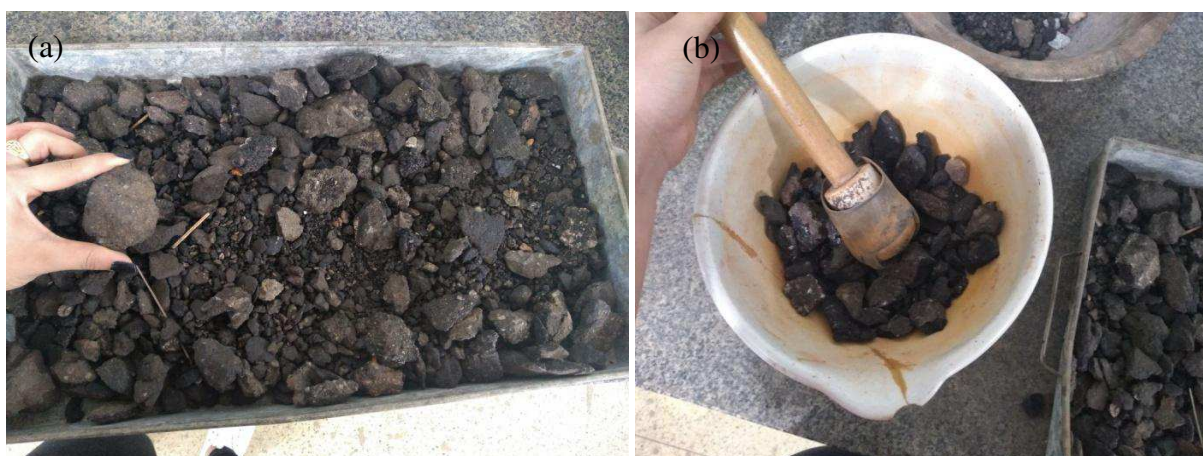
Este ensaio é um importante aliado na classificação do solo e demais agregados. De acordo com Braja (2014): segundo as dimensões das suas partículas e dentro de determinados limites convencionais, as "frações constituintes" dos solos recebem designações próprias que se identificam com as acepções usuais dos termos. Ou seja, com as frações de um material definidas, tem-se noção da sua composição sendo mais fácil obter uma classificação do mesmo. Este ensaio é o ensaio básico e geralmente é o inicial de todo agregado.

De acordo com a sua dimensão, os agregados podem ser considerados grãos (materiais com dimensões maiores que 2,0mm ou retidos na peneira nº10), miúdos (dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm, ou seja, passantes na peneira nº10 e retidos na nº200) e material de enchimento (material em que cerca de 65% de seu todo passa na peneira de nº200) (BERNUCCI, 2006).

Para obter a composição granulométrica do solo, utilizou-se a NORMA DNER – ME 051/94 - Solos – análise granulométrica, que divide o ensaio em peneiramento e sedimentação

No caso do RAP, como não se tem norma específica para sua granulometria, foi utilizada a norma NBR 7217- Agregados - Determinação da composição granulométrica. Antes de começar o procedimento do peneiramento, o agregado foi destorroado até chegar a dimensão desejada (figura 18).

Figura 18: (a) Agregado antes de ser destorroado e (b) material sendo destorroado



Fonte: Autor (2019).

O peneiramento basicamente consistiu em tomar a amostra mínima de cada agregado, especificado na NORMA DNER – ME 083/98, e jogá-lo no jogo de peneiras disponíveis do laboratório agitando-as para que a massa do material fosse bem distribuída. O jogo é composto pelas peneiras de abertura: 50 – 38 – 25 – 19 – 9,5 – 4,8 – 2,0 – 1,2 – 0,6 – 0,42 – 0,30 – 0,15 – 0,075mm, inclusive tampa e fundo (figura 19).

Figura 19: Jogo de peneiras para realizar o ensaio de granulometria



Fonte: Autor (2019).

Para a sedimentação, utiliza-se uma amostra de 120 gramas para solos arenosos ou 70 gramas para solos argilosos. A amostra é misturada com 125 ml de solução defloculante, uma solução de hexametáfosfato de sódio com concentração de 47,5g do sal por litro. A mistura é agitada e deixada em repouso por 12 horas.

Após esse período a mistura é levada para o corpo de dispersão removendo com água destilada o material que ficou aderido no béquer. Então vai se adicionando mais água destilada até o nível da mistura ficar a 5 cm da borda do copo e aciona o aparelho de dispersão por tempo determinado de acordo com o índice de plasticidade previamente obtido.

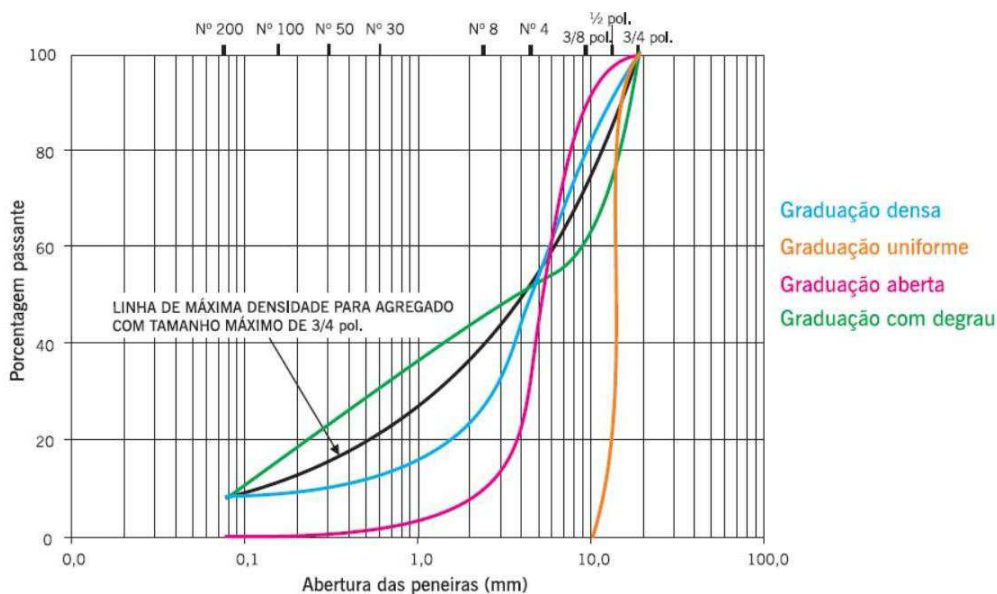
Após isso se leva a mistura para uma proveta juntando água destilada até a marca de 1000 ml. A proveta é agitada por 1 minuto. Após a agitação iniciam-se as

leituras do densímetro e da temperatura para os tempos de 30s – 1min – 2min - 4min – 8min – 15min – 30min – 1hora – 4horas e 25 horas.

Com os dados da granulometria, já se pode montar o gráfico das porcentagens das frações em relação ao tamanho das partículas.

A graduação do material pode ser do tipo densa em que há uma graduação bem distribuída. Graduação do tipo aberta em que os agregados têm basicamente mesma dimensão, e graduação descontínua que há presença de granulometria variada (grande, média e finos), sendo que predominam os agregados graúdos. (BERNUCCI *et al.*, 2006). No gráfico 1, tem-se uma representação disso:

Gráfico 1: Representação dos tipos de graduação



Fonte: Bernucci (2006).

### 3.2.1.2 Ensaios dos Limites de Consistência

Quando o solo apresenta alguma porcentagem de fração fina, a granulometria não é suficiente para caracterizá-lo pois suas propriedades plásticas irão depender do teor de umidade (CAPUTO, 1988).

Sendo assim, os Limites de Consistência, também conhecidos como Limites de Atteberg, irão caracterizar esse comportamento do solo. Neste ensaio, os limites são teores de umidade que irão delimitar a fronteira que o solo irá passar de um estado para o outro. Esses estados são o que chamamos de estado líquido, em que o solo tem tanta umidade a ponto de ser fluido. O estado plástico, em que tem um pouco menos de umidade e pode ser moldado. O estado semi-plástico é o seguinte, em que o solo já perdeu bastante sua umidade e já não se

pode mais moldá-lo e por fim o estado sólido em que o mesmo perdeu já toda sua umidade (Braja, 2014).

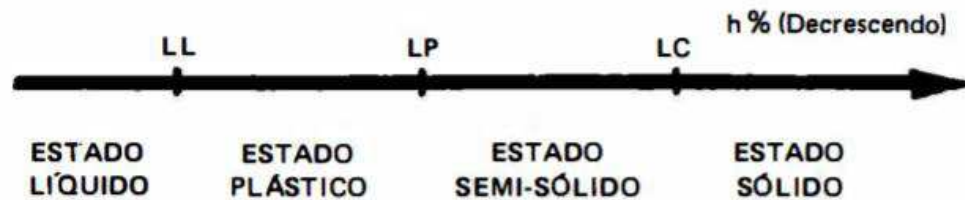
O limite de liquidez será a fronteira que o solo em estado fluido (ou fluido) irá passar a ser plástico (Braja, 2014).

O limite de plasticidade será a fronteira em que o solo em estado plástico irá passar a ser semi-sólido (Braja, 2014).

O limite de consistência será a fronteira em que o solo em estado semi-sólido irá passar a ser sólido (Braja, 2014).

A figura 20 esquematiza os limites.

Figura 20: Limites de consistência



Fonte: Caputo (1988).

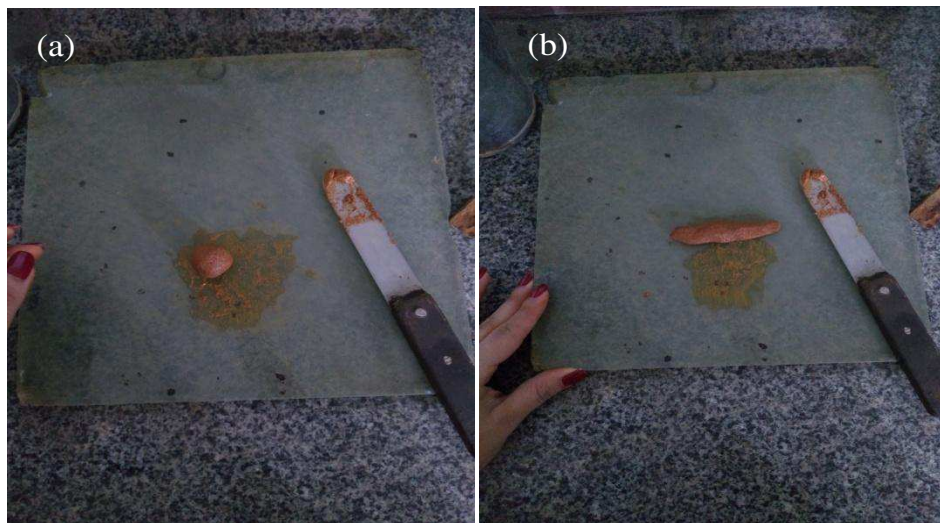
### 3.2.1.2.1 Ensaio de Limite de Plasticidade

De acordo com Caputo (1988), “o limite de plasticidade (LP) é determinado pelo cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar, com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 mm de comprimento.”

O ensaio foi feito com base na NORMA NBR 7180/ ABNT. Sendo assim, o ensaio consiste em basicamente colocar a amostra na cápsula de porcelana e ir acrescentando água destilada na mesma. Acrescenta-se gradualmente e vai-se misturando e amassando o solo com o auxílio de uma espátula até perceber que o solo formou uma pasta homogênea com consistência plástica. Após isso, toma-se uma pequena amostra de mais ou menos 10 gramas e forma uma pequena bola que irá ser rolada na placa de vidro para tentar formar o pequeno cilindro (figura 21).



Figura 21: (a) Tentativa de formar a bola (b) tentativa de formar o cilindro



Fonte: Autor (2019).

Se não for possível e o solo se fragmentar, retorna-se a cápsula de porcelana e aumenta-se o teor de umidade no mesmo. Se o cilindro foi formado, coloca-o numa cápsula para pesá-lo e colocá-lo na estufa para obter a umidade. O procedimento deve ser realizado até conseguir o obter três amostras do cilindro para obter uma média da umidade.

#### 3.2.1.2.2 Ensaio de Limite de Liquidez

O ensaio é normatizado por DNER – ME 122/94 – Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito.

No ensaio, é acrescentado  $15\text{cm}^3$  a  $20\text{cm}^3$  de água destilada no solo, que é amassado e misturado com uma espátula até total homogeneização, se for necessário acrescenta-se posteriormente em torno de de  $1\text{cm}^3$  a  $3\text{cm}^3$  de mais água.

Após umidificação do solo, toma-se uma amostra do mesmo, colocando-a na concha do aparelho Casagrande no local de contato da concha com a base (figura 22). Após isso, espalha-se o material até que ocupe  $2/3$  da superfície, alisando-o com uma espátula até que apresente 1 cm de espessura.

Figura 22: Aparelho de Casagrande



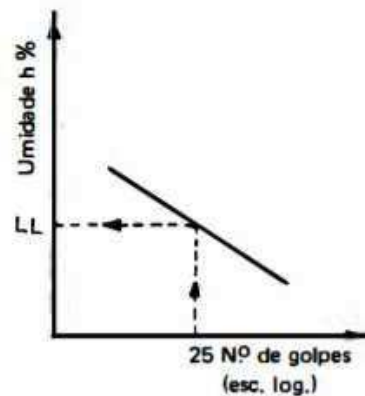
Fonte: Autor (2019).

Após isso, deve-se produzir uma canelura de 1 cm na massa de solo, utilizando o cinzel. Os golpes devem ser feitos com uma velocidade de dois golpes por segundo até que o solo entre a canelura se feche. Quando isso acontecer, toma-se uma quantidade do solo para levá-lo à estufa e obter sua umidade. Repete-se a operação por pelo menos três vezes.

Os valores da umidade serão distribuídos em um gráfico com relação do número de golpes dados. A umidade relacionada ao número de golpe 25, será o limite de liquidez do solo (gráfico 2). Se não for possível conseguir abrir a canelura no solo, considera-se que o mesmo não apresenta limite de liquidez.

Abaixo, observa-se o gráfico do ensaio:

Gráfico 2: Gráfico ensaio limite de liquidez



Fonte: Caputo (1988).



