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

ANA CAROLINE ROSA MATOS

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

São Luís
2018

ANA CAROLINE ROSA MATOS

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.ª Drª Maria Terezinha de Medeiros Coelho.

São Luís

2018

Matos, Ana Caroline Rosa.

Estabilização de solos com utilização de revestimento asfáltico fresado em camadas de pavimentos / Ana Caroline Rosa Matos. – São Luís, 2018.

138f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

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

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

CDU 625.85

ANA CAROLINE ROSA MATOS

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06 / 12 / 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof.ª Dr.ª Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)
Doutora em Urbanismo
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana
Doutor em Engenharia de Transportes
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Fernando Jorge Cutrim Demétrio
Doutor em Engenharia de Produção
Universidade Estadual do Maranhão

A Deus, pois sem ele não teria forças para essa longa jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Deus, por ter me dado força e por ter me iluminado nos momentos mais difíceis durante o caminho que percorri até chegar ao final dessa jornada.

Agradecer minha família em um todo, por ter me apoiado nessa fase tão importante da minha vida, mas principalmente a meus pais, Elizabeth e José Cristiano, por terem me dado essa oportunidade incrível e por terem me criado para ser a pessoa que sou hoje.

Agradecer também meus irmãos, Ana Vitória e Cristiano Neto, e minha prima, Amanda, que estão presentes no meu dia-a-dia e que sei que posso contar para tudo. Além de tudo, agradecer aos meus amigos e colegas que caminharam comigo e me ajudaram na realização desse sonho, em especial Davvi Heluy pelo total apoio durante toda a etapa da realização dessa pesquisa.

Não posso deixar de agradecer também a minha professora e orientadora, Maria Terezinha e ao professor Walter, pela paciência e compreensão, que tornaram possível a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Estabilização é uma prática comum na engenharia civil quando se fala em melhorar características de solos, por isso a presente pesquisa visa realizar a estabilização de solos com utilização de resíduo asfáltico fresado para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. A fase inicial do projeto introduz a pesquisa e expõe o objetivo da mesma. Em seguida é apresentado todo o referencial teórico utilizado no seu desenvolvimento, mostrando todos os conceitos utilizados. No terceiro capítulo é detalhada a metodologia de ensaio utilizada, os ensaios realizados e seus procedimentos. Logo depois vem a apresentação dos resultados obtidos, classificando-os como satisfatórios ou não. Por fim, a conclusão da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros. Inicialmente foram propostas misturas de solo com material fresado em diversas proporções, porém o resultado não foi satisfatório o suficiente para a utilização em bases de pavimento, sendo necessária um outro método de estabilização para atingir tal objetivo. Buscando uma outra solução, foi utilizada a cal como material aglutinante para realização de estabilização química do solo. Foram testadas misturas de solo – cal e solo – resíduo asfáltico fresado – cal. Os resultados da mistura solo - cal foram inconclusivos, porém o da mistura solo – resíduo asfáltico fresado – cal obtiveram melhores resultados, podendo ser utilizado em bases de pavimentos com tráfego leve. O projeto mostra que há a viabilidade de utilização de resíduo asfáltico fresado na estabilização de solos para camadas de pavimentos, sendo necessários estudos mais aprofundados para sua melhor aplicação.

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

ABSTRACT

Stabilization is a common conduct in civil engineering when it comes to making a soil resource, so the present research aims to do a stabilization of soils with the use of asphaltic residue for use in base layers and sub-base of pavements. The initial phase of the project is a research and exposes the goal. Next, the theoretical reference used in its development is presented, showing all the concepts used. The third section is the closed method, assayed as described and its procedures. Next comes a presentation of the results, classifying them as satisfactory or not. Finally, the conclusion of the research and the suggestions for future work. Initially, the mixtures of soil with milled material in varied proportions, however the result was not satisfactory for the use of floor bases, being necessary another method of fixation to reach such objective. Looking for another solution, it was used as binder material for the accomplishment of chemical stabilization of the soil. Mixtures of soil - lime and soil - asphalt milled - lime residue were tested. The salts of the soil - lime mixture were inconclusive, but that of the mixture soil - asphaltic residue milled - lime obtained the results, they are used in pavement bases with the light level. The project shows that there is a viability of using asphaltic residue in the stabilization of soils for layers of pavements, further studies are needed for its better aplication.