### 3.2.1.2.3 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade é a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade:

(II)

$$IP = LL - LP$$

Caputo (1988), diz que ele define a zona em que o terreno se acha no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e mínimo, ou melhor, nulo para as areias, fornece um critério para se ajuizar do caráter argiloso de um solo; assim, quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo.

### 3.2.2 Ensaio para a classificação MCT do solo

A metodologia MCT é utilizado para classificação de solos tropicais, em vista que estes tem comportamento diferenciado e os métodos tradicionais não se mostram tão satisfatórios (ALMEIDA, 2005).

O sistema de classificação faz ensaios utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas. A norma regente do ensaio padrão é a NORMA DNER – ME 228/94 – Solos – compactação em equipamento miniatura.

Visando especificamente a classificação MCT, é necessário a realização de dois ensaios para se obter os dados necessários: o ensaio de Compactação Mini-MCV e o ensaio de Perda de Massa por Imersão que serão apresentados detalhadamente posteriormente.

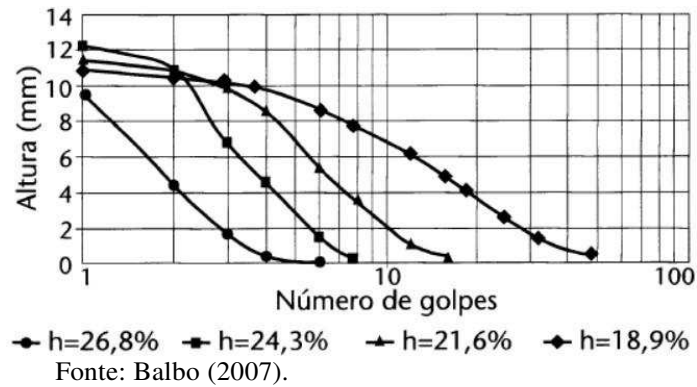
Estes ensaios não foram realizado neste estudo. Os dados e resultados utilizados são da pesquisa de Soares (2018), que teve o mesmo solo como objeto de pesquisa.

#### 3.2.1.1 Ensaio de Compactação Mini-MCV

Este ensaio é fundamentado no mesmo processo da compactação Proctor, mas com dimensões reduzidas e energias crescentes. O ensaio vai verificar a altura do corpo de prova com relação ao número crescente de golpes, relacionando o peso específico do solo em função de um logaritmo próprio para o número de golpes (BALBO, 2007). A variação no teor de umidade com aplicação de números de golpes crescentes irão produzir um aumento na massa específica seca do material (VILLIBOR et al., 2009).

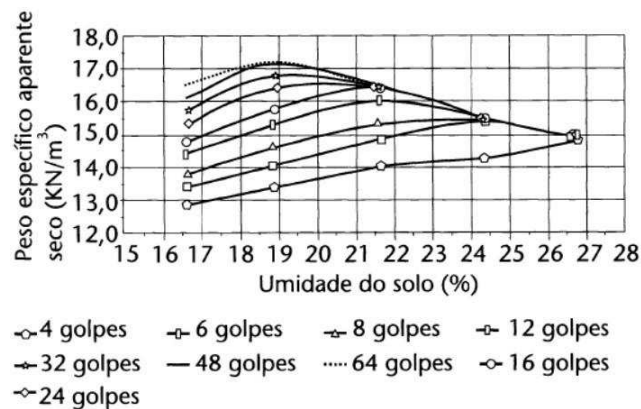
O gráfico 3 representa a relação entre as variantes.

Gráfico 3 : Curvas resultantes do ensaio de Mini- MCV



A partir dos valores encontrados acima é montado a curva de compactação que igualmente ao ensaio de compactação Proctor, irá relacionar a massa específica aparente do solo seco com a umidade do solo. O gráfico 4 demonstra isso.

Gráfico 4: Curvas de compactação Mini-MCV



A metodologia do ensaio deve seguir as recomendações da norma DNER – ME 258/94, que inicialmente é separada, destorroada e preparada uma amostra em torno de 2500 gramas de solo. Essa amostra é dividida igualmente em 5 porções de 500 gramas previamente peneiradas na peneira de abertura de 2mm. Após isso, cada porção é umidificada com teores crescentes de água, armazenadas em sacos plásticos e acomodadas em câmara úmida por 24 horas para a realização da compactação.

Para a compactação, utiliza-se os mini-cilindros próprios do ensaio (figura 23).

Figura 23: (a) Cilindro do ensaio MCT (b) compactador



Fonte: Autor (2019).

Em cada um deles é previamente pasado vaselina. Posteriormente, 200 gramas de solo de menor umidade são pesadas e despejadas no molde. O molde é devidamente acomodado no aparelho de compactação e prossegue-se o ensaio com os golpes sucessivos e a leitura do extensômetro para os golpes: 2 – 3 – 4 – 6 – 12 – 16 – 24 – 32 – 48 – 64 – 96 – 128 – 192 – 256.

O processo é repetido para todas as amostras restantes.

### 3.2.1.2 Perda de massa por imersão

Este ensaio é realizado seguindo a norma DNER – ME 256/94 – Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão.

O corpo de prova feito no ensaio de compactação Mini- MCV é submerso em água, com o prévio deslocamento de 10mm do solo compactado do molde. O molde é acomodado em posição horizontal juntamente com cápsulas alinhadas para

que o solo desprendido fique retido nelas. Os corpos de prova são deixados assim por 20 horas. Em seguida, os mesmos e as cápsulas são retiradas delicadamente. As cápsulas são acomodadas na estufa para a determinação da massa perdida. A perda de massa é encontrada através da equação:

(III)

$$Pi = \frac{Md * 100}{Mo}$$

Em que:

Pi = Perda de massa por imersão (%)

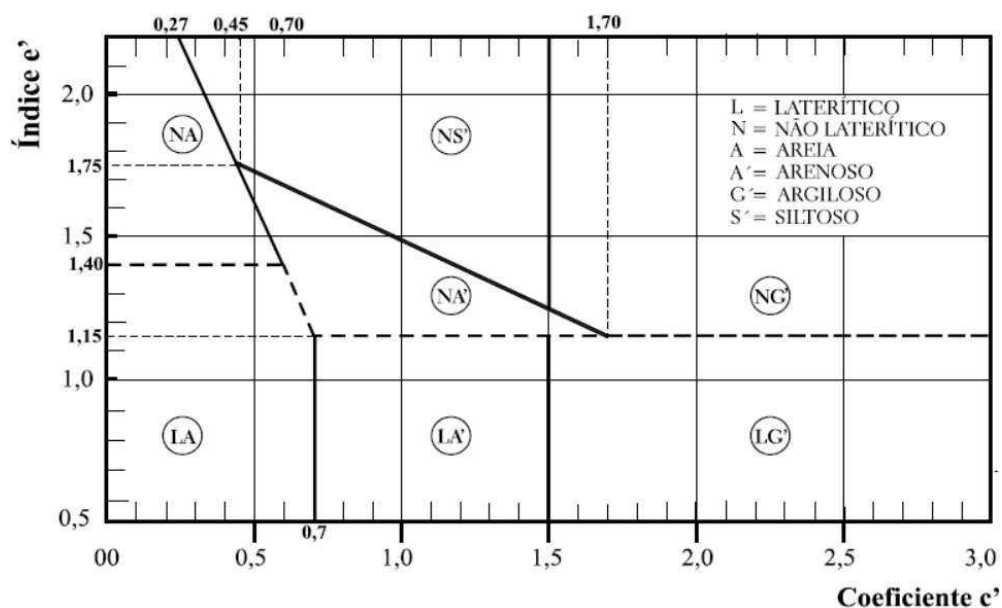
Md = Massa de solo seco desprendido (gramas)

Mo = Massa de solo correspondente a 10 mm do molde depois de compactado (gramas).

### 3.2.1.3 Classificação MCT

Com os resultados obtidos nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, já pode se fazer a classificação. Para a classificação utiliza-se o gráfico 5.

Gráfico 5: Determinação do solo método MCT



Fonte: Villibor e Nogami (2009).

Para encontrar o índice  $e'$ , utiliza-se a fórmula a seguir:

(IV)

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Onde:

$e'$  = Índice de laterização;

$P_i$  = Perda de massa por imersão (%);

$d'$  = Coeficiente angular da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV que corresponde a 12 golpes.

O valor de  $c'$  é o valor da inclinação da inclinação da parte mais retilínea e íngreme da curva de mini-MCV.

Com os valores de  $e'$  e  $c'$  já se pode utilizar o gráfico para obtenção do tipo de solo. Abaixo uma tabela com a descrição dos solos e suas aplicações principais.

Quadro 5 : Tipos de solo MCT e suas usuais aplicações

Tipo MCT	Denominação	Empregos em camadas de pavimentos
NA'	Solos arenosos não lateríticos	Subleitos quando não substituíveis (raramente como base e sub-base)
NS'	Solos siltosos não lateríticos	Subleitos quando não substituíveis, embora recomendável
NG'	Argilas não lateríticas	Subleitos quando não substituíveis
LA	Areia finas	Subleitos e reforços de subleitos (eventualmente como base e sub-base)
LA'	Solos arenosos finos	Subleitos, reforços, sub-base e bases
LG'	Argilas lateríticas	Subleitos e reforços de subleitos

Fonte : adaptado de Balbo (2007.)

### 3.2.3 Equivalente de areia

Este ensaio foi feito utilizando a DNER-ME 054-97 – Equivalente de areia. Para este ensaio, reservou-se uma amostra do material passante na peneira de

4,8mm. A amostra foi colocada em uma cápsula padrão para ter uma medida correta e então colocada na proveta própria do ensaio com o auxílio de um funil. Previamente uma solução de cálcio-glicerina-formaldeído (figura 24) tinha sido acrescentada na proveta até uma medida de 10cm já marcada na mesma. A solução fica armazenada em um galão e para conseguir acrescentar a solução ao solo precisa-se deixar o galão a mais ou menos 90° acima da superfície de trabalho (figura 25).

Figura 24: Solução equivalente de areia



Fonte: Autor (2019).

Esperou-se 20 minutos e a proveta foi vedada com uma rolha. Após isso a mistura foi agitada com um movimento horizontal de vai e vem com velocidade de 90 ciclos em 30 segundos e deslocamento de 20 cm.

Figura 25: (a) Solução até a marca de 10 cm da proveta e (b) solução + solo



Fonte: Autor (2019).

Após a agitação, as paredes da proveta foram “lavadas” com a solução que foi acrescentada até a marca superior da proveta. Esperou-se mais 20 minutos e mediu-se a altura da suspensão argilosa com o auxílio de uma régua. Posteriormente introduziu-se o pistão até o mesmo assentar sobre a areia (figura 26). Novamente com o auxílio da régua mediu-se a altura da areia.

Figura 26: Pistão introduzido na proveta



Fonte: Autor (2019).

A fórmula para encontrar o equivalente de areia é:

(V)

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da argila}}{\text{Leitura no topo da areia}} \times 100$$

### 3.2.4 Ensaio Índice de Forma

Este ensaio foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 7809:2006 Versão corrigida 2008 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Este ensaio foi feito no RAP.

O ensaio se seguiu da seguinte forma: foi-se coletado uma amostra do material de acordo com NBR NM 26 e NBR NM 27 que foi posteriormente quarteado. A quantidade da amostra variou conforme a dimensão máxima do agregado, que a norma sugere de acordo com o quadro 6.

Quadro 6: Quantidade de amostra do agregado em relação sua dimensão máxima

Dimensão máxima característica (mm)	Quantidade mínima da amostra (kg)
$D_{\text{máx}} \leq 19$	5
$19 < D_{\text{máx}} \leq 25$	10
$25 < D_{\text{máx}} \leq 37,5$	15
$D_{\text{máx}} > 37,5$	20

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7809:2006- versão corrigida 2008.

Em seguida o material foi colocado na estufa até a constância de peso e foi feito um peneiramento. Foram desprezadas quantidades passantes na peneira de abertura 9,5mm. O material retido nas peneiras acima da 9,5mm foram reservados. O cálculo do número de grãos foi feito pela fórmula:

$$Ni = \frac{200}{\sum_{i=1}^n Fi} \times Fi \quad (VI)$$

Onde:

-200 é o número de grãos necessários;

-Fi=porcentagem de massa retida na fração i;

-Ni=quantidade de grãos da fração i necessária.



Figura 27: Quantidade de grãos calculada de cada fração



Fonte: Autor (2019).

Com a quantidade de grãos de cada fração definida (figura 27), separou-se os mesmos para começar a aferir as medidas (figura 28). As medidas foram feitas com o auxílio de um paquímetro digital e em cada grão era feita a medição de 3 medidas : comprimento, largura e espessura. A altura é chamada de “a” e é a maior medida, seguida de “b” que é a largura e “c” que é a espessura.

Figura 28: Medição do agregado



Fonte: Autor (2019).

Para cada grão deverão ser calculadas as relações  $b/a$  e  $c/b$  que servirão para classificar o grão.

A classificação dos grãos é feita de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 2: Classificação do agregado do ensaio índice de forma

Média das Relações $b/a$ e $c/b$	Classificação da Forma
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

Fonte: Bernucci (2006).

### 3.2.5 Abrasão Los Angeles

De acordo com Bernucci (2007, p.133), “durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego.”

Eles devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração.

Este ensaio é regido pela norma DNER – ME 035-98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.

Inicialmente, uma amostra do agregado foi lavada e levada a estufa. Após a secagem deve-se peneirar o material e o mesmo deverá atender uma das seis faixas propostas pela norma. Após a separação, somou-se as massas parciais de cada peneira para obter a massa total.

Posteriormente colocou-se o material e a carga abrasiva no Equipamento de Los Angeles (figura 29), ligando-o. O equipamento deve girar com uma velocidade de 30 a 33rpm até completar 500 revoluções para graduação A, B, C e D ou 1000 revoluções para graduações E, F e G.

Figura 29: Equipamento de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor (2019).

Posterior a isso, retirou-se o material do tambor que foi peneirado na peneira de abertura de 1,7mm, excluindo o material passante.

A fórmula para encontrar o resultado é:

(VII)

$$An = \frac{Mn - M'n}{Mn}$$

Onde :

-An= Abrasão los Angeles

-Mn= Massa total da amostra seca

-M'n= Massa da amostra lavada e seca, retida na peneira de abertura 1,7mm após o ensaio.