Keywords: Pavements, soil stabilization, milling asphalt residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção do pavimento.....23
Figura 2 - Seção tipo para pavimento flexível 25
Figura 3 - Seção tipo para pavimento rígido 26
Figura 4: Seção tipo para pavimento semi-rígido.....26
Figura 5: Fresagem à frio 27
Figura 6: Fresagem à Quente 28
Figura 7: Tambor para: (a)fresagem padrão, (b)fresagem fina e (c)microfresagem..29
Figura 8: Revestimento Asfáltico após Fresagem Padrão 30
Figura 9: Revestimento Asfáltico após Fresagem Fina 30
Figura 10: Revestimento Asfáltico após Microfresagem 31
Figura 11: Máquinas fresadoras de pequeno porte.....32
Figura 12: Máquinas fresadoras de médio porte 33
Figura 13: Máquinas fresadoras de grande porte.....34
Figura 14: Tipos de solos-agregados 36
Figura 15: Local de coleta da amostra de solo.....42
Figura 16: Local de coleta da amostra de solo.....43
Figura 17: (a) Local de coleta da amostra e (b) acondicionamento do material coletado em baldes e sacos de ráfia 43
Figura 18: (a) Laboratório de Solos e (b) Pavimentação e material armazenado 44
Figura 19: Local de coleta do RAP. 45
Figura 20: Imagem da máquina fresadora e caminhão caçamba utilizados no procedimento.....45
Figura 21: Detalhe do cilindro da máquina fresadora.....45
Figura 22: (a), (b) e (c)Imagens do Pavimento fresado e (d) fresagem resultante....46
Figura 23: Cal hidratada utilizada na pesquisa.....47
Figura 24: Simbologia das misturas 48
Figura 25: Sequência do ensaio.....51
Figura 26: (a) Esquema para ensaio de perda de massa por imersão e (b), (c) sequência do ensaio realizado.....53
Figura 27: (a) Série de Peneiras utilizada no ensaio e (b) peneiramento da amostra 57
Figura 28: Sequência do ensaio de equivalente de areia.....61

Figura 29: Sequência do ensaio de limite de plasticidade.....63
Figura 30: Aparelho utilizado no ensaio 64
Figura 31: Tabela para classificação pelo método TRB. 66
Figura 32: Máquina utilizada no ensaio.....68
Figura 33: (a) Material antes e (b) depois do ensaio com a carga abrasiva 69
Figura 34: (a) amostra após peneiramento e (b) em processo de secagem na estufa 69
Figura 35: Sequência de etapas do ensaio 70
Figura 36: Pesagem da amostra submersa em água.....70
Figura 37: (a) Frasco Chapman com água até a marca de 200 cm³ e frasco Chapman com agregado miúdo (b) do solo e (c) do rap 72
Figura 38: (a) Amostra total a ser peneirada e (b) frações após peneiramento 73
Figura 39: (a) Grãos de cada fração prontos para homogeneização e (b) realização do quarteamento 74
Figura 40: (a) Amostra resultante do quarteamento e (b) medição do agregado.....74
Figura 41: Classificação dos grãos 75
Figura 42: Preparação da amostra.....75
Figura 43: Etapas do ensaio.....76
Figura 44: Amostra de material fresado no prato do centrifugador para realização do ensaio.....77
Figura 45: (a) Prato com papel filtro e (b) aparelho centrifugador fechado e pronto para início do ensaio 78
Figura 46: Agregado após ensaio de extração de betume.....79
Figura 47: (a) Molde cilíndrico, colarinho, base metálica e (b) disco espaçador 80
Figura 48: Sequência de procedimentos do ensaio 82
Figura 49: Corpo de prova com pesos anelares de sobrecarga e extensômetro 83
Figura 50: Corpos de prova imersos em água 83
Figura 51: Realização do ensaio de penetração na máquina CBR-Marshall automática.....84
Figura 52: Material pesado e pronto receber umidade para moldagem de corpo de prova 86
Figura 53: Soquete e molde utilizados no ensaio.....87
Figura 54: (a) Desmoldagem do corpo de prova e (b) armazenamento em sacos para posterior cura 87

Figura 55: Cura dos corpos de prova em câmara úmida 88
Figura 56: Rompimento do corpo de prova: (a) rompimento utilizando máquina de ruptura e (b) corpo de prova fissurado após ensaio. 89
Figura 57: Tentativa de moldagem do solo 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados do ensaio de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão.....90
Tabela 2: Composição do solo conforme ABNT NBR 6502:1995. 92
Tabela 3: Enquadramento das misturas com granulometria do RAP Virgem 93
Tabela 4: Enquadramento das misturas com granulometria do RAP após extração do ligante.....94
Tabela 5: Resultado do ensaio de equivalente de areia.....95
Tabela 6: Resultados dos limites de consistência 97
Tabela 7: Coeficientes para classificação do solo.....98
Tabela 8: Resultado do ensaio de abrasão a "Los Angeles".....98
Tabela 9: Resultado da massa específica do solo 99
Tabela 10: Resultado da massa específica do agregado miúdo do RAP.....99
Tabela 11: Resultado da densidade aparente e absorção do agregado graúdo do RAP.....99
Tabela 12: Quantidade de cada tipo de grão conforme a sua forma.....99
Tabela 13: Média das dimensões dos grãos.....100
Tabela 14: Resultado do ensaio de angularidade 100
Tabela 15: Resultado do ensaio de teor de ligante de asfáltico 100
Tabela 16: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S100 101
Tabela 17: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S80RAP20 102
Tabela 18: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S60RAP40 103
Tabela 19: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S45RAP55 104
Tabela 20: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S35RAP65 105
Tabela 21: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S25RAP75 106
Tabela 22: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S96CAL4.....107
Tabela 23: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S43RAP53CAL4 108
Tabela 24: Resumo dos resultados do ensaio de compactação obtidos.....109
Tabela 25: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S100 111
Tabela 26: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S80RAP20.....112
Tabela 27: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S60RAP40.....113
Tabela 28: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S45RAP55.....114

Tabela 29: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S35RAP65 115
Tabela 30: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S25RAP75 116
Tabela 31: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S43RAP53CAL4 117
Tabela 32: tabela comparativa entre os resultados obtidos 118
Tabela 33: Resultado do ensaio de resistência a compressão simples 120
Tabela 34: Resultados obtidos por Silva (2013) 121
Tabela 35: Resultados obtidos por Barros (2013) 121
Tabela 36: Resultados obtidos por Dias, Pinto, Costa, (2015) 121
Tabela 37: medidas do ensaio de índice de forma 131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificações para sub-base.....39
Quadro 2 : Faixas granulométricas para bases estabilizadas granulometricamente39
Quadro 3: Parâmetros estabelecidos por DNIT 141/2010 para bases estabilizadas granulometricamente.....40
Quadro 4: Composição das misturas da pesquisa.....48
Quadro 5: Tipos de solos e sua utilização.....55
Quadro 6: Classificação granulométrica do solo.....56
Quadro 7: Peso da amostra conforme tamanho dos agregados.....73
Quadro 8: Frações do agregado para ensaio.....76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curvas resultantes do ensaio de Mini- MCV 50
Gráfico 2: Curvas de compactação Mini-MCV 50
Gráfico 3: Gráfico para classificação de solos pela metodologia MCT 54
Gráfico 4: Curvas granulométricas de acordo com a graduação 58
Gráfico 5: Estados de consistência e limites de consistência 62
Gráfico 6: Linha de escoamento 65
Gráfico 7: Classificação do solo utilizado na pesquisa 90
Gráfico 8: Gráfico de deformabilidade para obter o valor do Mini-MCV 91
Gráfico 9: Curva granulométrica do solo 92
Gráfico 10: Curva granulométrica do material fresado 92
Gráfico 11: Curvas granulométricas das misturas enquadradas com RAP virgem 94
Gráfico 12: Curvas granulométricas das misturas enquadradas com RAP após extração do ligante 95
Gráfico 13: Curva de compactação da mistura S100 101
Gráfico 14: Curva de compactação da mistura S80RAP20 102
Gráfico 15: Curva de compactação da mistura S60RAP40 103
Gráfico 16: Curva de compactação da mistura S45RAP55 104
Gráfico 17: Curva de compactação da mistura S35RAP65 105
Gráfico 18: Curva de compactação da mistura S25RAP75 106
Gráfico 19: Curva de compactação da mistura S96CAL4 107
Gráfico 20: Curva de compactação da mistura S43RAP53CAL4 108
Gráfico 21: Comparação entre os resultados das misturas 109
Gráfico 22: Comparação entre as curvas de compactação obtidas 110
Gráfico 23: Curva de CBR para mistura S100 111
Gráfico 24: Curva de CBR para a mistura S80RAP20 112
Gráfico 25: Curva de CBR para a mistura S60RAP40 113
Gráfico 26: Curva de CBR para a mistura S45RAP55 114
Gráfico 27: Curva de CBR para a mistura S35RAP65 115
Gráfico 28: Curva de CBR para a mistura S25RAP75 116
Gráfico 29: Curva de CBR para a mistura S25RAP75 117
Gráfico 30: Curva de CBR para todas as misturas 118
Gráfico 31: Comparação entre os pontos de CBR máximo encontrados 119