### 3.2.6 Densidade e Absorção

Para encontrar a densidade do solo, foi utilizada a norma DNER – ME 194/98 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

O ensaio consistiu em pesar 500 gramas do solo previamente seco em estufa e posteriormente acrescentá-lo ao frasco de Chapman com o auxílio de um funil. O frasco já tinha sido preenchido com água destilada até a marca de 200cm<sup>3</sup>. Posterior a isso, o frasco foi agitado para a eliminação de bolhas. Verificou-se a leitura. A figura 30 mostra o frasco já com areia e água destilada, pronto para se fazer a leitura.

Figura 30: Frasco de Chapman com areia e água destilada



Fonte: Autor (2019).

A densidade é obtida pela seguinte fórmula:

(VIII)

$$d = \frac{500}{L_f - 200}$$

A densidade e absorção do agregado graúdo, no caso do RAP foi feita com base na DNER - ME 081/98 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo, já que não há norma específica para o RAP.



No ensaio, a amostra foi lavada na peneira de abertura 4,8mm e seca na estufa até constância de massa. Após seu resfriamento sequencialmente imergeu-se o material em água por um período de 24 horas. Após esse tempo removeu-se o material da água que foi espalhado em um pano seco para retirar o excesso de água (figura 31). Posteriormente pesou-se o material.

Figura 31 : (a) Material submerso e (b) material no pano seco para ser absorvido o excesso de água



Fonte: Autor (2019).

Após isso, colocou-se o material novamente em água para realizar o ensaio de densidade. Acoplou-se a haste do recipiente no prato da balança e fez-se a leitura (figura 32). A balança já tinha sido previamente zerada com o recipiente com água.

Figura 32: Realizando o ensaio de densidade do RAP



Fonte: Autor (2019).

O material foi novamente retirado da água e posto na estufa para a realização da pesagem dele seco.

A fórmula para encontrar a densidade é:

$$Dap = \frac{Ms}{Mh-L} \quad (IX)$$

Onde :

- Dap = Densidade aparente do material;
- Ms = Massa do agregado seco em estufa;
- Mh = Massa do agregado na condição saturada superfície seca;
- L = Leitura na balança correspondente ao agregado submerse.

A fórmula da absorção é:

$$a = \frac{Mh-Ms}{Ms} \quad (X)$$

Onde:

- A = Absorção em %;
- Mh = Massa do material úmido;
- Ms = Massa do material seco.

### 3.2.7 Teor de Ligante Ásfaltico

O objetivo deste ensaio é encontrar a quantidade de betume em relação a massa total da mistura asfáltica. O ensaio foi realizado utilizando a norma DNER – ME 053/94 – Misturas betuminosas – porcentagem de betume.

Primeiramente, colocou-se uma amostra do material na estufa por mais ou menos uma hora. Após isso, pesou-se 1000 gramas da amostra que posteriormente foi amassada para retirar o máximo de grumos que pudesse.

Após isso, a mistura asfáltica foi colocada no interior do aparelho próprio do ensaio, o Rotarex (figura 33), junto com certa quantidade de gasolina.

Figura 33: Rotarex



Fonte: Autor (2019).

O equipamento foi devidamente bem lacrado com o filtro próprio e suas duas tampas e esperou-se um tempo de 15 segundos (figura 34). Passado este tempo ligou-se a máquina (que atinge uma velocidade de até 3600rpm) que descarregou a gasolina com parte do solvente dissolvido em um balde.

Figura 34: Manuseamento da máquina



Fonte: Autor (2019).

O procedimento de acrescentar a gasolina no aparelho foi repetido até se perceber que a gasolina que saía vinha em um cor parecida com a sua cor real e não mais tão escura. A gasolina “suja” era armazenada em um balde que ficava ao lado do rotarex. Quando o mesmo ficava cheio, a gasolina era descartada e o procedimento recommençado. A figura 35 mostra a cor e aparência do material após o ensaio.

Figura 35: Aparência do RAP após o ensaio



Fonte: Autor (2019).

O papel filtro utilizado no ensaio juntamente com o prato em que o material estão acomodados devem ser levados a estufa e depois pesados.

A porcentagem de betume é dada pela fórmula:

(XI)

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \times 100$$



### 3.2.8 Ensaio de compactação Proctor

Este ensaio pode ser regido pelas normas DNER – ME – 129/94 – Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas e pela DNER – ME – 162/94 – Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

Neste trabalho, o ensaio foi baseado na norma DNER – ME – 129/94 – Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas.

O procedimento consistiu em, primeiramente, separar 5 porções de 7kg cada, de uma amostra de solo previamente destorroada, seca e passante na peneira de abertura de 4,8mm.

Os cilindros e o disco espaçador utilizados (figura 36) no ensaio tiveram suas alturas e diâmetros medidos, sendo que cada medida era feita três vezes para obter uma média. Foram também separadas 5 cápsulas, que posteriormente foram numeradas e pesadas.

Figura 36: Cilindro e soquete utilizados no ensaio



Fonte: Autor (2019).

Após isso, cilindro foi fixado em uma base metálica própria no chão e o disco espaçador foi acomodado dentro do mesmo. O solo foi umidificado com quantidade arbitrada em mais ou menos de 5 % de água e bem misturado para que ficasse homogêneo.

A amostra já homogênea foi compactada em 5 camadas utilizando 55 golpes por camada. O número de golpes é determinado pela energia que se utilizará no ensaio, que pode ser normal, intermediária e modificada. No caso desta pesquisa, escolheu-se utilizar a energia modificada, que pede 55 golpes. A figura 37 mostra mistura na bandeja prestes a receber umidificação.

Figura 37: Mistura M4 pronta para receber umidificação



Fonte: Autor (2019).

Após total compactação, o cilindro é desacoplado do molde e é feito um arrasamento no molde, retirando o excesso de solo até a altura do cilindro. Na

compactação da camada 3, é retirado uma pequena quantidade do solo com a cápsula pesada anteriormente para determinação exata da umidade.

Após isso foi feita a pesagem do conjunto cilindro + solo.

O procedimento é realizado com as amostras restante, sendo que a cada amostra se acrescenta um valor de 2% de umidade em relação a umidade anterior.

Este ensaio foi feito não só com o solo (com o objetivo de obter massa específica aparente e umidade ótima), mas também com as misturas de solo+cimento+RAP (com o objetivo de obter a umidade ótima para moldar os corpos de prova do ensaio de Resistência a Compressão).

A fórmula para achar a massa específica aparente é:

$$y_s = y_h \frac{100}{100+h} \quad (\text{XII})$$

$$y_h = \frac{P'h}{V} \quad (\text{XIII})$$

Onde:

$Y_s$  = Massa específica aparente do solo seco, em g/cm<sup>3</sup>;

$Y_h$  = Massa específica aparente do solo úmido, em g/cm<sup>3</sup>;

$P'h$  = Peso do solo úmido compactado, em gramas;

$V$  = Volume do solo compactado, em %

$H$  = Teor de umidade so solo compactado, em %.

Com esses dados em mão, já pode se montar o gráfico de compactação que irá relacionar a umidade com a massa específica aparente seca.

### 3.2.9 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O ensaio foi gerado na década de 20 com o objetivo de detectar os problemas de ruptura do subleito nas estradas do estado da Califórnia. O ensaio avalia a resistência do material em relação aos deslocamentos expressivos. (BERNUCCI et al, 2010). O ensaio foi realizado com base na norma DNER-ME 049/94.

Para este ensaio pode se utilizar os corpos de prova provenientes do ensaio de compactação. Os corpos de provas são virados de cabeça para baixo sem o disco espaçador e no espaço proveniente são acoplados pratos-base e pesos anelares com um peso de 4,536 kg. Um extensômetro é acoplado numa base e fixado no corpo de prova. Posteriormente o mesmo foi colocado no tanque com água por 4 dias (figura 38).

Figura 38: Equipamento posto em água



Fonte: Autor (2019).

Após esse tempo, retirou-se o cilindro da água e fez-se a leitura no extensômetro. O cilindro foi colocado no aparelho para o ensaio de penetração.

A máquina funciona com uma velocidade padrão de penetração de 1,27mm/min. Foram anotadas as leituras fornecidas pela máquina e o procedimento repetido para os outros corpos de prova.

Com os valores de pressão calculados pode-se fazer o gráfico que relaciona a penetração com a pressão.

O ISC é obtido pela fórmula:

$$ISC = \frac{\text{pressão calculada ou corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (\text{XIV})$$

O ISC é calculado para as penetrações 2,54mm e 5,08mm.

### 3.2.10 Resistência à Compressão Simples

Para misturas cimentadas, o ideal é que se faça este ensaio.

Os procedimentos deste ensaio foram feitos utilizando como base as normas DNER-ME 201/94 – compressão axial de corpos de prova cilíndricos e DNER-ME 202/4 – moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.

Os parâmetros de avaliação deste importante resultado foi feito seguindo a norma DER/PR ES-P 11/05 – Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento. As normas DNER – Es 304/97 - Pavimentos Flexíveis – Base De Solo Melhorado Com Cimento - Especificação De Serviço e DNIT 140/2010 - pavimentação – sub-base de solo melhorado com cimento – especificação de serviço não especificam o valor da resistência que a mistura deve ter, por isso a DER/PR ES-P 11/05 foi utilizada para este parâmetro.

Na figura 39 tem-se o molde cilíndrico e o soquete próprios usados neste ensaio.

Figura 39: Molde e soquete utilizados no ensaio



Fonte: Autor (2019).



O ensaio seguiu-se da seguinte forma: primeiramente separou-se uma amostra de 4500 gramas de cada mistura (figura 40). A mistura foi umidificada com o teor de água da umidade ótima obtida no ensaio de compactação proctor.

Figura 40: (a) Misturas separadas para o ensaio e (b) mistura na bandeja pronta para ser umidificada



Fonte: Autor (2019).

A compactação foi realizada em 5 camadas, com retirada de uma pequena quantidade do material na compactação da camada 3 para obter a umidade. A quantidade de golpes foi calculada por meio da fórmula a seguir, que consta na norma DNER – ME 180/94:

$$n = \frac{E*V}{9,8*P*H*Nc} \quad (XV)$$

Em que:

- N = Número de golpes por camada
- E = Energia de compactação
- V = Volume de material compactado, em m<sup>3</sup>;
- P = A massa do soquete, em kg;
- H = A altura do soquete, em m;
- Nc = O número de camadas.

A energia de compactação é de acordo com a energia que foi escolhida para moldar o corpo de compactação Proctor. Nesta fórmula, usa-se 0,59 MN.m por  $m^3$  para energia Normal, 1,26 MN.m por  $m^3$  para Intermediária e 2,69 MN.m para Modificada.

Terminada a compactação o corpo de prova foi cuidadosamente retirado do cilindro por meio do extrator de amostra (figura 41). Suas medidas eram aferidas e o mesmo também era pesado.

Figura 41: Extrator de amostra



Fonte: Autor (2019).

Posteriormente o corpo era envolto por papel filme e depois colocado em um saco plástico (figura 42) e acondicionado em uma câmara úmida (figura 43), que no caso se trata de um isopor com serragem. Isto é necessário para o corpo manter sua umidade e a sua cura não apresentar falhas.

Figura 42: (a) Corpo de prova envolto com papel filme e (b) já envolto com o saco plástico



Fonte: Autor (2019).

Figura 43: Corpos de prova na câmara úmida



Fonte: Autor (2019).



Exatamente no sétimo dia de cura os corpos eram colocados no tanque com água (figura 44) durante 4 horas. Em seguida eram rompidos na prensa eletrônica (figura 45). Quando havia necessidade, em alguns corpos que ficaram com a superfície não reta ou lisa, realizava-se capeamento com cal e cimento para a superfície ficar homogênea.

Figura 44: Corpos de prova pré-rompimento no tanque



Fonte: Autor (2019).

Figura 45: Máquina utilizada para o rompimento



Fonte: Autor (2019).

Figura 46: (a) Corpo de prova na máquina de ruptura e (b) aparência de um dos corpos após o rompimento



Fonte: Autor (2019).

Isto foi repetido para a fabricação dos corpos de prova de todas as misturas. Algumas misturas tiveram 3 corpos de prova para o rompimento das mesmas em 7, 14 e 28 dias a nível de comparação. Outras misturas tiveram apenas a ruptura do corpo de 7 dias.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos nos ensaios realizados com os materiais e misturas apresentados no capítulo anterior.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA A CLASSIFICAÇÃO TRB

A seguir serão mostrados os resultados dos ensaios feitos para obter a classificação pelo método TRB.

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

Primeiramente fez-se a granulometria do solo e RAP virgens, e posteriormente das misturas estudadas.

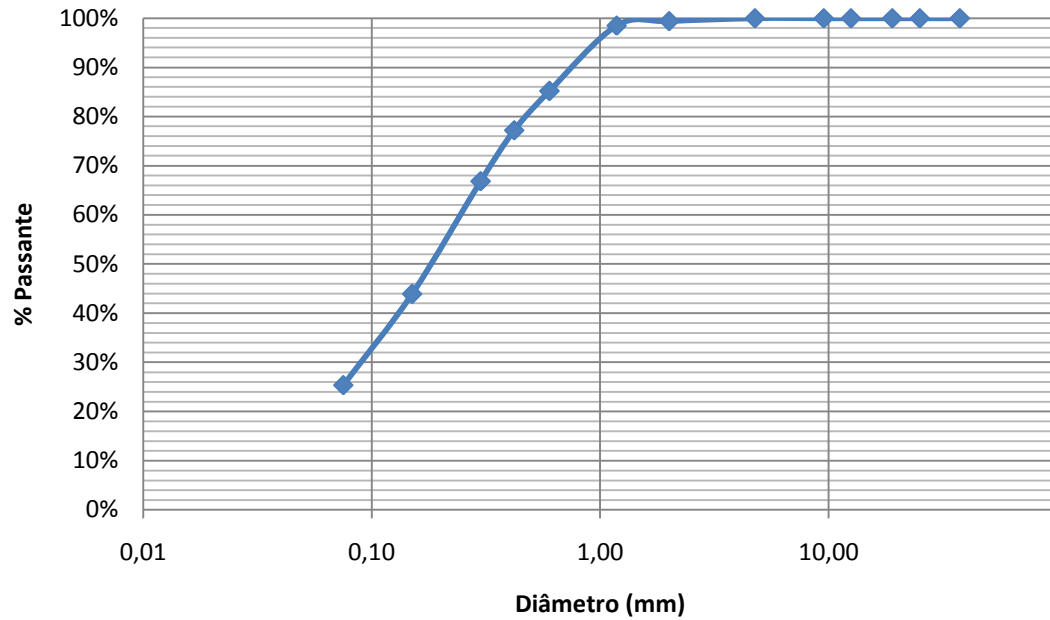
A partir da curva granulométrica do solo (gráfico 6), pôde-se determinar a predominância de suas partículas. Na tabela 3, apresenta-se resumidamente a porcentagem das partículas predominantes no mesmo.