Gráfico 32: Resultado do Ensaio de Resistência a Compressão Simples 120
Gráfico 33: Modelo de Curva Pressão x Penetração 136
Gráfico 34: Curva Pressão x Penetração para o molde 1 136
Gráfico 35: Curva Pressão x Penetração para o molde 2 137
Gráfico 36: Curva Pressão x Penetração para o molde 3 137
Gráfico 37: Curva Pressão x Penetração para o molde 4 138
Gráfico 38: Curva Pressão x Penetração para o molde 5 138

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 OBJETIVO 20
1.1.1 Objetivo Geral 20
1.1.2 Objetivos Específicos 20
1.2 JUSTIFICATIVA 21
2 REFERENCIAL TEÓRICO 22
2.1 PAVIMENTO 22
2.1.1 Camadas do Pavimento 22
2.1.1.1 Subleito 23
2.1.1.2 Regularização do Subleito 23
2.1.1.3 Reforço do Subleito 23
2.1.1.4 Sub-base 24
2.1.1.5 Base 24
2.1.1.6 Revestimento 25
2.1.2 Tipos de Pavimentos 25
2.1.2.1 Pavimentos Flexíveis 25
2.1.2.2 Pavimentos Rígidos 25
2.1.2.3 Pavimentos Semi-rígidos 26
2.2 FRESAGEM DE PAVIMENTOS 26
2.2.1 Fresagem à Frio 27
2.2.2 Fresagem à Quente 27
2.2.3 Classificação da Fresagem de Pavimentos 28
2.2.3.1 Quanto a Espessura de Corte 28
2.2.3.1.1 Fresagem Superficial 28
2.2.3.1.2 Fresagem Rasa 29
2.2.3.1.3 Fresagem Profunda 29
2.2.3.2 Quanto a Rugosidade Resultante na Pista 29
2.2.3.2.1 Fresagem Padrão 30
2.2.3.2.2 Fresagem Fina 30
2.2.3.2.3 Microfresagem 31
2.2.4 Equipamentos de Fresagem 31
2.2.4.1 Equipamentos de Pequeno Porte 31