Tabela 3: Composição do solo

Descrição	%
Areia fina, Silte e Argila	46,00%
Areia media	46,00%
Areia grossa	8,00%

Fonte: Autor (2019).

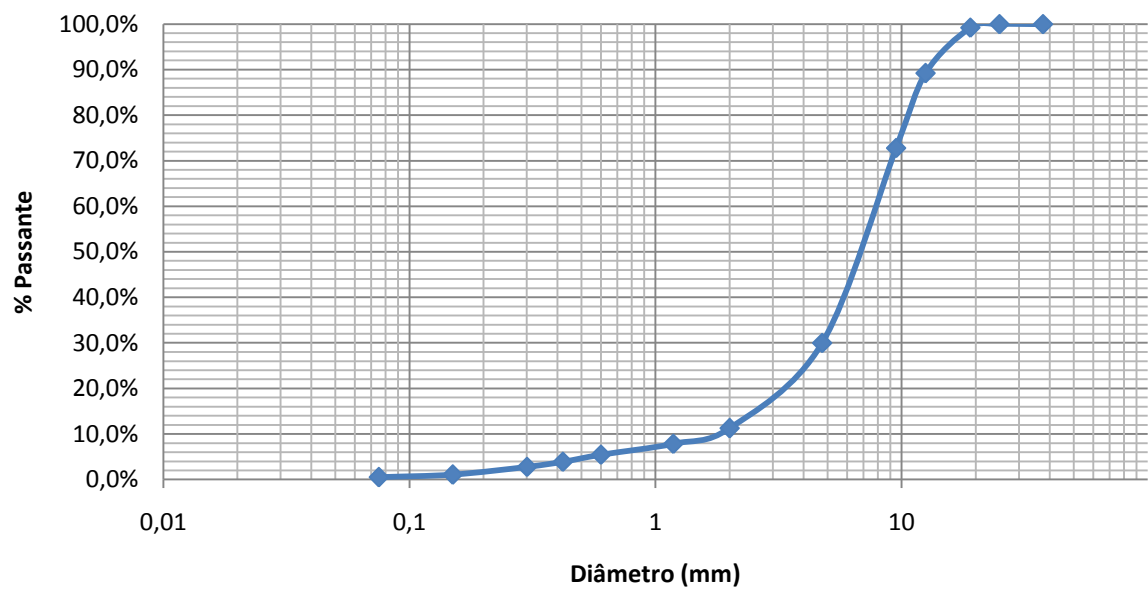
Gráfico 6: Curva granulométrica solo



Fonte: Autor (2019).

No gráfico 7, apresenta-se a curva granulométrica do material fresado.

Gráfico 7: Curva granulométrica RAP



Fonte: Autor (2019).

Após a análise granulométrica de cada material, fez-se a escolha dos teores de cada um deles nas misturas. Estas foram inicialmente arbitradas e posteriormente, fez-se o cálculo para saber se as mesmas se enquadravam nas faixas propostas pela norma DNIT 141/2010. No quadro 7, tem-se as misturas adotadas com seus respectivos teores de materiais e simbologia adotada.

Na simbologia o S representa o solo, o R representa o RAP e o C representa o cimento. O número que vem em seguida de cada letra representa o percentual do material.

Quadro 7: Misturas utilizadas no estudo

Mistura	Teor de solo (%)	Teor de RAP (%)	Teor de cimento (%)	Simbologia adotada
M1	77	20	3	S77R20C3
M2	57	40	3	S57R40C3
M3	42	55	3	S42R55C3
M4	97	0	3	S97C3
M5	43	55	2	S43R55C2
M6	33	65	2	S33R65C2
M7	31	65	4	S31R65C4
M8	32	65	3	S32R65C3
M9	22	75	3	S22R75C3
M10	12	85	3	S12R85C3

Fonte: Autor (2019).

No quadro 8, tem-se a granulometria detalhada do solo, RAP e de cada mistura com sua respectiva faixa de enquadramento. As misturas M6, M7 e M8, M3 e M5, e M4 e solo apresentam pequenas variações no teor de solo e cimento resultando em granulometrias semelhantes e por isso optou-se por representar apenas uma de cada grupo no quadro. Ressalta-se que os corpos de prova foram confeccionados com todas as misturas.

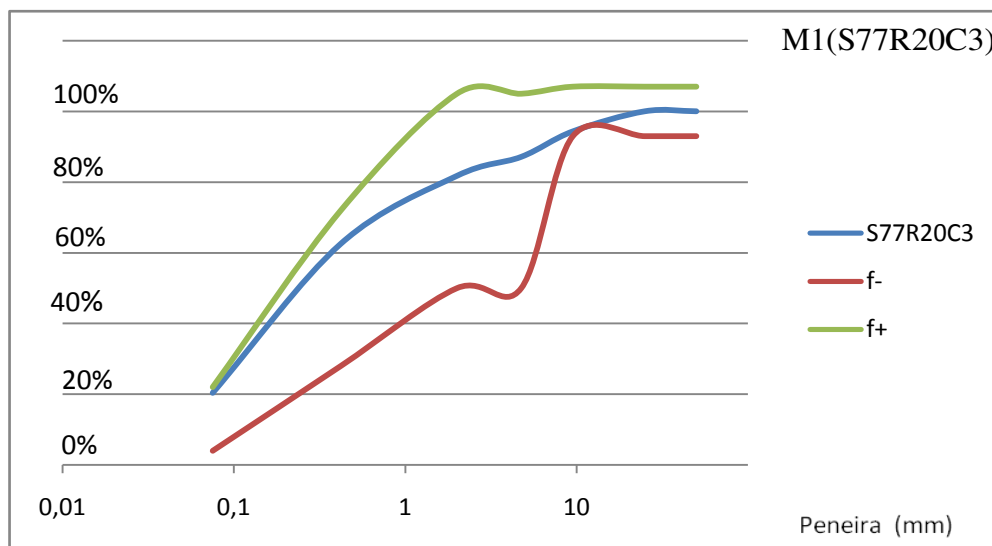
Quadro 8: Granulometria das misturas

Peneira	Abertura peneira	Granulometria % passante							
		Solo	RAP	M1	M2	M3	M8	M9	M10
1 ½	37,50	100%	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1	25,00	100%	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3 4	19,00	100%	99%	99,84	99,67%	99,55%	99,47%	99,39%	99,30%
1 2	12,50	100%	89%	97,84	95,68%	94,05%	92,97%	91,89%	90,81%
3 8	9,50	100%	72%	94,32	88,64%	84,37%	81,53%	78,69%	75,85%
4	4,75	100%	36%	87,12	74,24%	64,58%	58,14%	51,70%	45,26%
10	2,00	99%	11%	81,78	64,14%	50,92%	42,11%	33,28%	24,47%
16	1,18	99%	8%	80,36	62,23%	48,63%	39,56%	30,49%	21,42%
30	0,6	85%	5%	69,22	53,27%	41,31%	33,33%	25,36%	17,38%
40	0,42	77%	4%	62,54	47,88%	36,88%	29,55%	22,22%	14,89%
50	0,3	67%	3%	54,04	41,23%	31,62%	25,21%	18,80%	12,39%
100	0,15	44%	1%	35,32	26,76%	20,33%	16,04%	11,76%	7,48%
200	0,075	25%	0%	20,37	15,40%	11,67%	9,18%	6,69%	6,74%
<b>FAIXA DE ENQUADRAMENTO</b>				F	D	D	D	C	B

Fonte: Autor (2019).

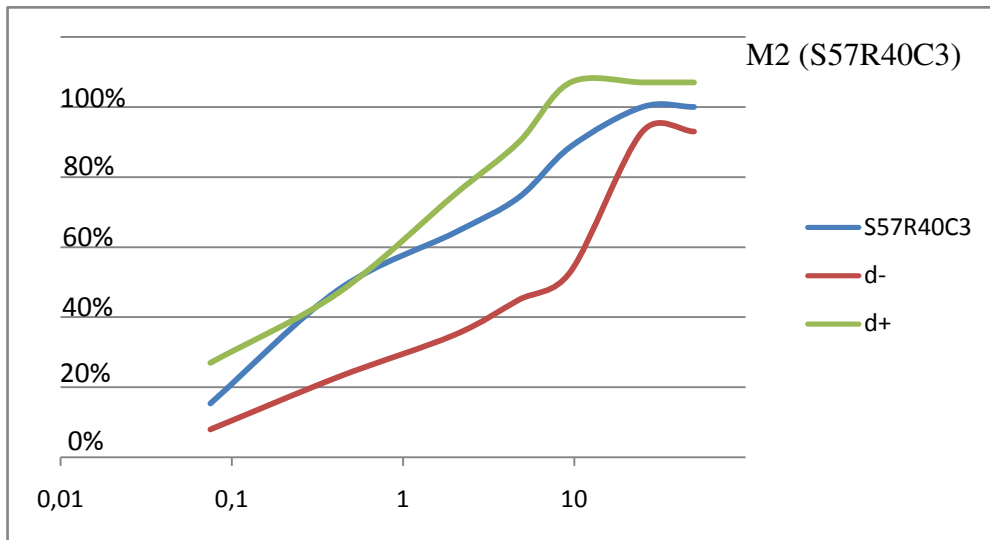
A seguir os gráficos de 8 a 13 mostram o enquadramento de cada mistura em sua respectiva faixa.

Gráfico 8: Enquadramento da mistura M1 na faixa F



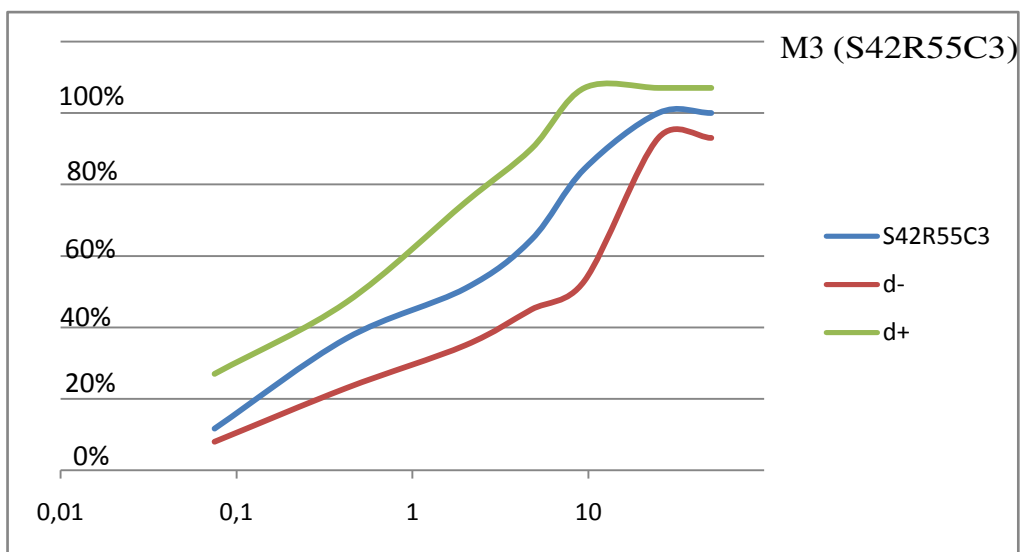
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 9: Enquadramento da mistura M2 na faixa D



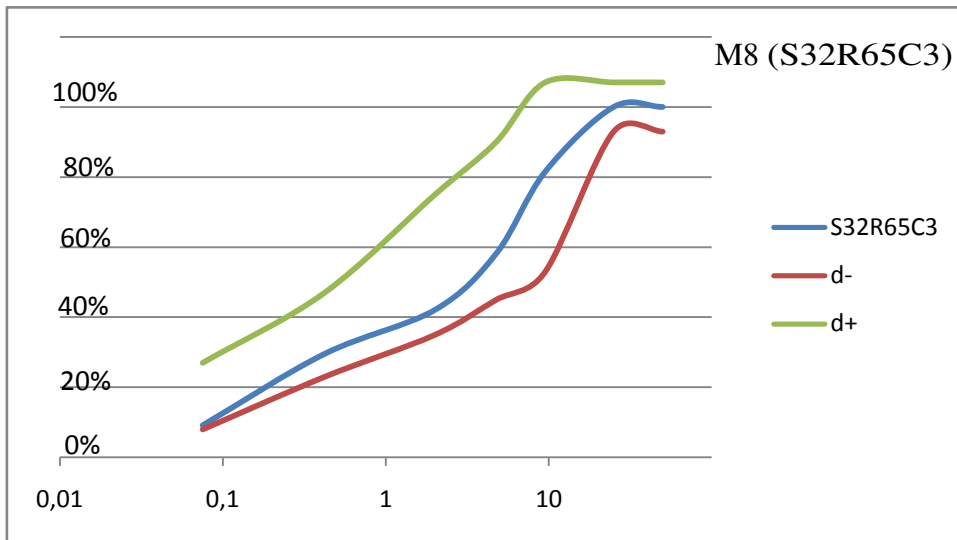
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 10: Enquadramento da mistura M3 na faixa D



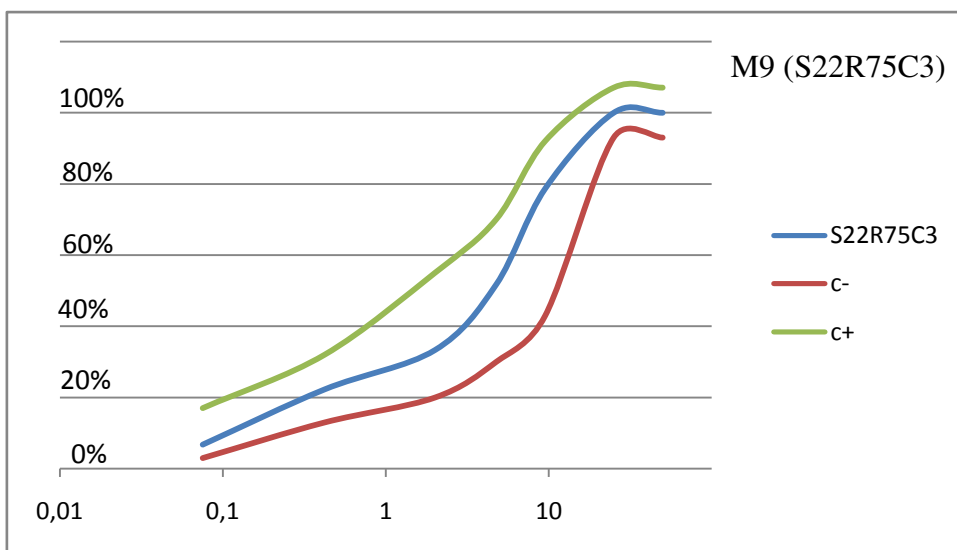
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 11: Enquadramento da mistura M8 na faixa D



Fonte: Autor (2019).