2.2.4.2 Equipamentos de Médio Porte 32
2.2.4.3 Equipamentos de Grande Porte 33
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS 34
2.3.1 Estabilização Mecânica 35
2.3.2 Estabilização Física 37
2.3.3 Estabilização Química 37
2.4 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMÉTRICAMENTE 38
2.5 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS QUIMICAMENTE COM CAL 40
2.5.1 Cal 40
2.5.2 Estabilização de solos com cal 41
3 METODOLOGIA 42
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS 42
3.1.1 Solo 42
3.1.2 RAP 44
3.1.3 Cal 46
3.2 MISTURAS 47
3.3 ENSAIOS REALIZADOS 48
3.3.1 Classificação MCT 48
3.3.1.1 Compactação Mini-MCV 49
3.3.1.2 Perda de Massa por Imersão 52
3.3.1.3 Classificação dos Solos pela Metodologia MCT 53
3.3.2 Análise Granulométrica 55
3.3.3 Equivalente de areia 59
3.3.4 Limites de Consistência 61
3.3.4.1 Limite de Plasticidade (LP) 62
3.3.4.2 Limite de Liquidez (LL) 63
3.3.4.3 Índice de Plasticidade (IP) 65
3.3.5 Classificação do solo pelo método TRB (antigo HRB) 66
3.3.6 Abrasão “Los Angeles” 67
3.3.7 Densidade e Absorção 69
3.3.8 Índice de Forma 72
3.3.9 Angularidade 75
3.3.10 Teor de Ligante asfáltico 77
3.3.11 Ensaio de Compactação 79

3.3.12 Índice de Suporte Califórnia (ISC)....82
3.3.13 Resistência a Compressão Simples....85
4 RESULTADOS....90
4.1 RESULTADO DOS ENSAIOS....90
4.1.1 Classificação MCT....90
4.1.2 Análise Granulométrica....91
4.1.3 Equivalente de Areia (EA)....95
4.1.4 Limites de consistência....96
4.1.4.1 Limite de plasticidade....96
4.1.4.2 Limite de liquidez....96
4.1.4.3 Índice de plasticidade....97
4.1.5 Classificação do solo pelo método TRB (antigo HRB)....97
4.1.6 Abrasão "Los Angeles"....98
4.1.7 Densidade e Absorção....98
4.1.8 Índice de Forma....99
4.1.9 Angularidade....100
4.1.10 Teor de Ligante de Asfáltico....100
4.1.11 Ensaio de compactação....101
4.1.12 Índice de Suporte Califórnia....110
4.1.13 Resistência a Compressão Simples....119
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS....120
5 CONCLUSÃO....123
REFERÊNCIAS....125
APÊNDICES....130

1 INTRODUÇÃO

É notável a importância da construção civil no desenvolvimento de regiões, tendo participação de 6,2% no PIB do Brasil no ano de 2016, conforme a Federação das Indústrias do Distrito Federal (FIBRA). Também nesse ano tivemos um total de R$318,7 bilhões em incorporações, obras e serviços da construção, e dois milhões de pessoas ocupadas na área da atividade de construção (IBGE, 2016).

Contudo, segundo Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (ABRECON), a indústria da construção civil é também responsável pelo consumo de grande quantidade dos recursos naturais, sendo estimado que 50% dos recursos naturais extraídos da natureza são utilizados em serviços relacionados à atividade de construção civil. Tal setor também necessita de materiais com especificações técnicas conforme as diretrizes normativas, o que torna esses itens mais escassos e de alto valor aquisitivo.

Outro agravante é que, as matérias primas da construção civil, são, na maioria das vezes, recursos naturais finitos, ou seja, não se renovam ou demoram muito tempo para se desenvolverem. Portanto, uma corrente sobre o desenvolvimento sustentável vem ganhando força e propõe a utilização de tecnologias que estejam em conformidade com as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras (BOURDEAU, 2000).

Consequentemente tem-se grande geração de resíduos por parte desse setor e conforme o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) no art. 2° da resolução n°307 de 05 de julho de 2002, a definição para os resíduos da construção civil é:

> [...] são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

Como citado acima, o pavimento asfáltico se enquadra dentro do conceito proposto pelo CONAMA. O RAP – Reclaimed asphalt pavement - é o resíduo de um processo chamado de fresagem que é o corte, através de máquinas, de parte ou todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de uma via, podendo atingir outras

camadas (BERNUCCI et al., 2010). Esse processo pode ser realizado a quente ou a frio ou de uma ou mais camadas do pavimento, podendo ser realizado o corte de camadas finas, atingindo principalmente material asfáltico ou de camadas mais espessas que irão atingir o material asfáltico e as camadas granulares.