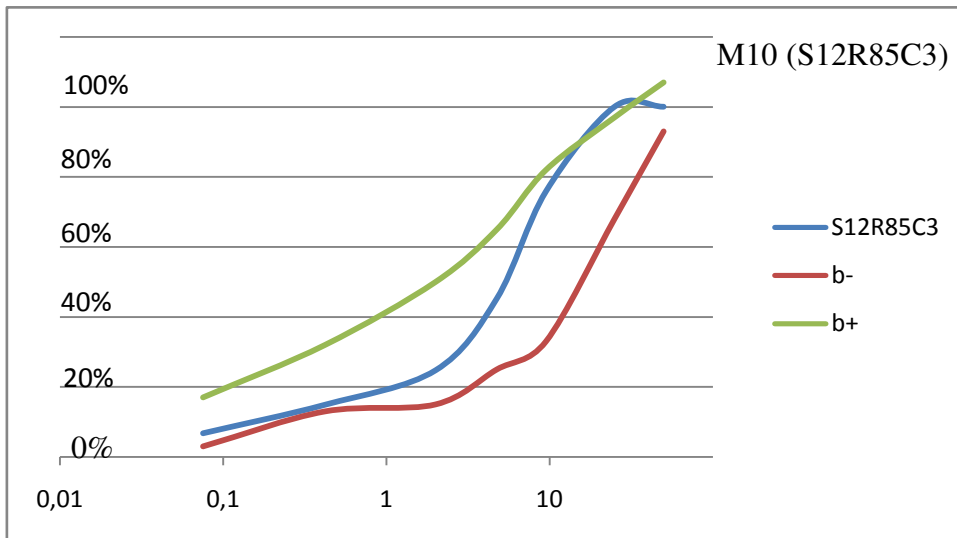
Gráfico 12: Enquadramento da mistura M9 na faixa C



Fonte: Autor (2019).



Gráfico 13: Enquadramento da mistura M10 na faixa B



Fonte: Autor (2019).

## 4.1.2 Limites de Consistência

### 4.1.2.1 Limite de Plasticidade

Este ensaio foi realizado seguindo norma do ensaio – DNER-ME 082/94 entretanto não foi possível fazer a conclusão do ensaio, pois o solo foi incapaz de ser moldado, mesmo depois de várias tentativas. A figura 47 mostra a tentativa do ensaio.

Figura 47: Tentativa do ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Autor (2019).

O solo sempre se fragmentava quando ia ser moldado, sendo assim ele foi classificado como: não plástico (NP).

#### 4.1.2.2 Ensaio limite de Liquidez

A norma regente do ensaio - DNER – ME 082/94 – ES (1994, p.03), afirma que “Quando o solo for extremamente arenoso, o ensaio de limite de plasticidade deve ser feito antes do ensaio do limite de liquidez. Se o limite de plasticidade não puder ser determinado, anotar ambos como NP (não plástico)”.

Sendo assim o ensaio não chegou a ser realizado. A incapacidade de realizar o ensaio de Limite de Plasticidade fez-se concluir que este ensaio também seria de incapaz realização também. Sendo assim, o limite de liquidez também é considerado não plástico (NP).

#### 4.1.2.3 Índice de Plasticidade

A norma DNER – ME 082/94 (1994, p.03), também afirma que “Quando o limite de liquidez ou limite de plasticidade não puderem ser determinados, anota-se o índice de plasticidade como NP (não plástico).

Sendo assim, o índice de plasticidade também é considerado não plástico (NP).

A norma para materiais de sub-base DNIT 139/2010 não faz exigências a respeito dos limites de Atteberg para a mesma. Já a norma DNIT 141/2010, que é para material para aplicação em bases, exige  $LL \leq 25\%$  e  $IP \leq 6\%$  para material passante na peneira n°40.

Sendo assim, o solo satisfaz a exigência desta característica.

#### 4.1.3 Classificação método TRB

Com os resultados de granulometria e IG pôde-se classificar o solo pelo método TRB. O quadro 9 apresenta os coeficientes utilizados para encontrar o índice de grupo pela fórmula do IG (ver item 5.2.1 e fórmula I).

Quadro 9: Coeficientes para cálculo do IG

Coeficiente	Valor
P	25
A	0
B	0
C	0
D	0
<b>IG</b>	<b>0</b>

Fonte: Autor (2019).

Pela tabela 1(ver item 5.2.1), encontrou-se que o solo é do tipo **A-2-4**, neste grupo de solo predominam os pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas e seu comportamento é excelente a bom quando utilizado em subleito de pavimentos.

#### 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA A CLASSIFICAÇÃO MCT

A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios realizados para se obter a classificação pelo método MCT, sendo: ensaio de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.

Foi-se utilizado os mesmos dados da pesquisa de Soares (2018), que trabalhou com o mesmo solo. Já se foi observado em outros estudos que solos lateríticos, quando estabilizados com cimento, têm melhores resultados de resistência do que solos não lateríticos também estabilizados com cimento.

Na tabela 4 são apresentados os valores para os coeficientes  $c'$ ,  $d'$  e  $e'$ . Também é apresentado o valor da perda por imersão  $P_i$  resultante do ensaio de perda de massa por imersão.

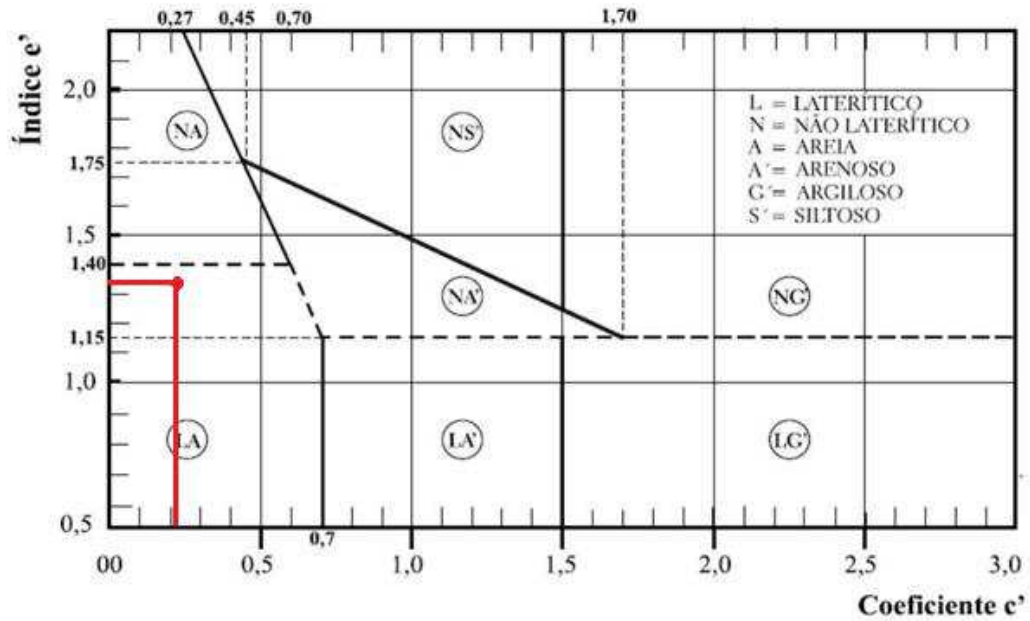
Tabela 4: Resultados do ensaio de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão.

Amostra	Coeficiente $c'$	Coeficiente $d'$	Pi (%)	Coeficiente $e'$
Solo natural	0,21	251,7	231,4	1,34

Fonte: Adaptado de Soares (2018).

As linhas em vermelho no gráfico 9 mostra os valores para a classificação.

Gráfico 14: classificação do solo método MCT



Fonte: Adaptado de Soares (2018).

De acordo com o gráfico, o solo é classificado como LA – areia laterítica.

### 4.3 EQUIVALENTE DE AREIA

Segundo a norma DNER 054/97, realizou-se o ensaio utilizando 3 amostras, a média do resultado apresenta-se no quadro 10.

Quadro 10: Alturas e resultado do Equivalente de Areia

h1	h2	EA %
21,6	5,6	25,926

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a norma DNIT 141/2010, para bases, o equivalente de areia deve ser menor que 30%. Sendo assim, o resultado obtido está dentro da recomendação da norma, logo é aceitável.

Em relação à sub-base, a norma DNIT 139/2010 não faz exigências a respeito dessa característica.

#### 4.4 ÍNDICE DE FORMA

Este ensaio foi feito com o RAP seguindo a norma ABNT NBR: 7809:2006 e realizado apenas como informação adicional e caracterização, pois as normas de base e sub-base estabilizadas granulometricamente não fazem exigência quanto à forma dos agregados. Na tabela 5 tem-se a porcentagem de cada tipo de grão conforme sua forma e na tabela 6 sua classificação.

Tabela 5: tipos de grão - índice de forma

Tipo	%
Lamelar	59,3%
Cúbica	33,4%
Alongada	4,66%
Alongada – lamellar	2,66%

Fonte: Autor (2019).

Tabela 6: classificação dos grãos – índice de forma

Média das relações		Classificação
b/a	C/b	Cúbica
0,7099	0,5387	

Fonte: Autor (2019).

#### 4.5 ABRASÃO LOS ANGELES

Este ensaio foi realizado com o resíduo asfáltico – RAP. O resultado final foi obtido através da média de dois resultados do ensaio com duas amostras diferentes que foram feitos (tabela 7).

Tabela 7: resultado abrasão Los Angeles

Graduação da amostra do ensaio	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Médio (%)
A	5102,8	2879,9	43,56%	
A	5004,6	2872,2	42,61%	43,08%

Fonte: Autor (2019).

A norma DNIT 141/2010 para bases estabilizadas granulometricamente exige de um índice de desgaste a abrasão “Los Angeles”  $\leq 55\%$ . A norma DNIT 139/2010 para sub-bases não exige quanto a este critério. Sendo assim, o material está de acordo com a norma.

#### 4.6 DENSIDADE E ABSORÇÃO

O ensaio de densidade foi feito com o solo e com o RAP, e o de absorção apenas com o RAP. O resultado do ensaio de densidade do solo – feito pelo método Chapman, foi feito duas vezes para se ter uma média, como mostra a tabela 8.

Tabela 8: Resultado densidade do solo

Densidade do solo			
Leitura inicial	Leitura final	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho$ médio( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
200	390	2,632	
200	393	2,591	2,611

Fonte: Autor (2019).

Os resultados de densidade e absorção do RAP estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9: resultado densidade aparente e absorção do RAP

Dados do RAP	
Densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Absorção
1,657	3,50%

Fonte: Autor (2019).

#### 4.7 TEORES DE LIGANTE ASFÁLTICO

O resultado deste ensaio está apresentado na tabela 10, onde se seguiu as recomendações contidas na norma DNER – ME 053/94.

Tabela 10: Resultado do ensaio teor de ligante asfáltico

Peso inicial	Peso final	% de ligante asfáltico
1005,67	947,84	5,75

Fonte: Autor (2019).

#### 4.8 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

O ensaio de compactação foi realizado no solo virgem e em misturas para obtenção da umidade ótima e confeccionar o corpo de prova para ensaio CBR, no caso do solo, e para o ensaio de Resistência à compressão simples no caso das misturas.

Este ensaio foi realizado nas misturas M1, M2 M3 e M4, que seriam as únicas misturas trabalhadas neste estudo, entretanto, houve uma mudança de plano e resolveu-se confeccionar corpos de prova com outras misturas que são M5, M6, M7, M8, M9 e M10. Sendo assim, por uma questão de tempo e disponibilidade de material, as umidades ótimas destas últimas misturas foram arbitradas tendo como referência os resultados das misturas anteriores, em que se observou que a umidade ótima diminuía quanto menor a proporção de solo.

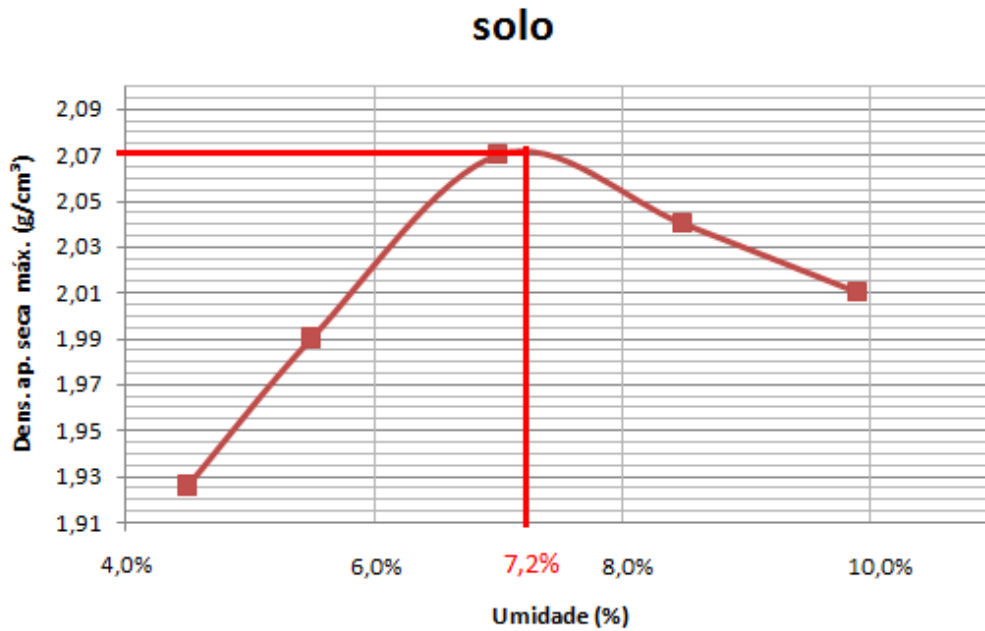
O solo teve o resultado de 7,0% de umidade ótima e o peso específico aparente seco foi 2,07 g/cm<sup>3</sup>, conforme mostra a tabela 11 e o gráfico 10.

Tabela 11: Compactação solo

Ensaio Solo			
Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,01	4,5%	1,923
2	2,10	5,5%	1,990
3	2,22	7,2%	2,075
4	2,21	8,5%	2,037
5	2,20	9,9%	2,002

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 15: Compactação do solo



Fonte: Autor (2019).

A mistura M1 (S77R20C3) teve o resultado de aproximadamente 8,5% de umidade ótima e o peso específico aparente seco foi 2,03 g/cm<sup>3</sup>, como se observa na tabela 12 e no gráfico 11.

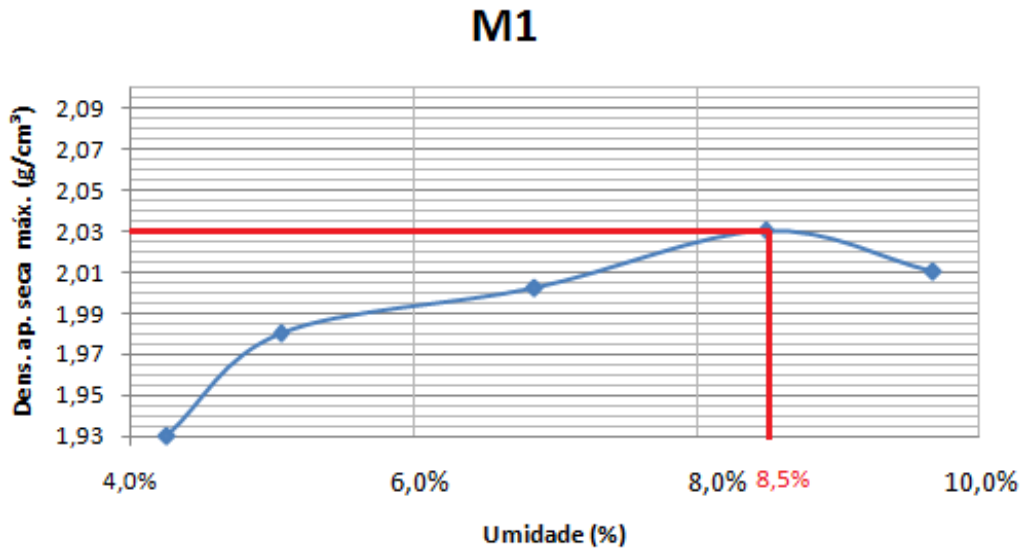
Tabela 12: Compactação mistura M1

Ensaio M1			
Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,015	4,3%	1,932
2	2,079	5,1%	1,978
3	2,137	6,9%	2,000
4	2,199	8,5%	2,027
5	2,216	9,7%	2,020

Fonte: Autor (2019).



Gráfico 16: Compactação mistura M1



Fonte: Autor (2019).

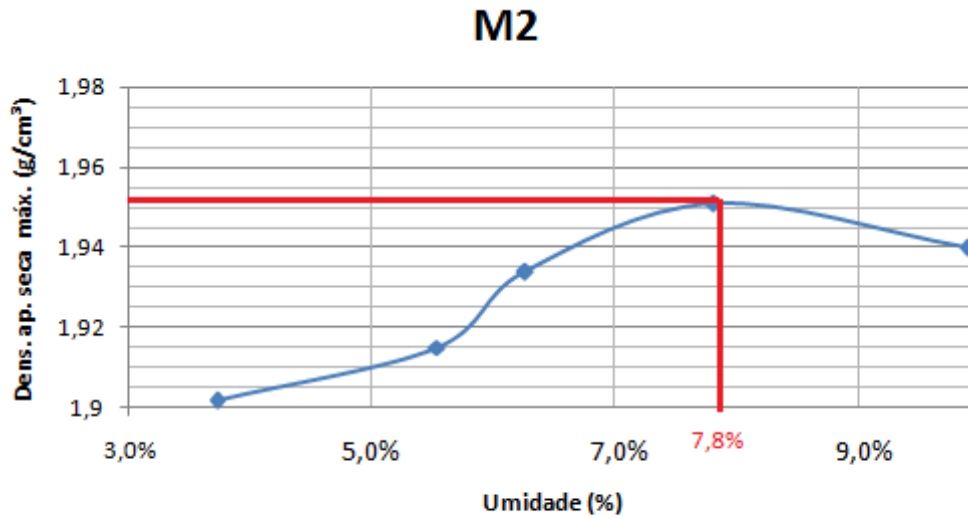
A mistura M2 (S57R40C3) teve o resultado de 7,8% de umidade ótima e o peso específico aparente seco foi 1,95 g/cm<sup>3</sup>, como se observa na tabela 13 e gráfico 12.

Tabela 13: Compactação mistura M2

Ensaio M2			
Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	1,972	3,7%	1,902
2	2,020	5,5%	1,915
3	2,061	6,3%	1,939
4	2,103	7,8%	1,951
5	2,139	9,9%	1,946

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 17: Compactação mistura M2



Fonte: Autor (2019).

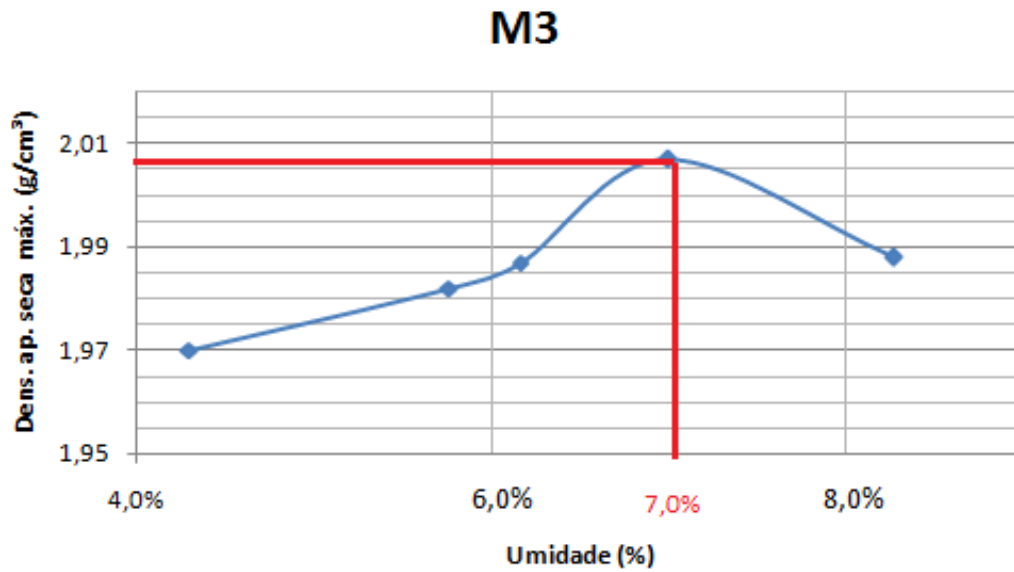
A mistura M3 (S42R55C3) teve o resultado de 7,0% de umidade ótima e o peso específico aparente seco foi 2,007 g/cm<sup>3</sup>, como se observa na tabela 14 e no gráfico 13.

Tabela 14: Compactação mistura M3

Ensaio M3			
Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Peso específico aparente seco (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,061	4,3%	1,976
2	2,098	5,8%	1,982
3	2,110	6,2%	1,987
4	2,148	7,0%	2,007
5	2,153	8,3%	1,988

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 18: Compactação mistura M3



Fonte: Autor (2019).

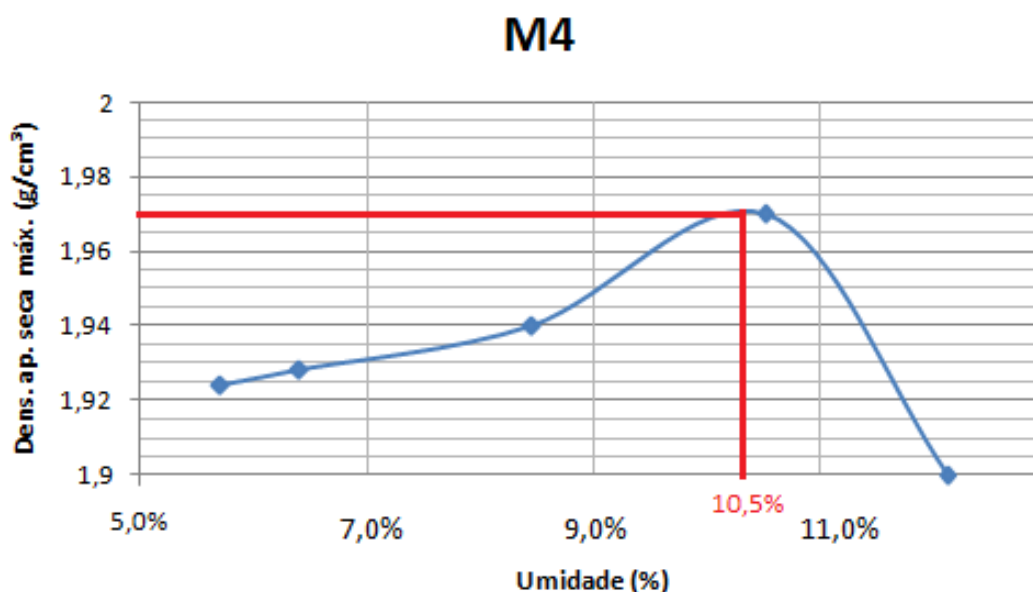
A mistura M4 (S97C3) teve o resultado de 10,5% de umidade ótima e o peso específico aparente seco foi 1,97 g/cm<sup>3</sup>, como se observa na tabela 15 e no gráfico 14.

Tabela 15: Compactação mistura M4

Ensaio M4			
Ponto de compactação	Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade	Peso Específico Aparente Sec. (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,034	5,7%	1,924
2	2,052	6,4%	1,928
3	2,107	8,5%	1,942
4	2,184	10,5%	1,976
5	2,137	12,1%	1,906

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 19: Compactação mistura M4



Fonte: Autor (2019).

Na tabela 16, têm-se um resumo dos valores de umidade e peso específico aparente seco obtidos do solo e misturas.

Tabela 16: Resultados compactação

Mistura	Umidade ótima	Pmáx
Solo	7,20%	1,954
S77R20C3	8,5%	2,027
S57R40C3	7,80%	1,951
S42R55C3	7,00%	2,007
S97C3	10,5%	1,976

Fonte: Autor (2019).

Analisando os valores percebe-se que a umidade diminui conforme o percentual de solo diminui e conseqüentemente o RAP aumenta. No gráfico 20, mostra-se uma relação entre a umidade ótima e o teor de RAP das misturas em que se pode notar essa observação. Sendo assim, para as misturas seguintes foram-se arbitrados os valores

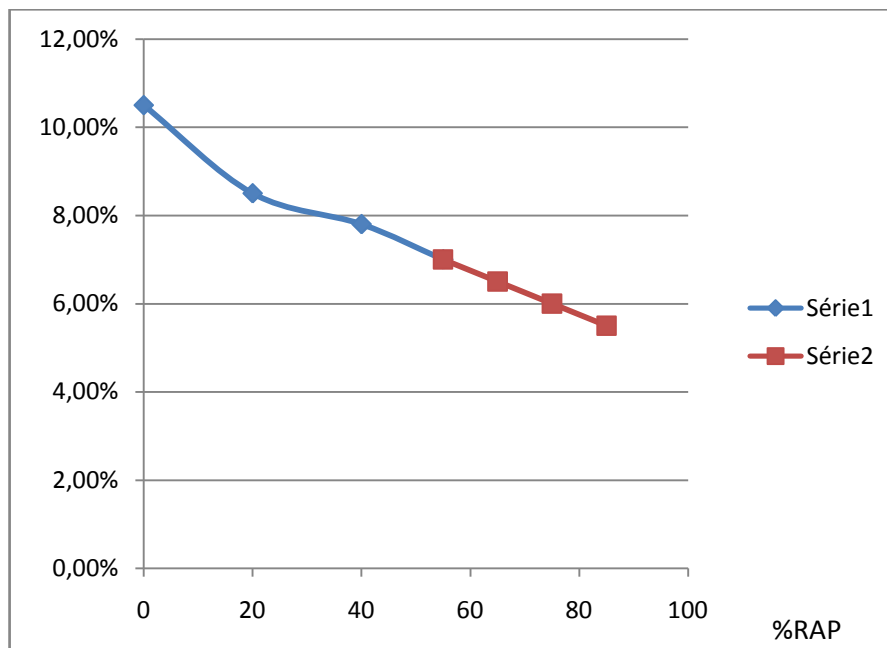
de umidade ótima (tabela 17) para confecção dos corpos de prova para o ensaio Resistência à Compreensão Simples:

Tabela 17: umidade ótima adotada para misturas

Mistura	Umidade adotada
S43R55C2	7,00%
S33R65C2	6,50%
S31R65C4	6,50%
S32R65C3	6,50%
S22R75C3	6,00%
S12R85C3	5,50%

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 20: relação umidade ótima x teor de RAP nas misturas



Fonte: Autor (2019).