Com base no cenário atual e verificada a necessidade de solucionar a problemática da geração de grande quantidade de resíduos na construção civil e escassez de matérias primas, surgiram novas técnicas para construção civil que visam a reutilização de resíduos na estabilização de solos

Segundo Sachet (2008), a utilização do material fresado nas camadas de rodagem como agregado ocasionará vantagem econômica e ambiental e é com esse objetivo que serão realizados estudos para verificar a viabilidade da utilização do material fresado oriundo do procedimento de fresagem na Av. Jose Sarney, nas proximidades dos bairros Tiririca, Retiro Natal e Jardim São Cristóvão.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo estudar a estabilização de solos para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos. Nesse processo será utilizado RAP como agregado para estabilização granulométrica, buscando atingir características superiores ao do solo natural.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a estabilização de solos em camadas de pavimentos com utilização de revestimento asfáltico fresado.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Estudar as características físicas e mecânicas do solo natural;
b) Estudar as características físicas e mecânicas do RAP;
c) Estudar as características físicas e mecânicas do solo estabilizado com RAP;
d) Estudar os traços adequados para misturas propostas;
e) Comparar os resultados obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A engenharia rodoviária é um importante quesito a ser considerado quando pensamos no crescimento socioeconômico do país, interligando regiões, possibilitando o transporte de mercadorias, alimentos e pessoas, entre outras funções. O crescimento de cidades brasileiras exige investimentos em infraestrutura e crescente transporte de massa (MEDINA, MOTTA, 2015).

Contudo, esse setor necessita de grandes recursos naturais de difícil obtenção, seja pelo valor aquisitivo ou pela dificuldade de encontra-lo.

É uma modalidade que possui uma vida útil e necessita de reparos ao longo do tempo, logo será necessária a utilização de novos materiais para sua manutenção. Por isso, surge a necessidade de ser estudada a reutilização de resíduos de materiais durante obras referente a engenharia rodoviária.

No presente projeto de monografia, será estudada a reutilização de resíduos do processo de fresagem na estabilização de solos para seu posterior uso em camadas estruturais de pavimentos, barateando os custos de uma obra, tornando-a tornando mais viável, tanto economicamente quando ambientalmente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PAVIMENTO

Pode-se entender como pavimento toda estrutura que é construída sobre a terraplenagem e tem a função de resistir e combater os esforços verticais provenientes do tráfego, melhorar os níveis de conforto e segurança em relação as condições de rolamento e resistir ao desgaste (esforços horizontais), tornando a superfície de rolamento mais durável (SENÇO, 2007).

O pavimento é composto por uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas que ficam localizadas após a cota final da terraplenagem (BERNUCCI et al., 2010).

As camadas do pavimento interagem entre si, originando a rigidez do pavimento. Essa, por sua vez, depende da rigidez de cada camada, o que dependerá, também, da espessura da mesma (BERNUCCI et al., 2010). A rigidez resultante da interação entre as camadas é utilizada na classificação dos pavimentos em três tipos: pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e pavimentos semi-rígidos (DNIT, 2006).

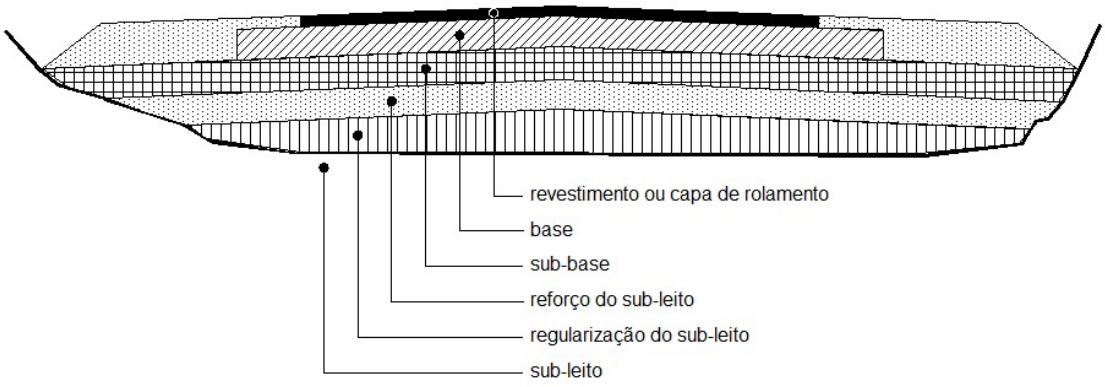
Para o dimensionamento das espessuras das camadas existem vários métodos, sendo mais comum o método AASHTO e DNER para pavimentos flexíveis, e método DNIT para pavimentos rígidos.