A série 1 do gráfico 20 representa as misturas em que se foi realizado o ensaio de compactação Proctor com posterior obtenção da umidade ótima. A série 2 representa a as misturas em que não se realizou o ensaio, mas sim foi estimado um valor com base na série 1.

#### 4.9 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O ensaio foi realizado apenas com o solo virgem, pois as misturas apresentam material cimentante, e para estes tipos de misturas o mais ideal é que se tire parâmetros por meio do ensaio de Resistência à Compressão Simples.

Nesse ensaio foi obtido um CBR de 25,2% à uma umidade ótima de 7,0%.

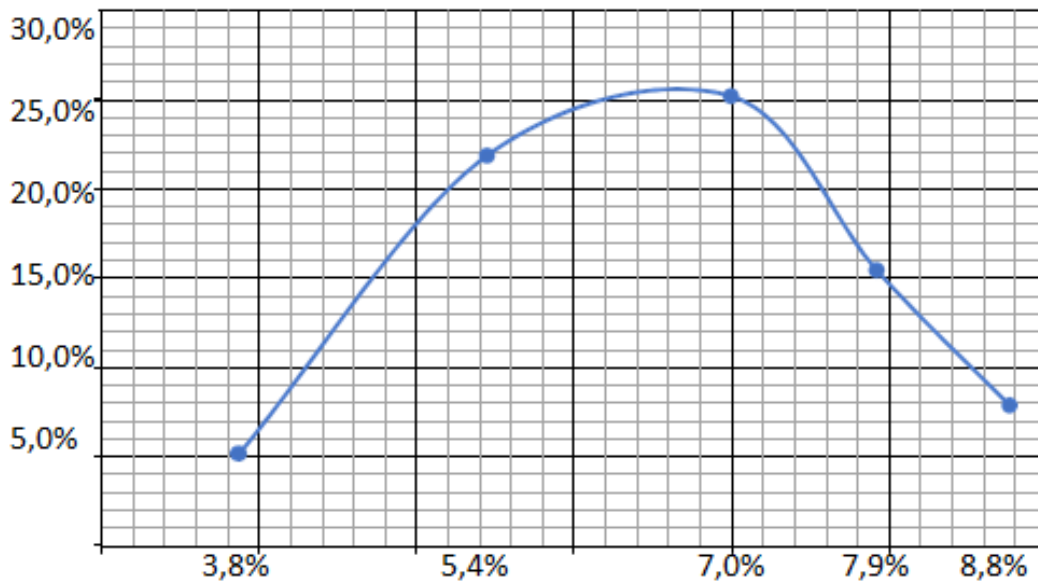
A tabela 18 e o gráfico 21 apresentam os pontos de compactação e seus resultados.

Tabela 18: Ensaio CBR - solo

solo virgem			
Ponto de compactação	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
1	3,80%	0,009%	5,09%
2	5,40%	0,000%	21,84%
3	7,20%	0,000%	25,18%
4	7,90%	0,009%	15,40%
5	8,80%	0,000%	7,80%

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 21: Ensaio CBR - solo



Fonte: Autor (2019).

#### 4.10 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Neste ensaio, foram confeccionados corpos de prova para todas as misturas sendo que, fabricou-se 3 corpos de prova para cada uma das quatro primeiras misturas - S77R20C3, S57R40C3, S42R55C3 e S97C3. Estes, foram rompidos com 7, 14 e 28 dias de cura na câmara úmida. Para as demais misturas, houve apenas 1 corpo de prova que foi rompido aos 7 dias de cura.

O resultado da resistência à compressão simples em relação ao tempo de cura está na tabela 19.

Tabela 19: Resultado ensaio resistência à compressão simples

Mistura	Umidade ótima	RCS (MPa) 7 dias	RCS (MPa) 14 dias	RCS (MPa) 28 dias
S77R20C3	8,50%	0,27	0,60	0,94
S57R40C3	7,80%	0,77	1,19	1,41
S42R55C3	7,00%	1,5	1,81	1,53
S97C3	10,50%	0,23	0,24	0,28
S43R55C2	7,00%	0,33	-	-
S33R65C2	6,50%	0,34	-	-
S31R65C4	6,50%	1,22	-	-
S32R65C3	6,50%	1,54	-	-
S22R75C3	6,00%	1,24	-	-
S12R85C3	5,50%	0,88	-	-

Fonte: Autor (2019).

De acordo com DER/PR ES-P 11/05 – Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento, os critérios para solo tratado com cimento aos 7 dias de cura são:

- sub-base: 1,2 a 2,1 MPa.
- base: 1,5 a 2, 1 MPa

Conforme mostra na tabela 19, as misturas que satisfazem os critérios para solo melhorado com cimento para base são as misturas S42R55C3 e S32R65C3, além de também poderem ser usadas como sub-base. Já as misturas S31R65C4 e S22R75C3 satisfazem os critérios para solo melhorado com cimento para sub-base.

A mistura com menor valor de resistência foi a mistura S97C3, a única que não continha RAP.



A mistura com maior valor de resistência foi a mistura S32R65C3, que continha um percentual de 65% de RAP E 3% de cimento.

#### 4.11 ANÁLISE DE RESULTADOS

Pelos resultados obtidos, concluiu-se que o solo em questão possui características adequadas para ser utilizado em reforço de subleito e sub-base, satisfazendo todos os critérios que as normas regentes pedem.

Examinando os resultados do ensaio de Resistência à Compreensão Simples, pode-se perceber que há um aumento da resistência em misturas com maior teor de RAP, entretanto este aumento acontece só até um certo percentual do material na mistura, em que a resistência começa a cair, quando este percentual é atingido. Para melhor entendimento, apresenta-se na tabela 20 e no gráfico 17 as misturas com o mesmo teor de cimento – 3% - e em ordem crescente de percentual do RAP, com respectivas resistências à compressão.

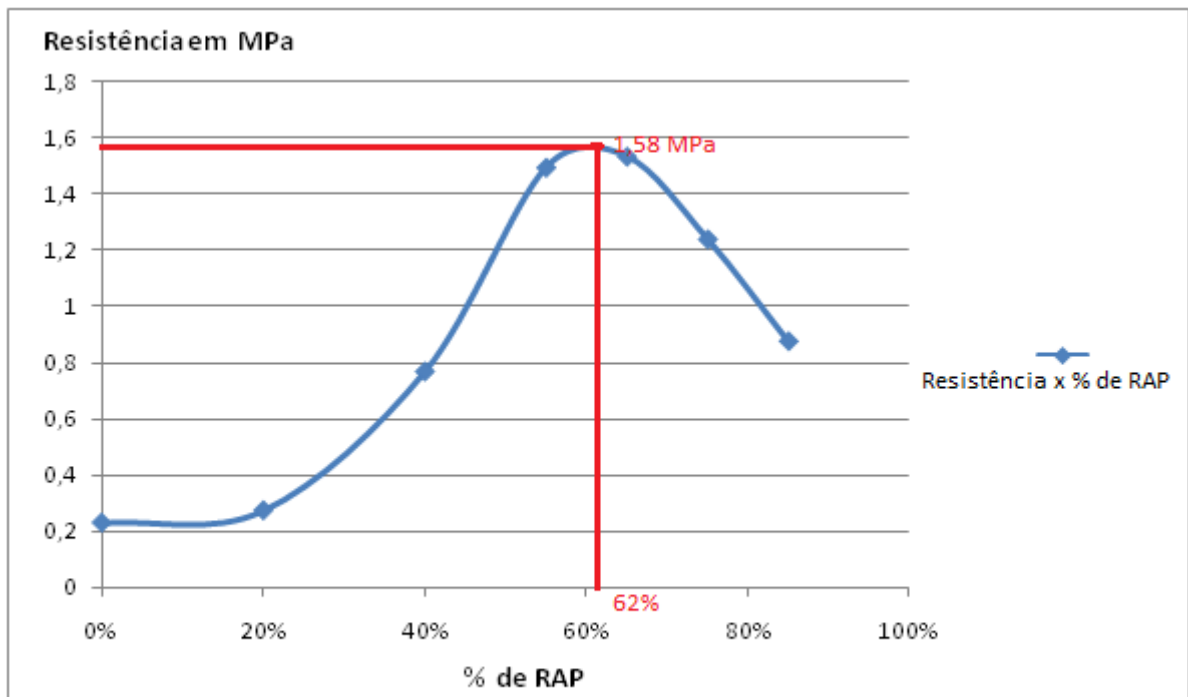
Tabela 20: Valores da resistência em misturas com teor 3% de cimento

MISTURA	KGf	MPA	%RAP
S97C3	186	0,23	0%
S77R20C3	221	0,27	20%
S57R40C3	618	0,77	40%
S42R55C3	1200	1,5	55%
S32R65C3	1231	1,54	65%
S22R75C3	995	1,24	75%
S12R85C3	704	0,88	85%

Fonte: Autor (2019).

Pode se observar no gráfico 22 que a resistência vai crescendo conforme cresce o percentual de RAP e atinge o ponto alto quando o teor do RAP é de mais ou menos 62% atingindo aproximadamente 1,58 MPa. Após esse percentual do material fresado, a resistência começa a diminuir.

Gráfico 22: Relação resistência x teor de RAP



Fonte: Autor (2019).

A seguir, na tabela 21 e 22 tem-se resultados de outros trabalhos para comparação com este.

Tabela 21: Comparativo de resultados obtidos por Silva (2013) e esta pesquisa

Mistura Silva (2013)	RCS (MPa)7dias Silva (2013)	Mistura desta pesquisa	RCS (MPa)7dias desta pesquisa
100% solo	0,915	-	0,23
80% solo + 20% RAP	1,157	-	-
60% solo + 40% RAP	1,302	-	-
40% solo + 60% RAP	1,394	-	-
40% solo + 60% RAP + 2% cimento	2,297	S33R65C2	0,34
40% solo + 60% RAP + 4% cimento	2,44	S31R65C4	1,22

Fonte: Adapatao de Silva (2013).

Silva (2013) fez uma pesquisa em que também utilizava misturas com RAP e cimento e obteve considerável melhora no solo. Não tiveram misturas com proporções de materiais exatamente iguais entre as duas pesquisas, então fez-se uma comparação entre misturas que tinham percentuais próximos (tabela 21), e notou-se que as resistências que ele encontrou foram maiores do que o desta pesquisa, o que pode ser explicado pelo tipo de solo utilizado em cada projeto.

Na tabela 22, têm-se os valores de comparação de uma pesquisa de Matos (2018), em que foram utilizados o mesmo solo e RAP desta presente pesquisa, além de cal.

Tabela 22: Comparativo entre resultados obtidos por Matos (2018) e esta pesquisa

Mistura de Matos (2018)	Umidade ótima%	RCS MPa - 7 dias	RCS MPa - 14 dias	Mistura desta pesquisa	RCS MPa- 7 dias
S96CAL4	7,50%	0,16	0,29	S97C3	0,23
S43RAP53CAL4	7,10%	0,44	0,18	S42R55C3	1,5

Fonte: Adapatao de Matos (2018).

Entre esta pesquisa e de Matos (2018) também não houve misturas com teores exatamente iguais. Mas fez-se um comparativo entre as misturas de teores semelhantes (tabela 22). Pelo comparativo percebe-se que a resistência da mistura com cimento e RAP (S42R55C3) obteve melhor resultados do que com RAP e cal (S43RAP53CAL4). E dentre as misturas sem o RAP (S96CAL4 e S97C3), a que melhor se sobressaiu foi a mistura com cimento (S97C3). Sendo assim, percebeu-se que a mistura com cimento e RAP é mais eficiente que a mistura com cal e RAP.

Fazendo uma análise geral desta pesquisa, a mistura que obteve maior resultado de resistência foi a S32R65C3. A de menor valor de resistência foi a S97C3, a única que não continha RAP em sua composição. As misturas S32R65C3 e S42R55C3, tiveram resultados bastante positivos, pois foram as misturas que atingiram o parâmetro mínimo para material de base e com capacidade de resisitir a tráfego pesado. E como se viu no gráfico 18, a resistência teve um crescente aumento conforme maior o teor de RAP, até atingir um ponto máximo e começar a diminuir, entendendo-se assim que para o solo desta pesquisa, a melhor combinação, ou seja, a que fez atingir o maior valor de resistência foi a mistura com o percentual de 62% de RAP.

Sendo assim, entende-se que a combinação de material fresado com o cimento tem realmente capacidade de melhorar um solo. Baseando-se em anos de estudos e obras realizadas sabe-se que o solo melhorado apenas com cimento tem capacidade de melhora, no entanto, como se viu neste presente estudo, quando se acrescenta RAP, a melhora é ainda mais significativa.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa permitiu avaliar e analisar a utilização do material residual fresado na estabilização granulométrica juntamente com estabilização química de um solo arenoso presente na cidade de São Luís, Maranhão.

Através de resultados dos ensaios, ficou provado que o solo apresenta características e propriedades favoráveis para sua utilização como material de reforço do subleito e sub-base. Então buscou-se melhorar o solo para que o mesmo melhorasse o desempenho como material de sub-base e se possível chegar a ser utilizado como material de base.

Nos resultados do ensaio de Resistência à Compressão Simples é observada a crescente melhoria da resistência do solo ao aumento de teor de RAP e cimento até um teor de 62% do RAP, e que as misturas S32R65C3 e S42R55C3 obtiveram resultados satisfatórios para material de base em tráfego pesado.

Importante ressaltar que apesar da melhora observada e de algumas misturas terem satisfeito os parâmetros de resistência, os resultados quando comparados com outra pesquisa, a de Silva (2013), foram menores do que os resultados obtidos pelo mesmo, o que pode ser explicado pela possível melhor qualidade do solo que ele trabalhou, um solo argiloso, ou pela melhor qualidade do RAP que utilizou em relação ao deste trabalho, já que como explicado no item 3.1.2, o material fresado utilizado nesta pesquisa era bastante irregular e heterogêneo. Já em comparação à pesquisa de Matos (2018), que utilizou os mesmos solo e RAP deste presente estudo, além de cal na estabilização, os resultados desta pesquisa foram mais satisfatórios.

Sendo assim, comprova-se o potencial de uso do material residual fresado na pavimentação. O mesmo, pode ser bem aproveitado na execução de estabilização do solo trazendo benefícios ao meio-ambiente (já que é um material de descarte) e possível alternativa para o problema de escassez de materiais lateríticos usados em camada de base.

Sugere-se então que se faça mais estudos com o RAP, combinando-o à diferentes tipos de solo e à outros tipos de materiais utilizados para a estabilização química, como por exemplo, materiais betuminosos. O desenvolvimento de mais pesquisas será de extrema importância para desenvolver e melhorar suas técnicas de aplicação.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.P.A. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2005.

BLOG ASFALTO DE QUALIDADE, **Aplicação de camada granular de base com vibroacabadora**, 2018. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com/>>. Acesso em: 28 de abril de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457:2016 .Versão Corrigida: 2016. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7809:2006 Versão corrigida: 2008: **Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR NM 26:2001: **Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 27:2001: **Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2003.

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

BARROS, R.F. **Utilização do revestimento fresado da BR-104 como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. Trabalho de conclusão de curso, Caruaru, PE, 2013.

BERNUCCI, L. L. B., et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 1ºed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras, ABEDA, 2006.

BRAJA, M. Das. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**; São Paulo: Thomson Learning, 2014.

BRITO, L.C; PARANHOS, H.S. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**, 3ª edição, São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6ª edição, volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 041/94: **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 049/94: **Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 051/94: **Solos – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 053/94: **Misturas betuminosas – porcentagem de betume**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 054/97: **Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 081/98: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 082/94: **Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 083/98: **Agregados – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 086/94: **Agregado – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 120/97: **Coleta de amostras de agregados**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 122/94: **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 194/98: **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 199/96: **Redução de amostra de campo agregados para ensaio de laboratório**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 228/94: **Solos – compactação em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 256/94: **Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 258/94: **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 259/96: **Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. DNER-ME: **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**. 2º ed. Rio de Janeiro, 2017, 322p.

\_\_\_\_\_. DNIT 058/2004 - ES: **Pavimento rígido – Execução de sub-base de solo-cimento**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 139/2010 - ES: **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 141/2010 - ES: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 143/2010 - ES: **Pavimentação – Base de solo-cimento**. Rio de Janeiro, 2010.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

MATOS, A.C.R. **Estabilização de solos com utilização de revestimento asfáltico fresado em camadas de pavimentos**. / Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

PALMEIRA, E. M., ORTIGÃO, José Alberto Ramalho. 1990. **Instrumentação de Obras em Solo Reforçado**. In Anais Simpósio Sobre Instrumentação de Campo de Geotecnia-SINGEO Rio de Janeiro 1990 1 293-302 Rio de Janeiro: ABMS.

ROJAS, J.W.J. **Estabilização de solos**, 2015. Coleção Ciências do Pampa / Universidade Federal do Pampa. Campus Caçapava do Sul. - n. 1 (set./2015).

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SARTORI, G. **Estudo de Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão**, 2015. / Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.



SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2º ed.,V.1, Editora Pini, São Paulo, 2007.

SILVA, E.S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

SOARES, W.M. **Uso de solos lateríticos fino para uso em pavimentação a partir dos métodos HRB e MCT**. Programa de bolsas de iniciação científica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, 2018.


VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. **Pavimentos Econômicos**. Tecnologia do uso dos Solos Final Lateríticos. Arte & Ciência Editora. São Paulo, 2007.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S.; CINCERRE, J.R.; SERRA, P.R.M.; NETO, A.Z. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. Arte & Ciência Editora. São Paulo, 2009.

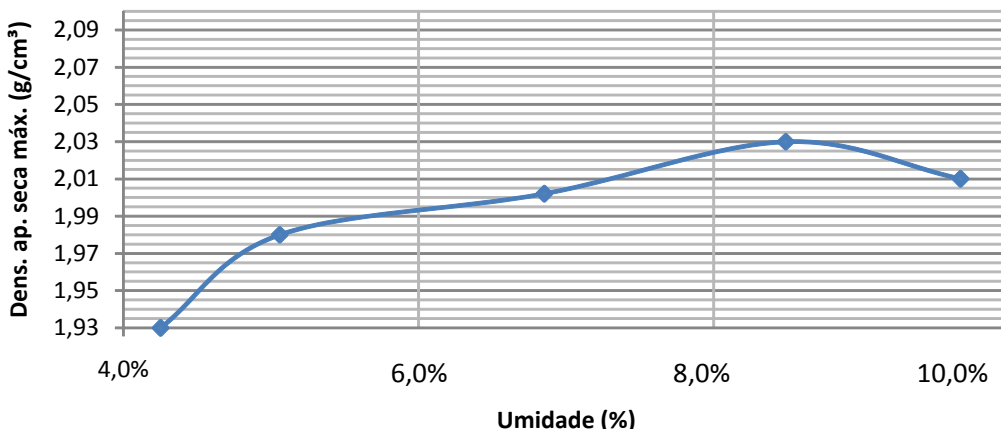
UNIPAC. **Mecânica dos solos – Equipamentos de compactação**. Universidade Presidente Antônio Carlos. Ipatinga, 2009.

**APÊNDICES**


## APÊNDICE A – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA M1

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA Centro de Ciências Tecnológicas Núcleo Tecnológico de Engenharia	
---	---

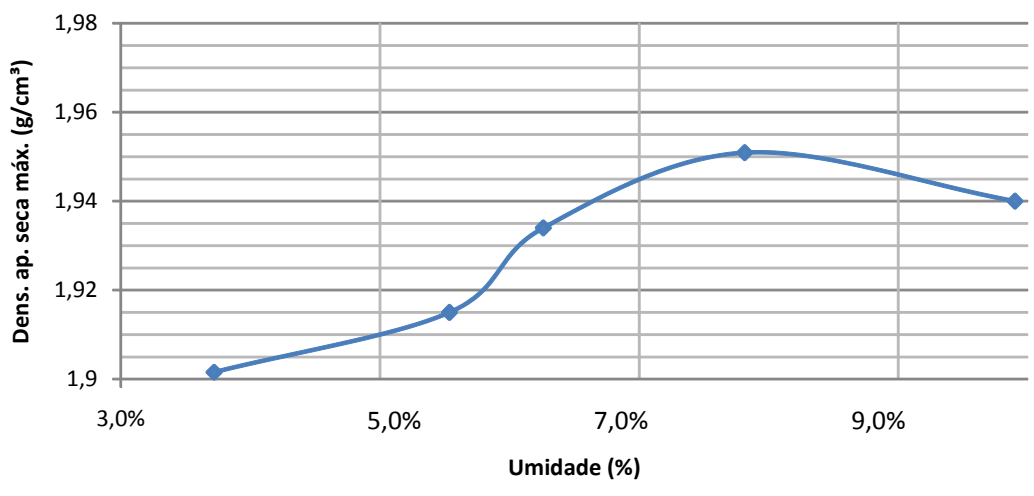
## ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Energia de Compactação		Umidade Ótima			
Peso da Amostra (g)		Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )			
<b>Dados da Compactação</b>					
Nº do Molde					
Volume do Corpo de Prova (cm <sup>3</sup> )	2062,611	2060,5	2063,1	2062,2	2060,9
Peso do Molde (g)	4864,7	4842,175	4865,85	4847,13	4843,11
Peso do Molde + Solo (g)	9020,4	9125,48	9274,9	9382,39	9409,65
Nº da Cápsula	42	47	55	10	s/n
Peso da Cápsula (g)	17,33	17,55	17,38	18,12	14,02
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	47,25	66,15	58,4	61,71	37,95
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	46,03	63,81	55,77	58,3	35,84
Umidade (%)	4,30%	5,10%	6,90%	8,50%	9,70%
Peso Especifico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,014776	2,078773	2,137194	2,199057	2,215881
Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm <sup>3</sup> )	1,93	1,98	2,002	2,03	2,01
<b>Curva de Compactação</b>					
<b>M1</b>					
					
Obra:	Área:		Data:		
Observações:	77% de solo + 20% de RAP + 3% de cimento			Elaborado por:	


## APÊNDICE B – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA M2

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA Centro de Ciências Tecnológicas Núcleo Tecnológico de Engenharia	
---	---

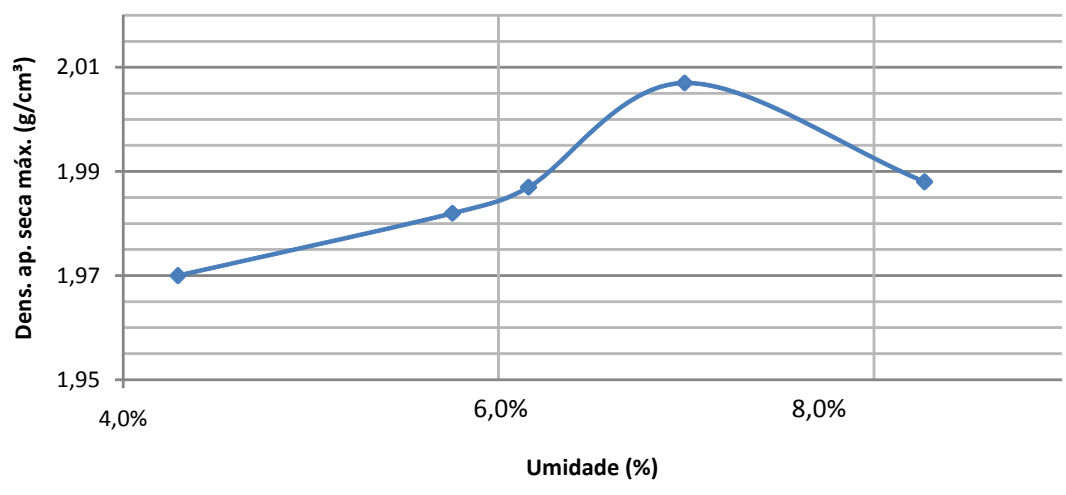
### ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Energia de Compactação		Umidade Ótima
Peso da Amostra (g)		Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Dados da Compactação</b>		
Nº do Molde		
Volume do Corpo de Prova (cm <sup>3</sup> )	2053,54	2062,611
Peso do Molde (g)	4257,4	4864,7
Peso do Molde + Solo (g)	8307,8	9031,99
Nº da Cápsula	27	39
Peso da Cápsula (g)	19,48	17,33
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	32,58	47,45
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	32,11	45,87
Umidade (%)	3,70%	5,50%
Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,972399	2,020414
Peso Específico Aparente Sec. (g/cm <sup>3</sup> )	1,9016	1,915
<b>Curva de Compactação</b>		
<b>M2</b>		
		
Obra:	Área:	Data:
Observações: 57 % de solo + 40% de RAP + 3% de cimento		Elaborado por:


## APÊNDICE C – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA M3

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA Centro de Ciências Tecnológicas Núcleo Tecnológico de Engenharia	
---	---

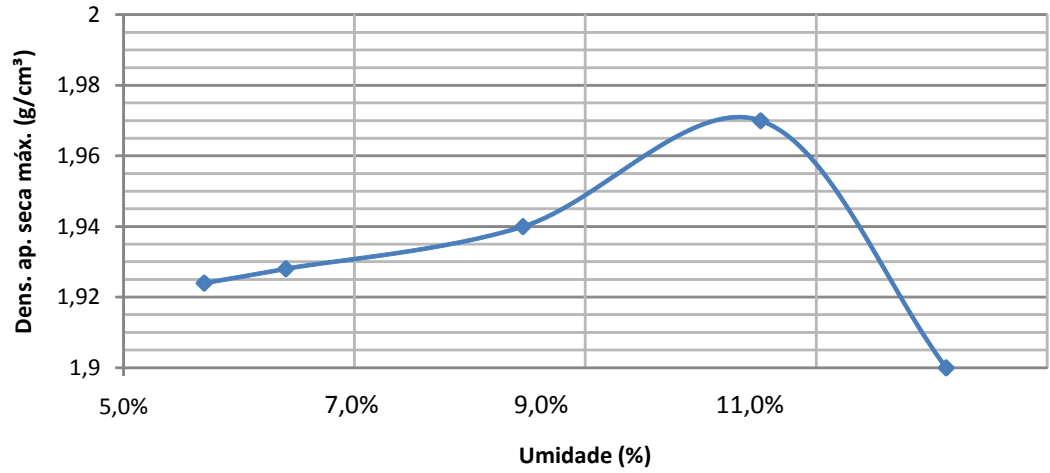
## ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Energia de Compactação		Umidade Ótima	
Peso da Amostra (g)		Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	
<b>Dados da Compactação</b>			
Nº do Molde			
Volume do Corpo de Prova (cm <sup>3</sup> )	2062,611	2053,4	2060,9
Peso do Molde (g)	4864,7	4257,4	4843,11
Peso do Molde + Solo (g)	9115,2	8564,41	9191,61
Nº da Cápsula	27	55	123
Peso da Cápsula (g)	19,45	17,45	15,88
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	44,97	45,02	49,66
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	43,92	43,52	47,7
Umidade (%)	4,30%	5,80%	6,20%
Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,060738	2,097536	2,110238
Peso Específico Aparente Sec. (g/cm <sup>3</sup> )	1,97	1,982	1,987
<b>Curva de Compactação</b>			
<b>M3</b>			
			
Obra:	Área:	Data:	
Observações:	Elaborado por:		
42% de solo + 55% de RAP + 3% de cimento			

## APÊNDICE D – PLANILHA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA M4

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA Centro de Ciências Tecnológicas Núcleo Tecnológico de Engenharia	
---	---

### ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Energia de Compactação		Umidade Ótima
Peso da Amostra (g)		Densidade Máxima (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Dados da Compactação</b>		
Nº do Molde		
Volume do Corpo de Prova (cm <sup>3</sup> )	2062,611	2060,5
Peso do Molde (g)	4864,7	4842,1
Peso do Molde + Solo (g)	9059,7	9070,76
Nº da Cápsula	27	39
Peso da Cápsula (g)	17,4	17,32
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	51,55	56,36
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	49,96	54,01
Umidade (%)	5,70%	6,40%
Peso Específico Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,03383	2,051962
Peso Específico Aparente Sec. (g/cm <sup>3</sup> )	1,924	1,928
<b>Curva de Compactação</b>		
<div style="text-align: center;"> <h3>M4</h3>  </div>		
Obra:	Área:	Data:
Observações:	Elaborado por:	
97% solo + 3% de cimento		