2.1.1 Camadas do Pavimento

Segundo DNIT (2006), a seção transversal do pavimento é composta por subleito, regularização do sub-leito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Na figura 1 temos a ilustração de uma seção transversal ilustrando as camadas citadas.

Figura 1: Seção do pavimento



Fonte: Faleiros (2005) apud Ribeiro (2017).

2.1.1.1 Subleito

Segundo BERNUCCI et al. (2010), o subleito é a fundação do pavimento, sendo o local onde as camadas do mesmo são assentadas. É uma camada com espessura infinita, porém é considerada a sua parte mais superficial, uma vez que os esforços reduzem com o aumento da profundidade, ou seja, em grandes profundidades chega-se ao esforço nulo (SENÇO, 2007).

Os materiais utilizados nessa camada devem possuir Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou CBR – Califórnia Bearing Ratio > 2% e expansão ≤ 2% (DNIT, 2006).

2.1.1.2 Regularização do Subleito

Não é considerada uma camada propriamente dita do pavimento, sendo utilizada apenas para dar a forma, transversal e longitudinal, indicada no projeto. (DNIT, 2006). Essa camada tem a função de tornar o perfil, longitudinal e transversal, conforme as normas especificadas, isto é, transpor as características geométricas do projeto, com espessura variável (SENÇO, 2007).

2.1.1.3 Reforço do Subleito

Camada de espessura constante e que pode ser utilizada ou não, resultando da análise das cargas solicitantes e das características geotécnicas do subleito. O material utilizado deve possuir características geotécnicas de melhor

qualidade que o material do subleito, porém inferiores às características das camadas superiores (DNIT, 2006).

Segundo DNIT (2006), devemos utilizar, para essa camada, materiais que possuem CBR maior que o do subleito e expansão ≤ 1%.

2.1.1.4 Sub-base

Essa camada é utilizada quando não é aconselhável o assentamento direto da base sobre a camada de regularização ou reforço de subleito (SENÇO, 2007). Também é utilizada nos casos onde é necessária uma camada de base com espessuras elevadas, sendo aconselhável dividi-la em duas camadas, sendo a sub-base com menor custo (BALBO, 2007).

Segundo SENÇO (2007), as características dos materiais de sub-base devem ser de qualidade superior as do reforço. Seguindo as recomendações contidas no manual de pavimentação (DNIT, 2006), os matérias de sub-base devem ter CBR ≥ 20%, índice de Grupo (IG) = 0 e expansão ≤ 1 %.

2.1.1.5 Base

É camada localizada logo após o revestimento, sendo uma das camadas mais importantes devido a suas funções. Segundo SENÇO (2007, p.20):

> [...] é a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo esforço do subleito.

Os materiais utilizados nessa camada devem possuir CBR ≥ 80% para tráfegos pesados ($N > 5 * 10^6$) ou CBR ≥ 60% tráfegos leves e médios ($N \leq 5 * 10^6$), expansão ≤ 0,5%, limite de liquidez ≤ 25% e índice de plasticidade ≤ 6%. Na ocorrência de limite de liquidez superior a 25% e/ou índice de plasticidade maior que 6%, o material poderá ser utilizado desde que possua equivalente de areia > 30%.

2.1.1.6 Revestimento

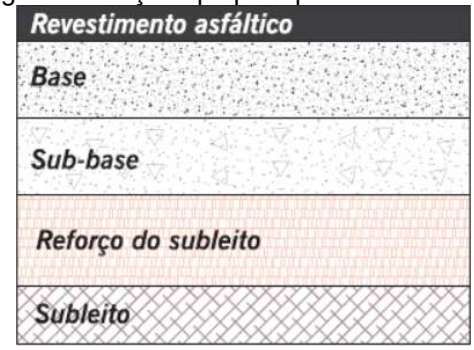
Conforme BERNUCCI et al., (2010) é a camada que recebe diretamente os esforços oriundos do tráfego, os transfere para as camadas inferiores, melhora as condições de rolamento e impermeabiliza quanto possível. Existem uma grande diversidade de revestimentos que podem ser utilizados, como os asfálticos, os de concreto, CPA, SMA, entre outros.

2.1.2 Tipos de Pavimentos

2.1.2.1 Pavimentos Flexíveis

São aqueles em que a carga se distribui de forma equivalente em todas as camadas e tem deformação elástica em todas elas (DNIT, 2006). São geralmente ligados aos pavimentos asfálticos que possuem a camada de revestimento composta por revestimento asfáltico. Abaixo, na figura 2, tem-se a seção transversal de um pavimento do tipo flexível.

Figura 2 - Seção tipo para pavimento flexível



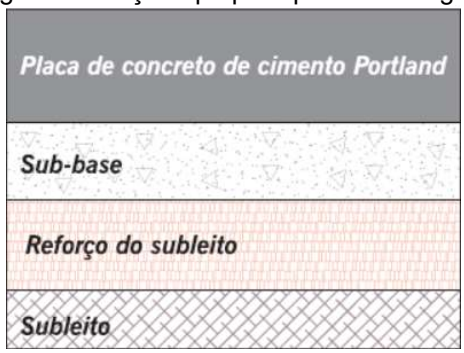
Fonte: Bernucci et al. (2010)

2.1.2.2 Pavimentos Rígidos

Representados por aqueles em que a camada de revestimento possui rigidez elevada em relação as camadas inferiores, logo acaba absorvendo boa parte das tensões oriundas do carregamento (DNIT, 2006). São representados pelos pavimentos com revestimento de concreto de cimento Portland, armado ou não. Na

figura 3 a seguir é apresentada a ilustração da seção transversal desse tipo de pavimento.

Figura 3 - Seção tipo para pavimento rígido



Fonte: Bernucci et al. (2010)

2.1.2.3 Pavimentos Semi-rígidos

Identificado por serem aqueles que possuem base cimentada a partir de algum aglutinante com propriedades cimentícias, como, por exemplo, um pavimento com uma camada de solo cimento e revestimento asfáltico (DNIT,2006). Esse tipo de pavimento possui a seção transversal conforme a figura 4 a seguir.

Figura 4: Seção tipo para pavimento semi-rígido

Fonte: Abada (2008).

2.2 FRESAGEM DE PAVIMENTOS

O termo fresagem está relacionado ao processo de desbaste ou corte de materiais ou peças por meio de engrenagens com movimento giratório continuo. Logo

a fresagem de pavimentos consiste na aplicação desta operação nas camadas dos pavimentos.

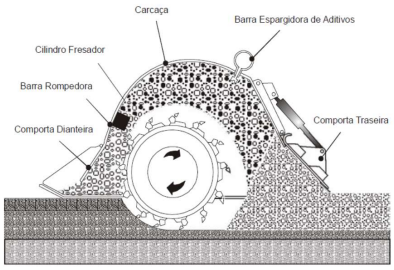
Segundo o Glossário de Termos Técnicos Rodoviários do DNIT (2017), a fresagem é o procedimento de desbaste da superfície asfáltica no processo de reciclagem do pavimento, podendo ocorrer na modalidade a frio ou a quente. Além dessas duas modalidades, o procedimento de fresagem pode ser classificado quanto a espessura de corte e quanto a rugosidade resultante na pista.

Esse procedimento é realizado quando se deseja realizar a recuperação funcional ou estrutural de pavimentos defeituosos ou mesmo quando é necessária a substituição total do revestimento do pavimento nos casos de mudança do tráfego da via.

2.2.1 Fresagem à Frio

Nessa modalidade acontece a realização do procedimento de fresagem na temperatura ambiente, ou seja, o pavimento é desbastado sem um pré-aquecimento. Como resultado tem-se a quebra de parte dos agregados durante a sua realização devido ao não aquecimento. Como consequência ocorre a alteração da curva granulométrica do material (BONFIM, 2011). Abaixo, na figura 5, temos a representação de como ocorre a fresagem na modalidade a frio.

Figura 5: Fresagem à frio



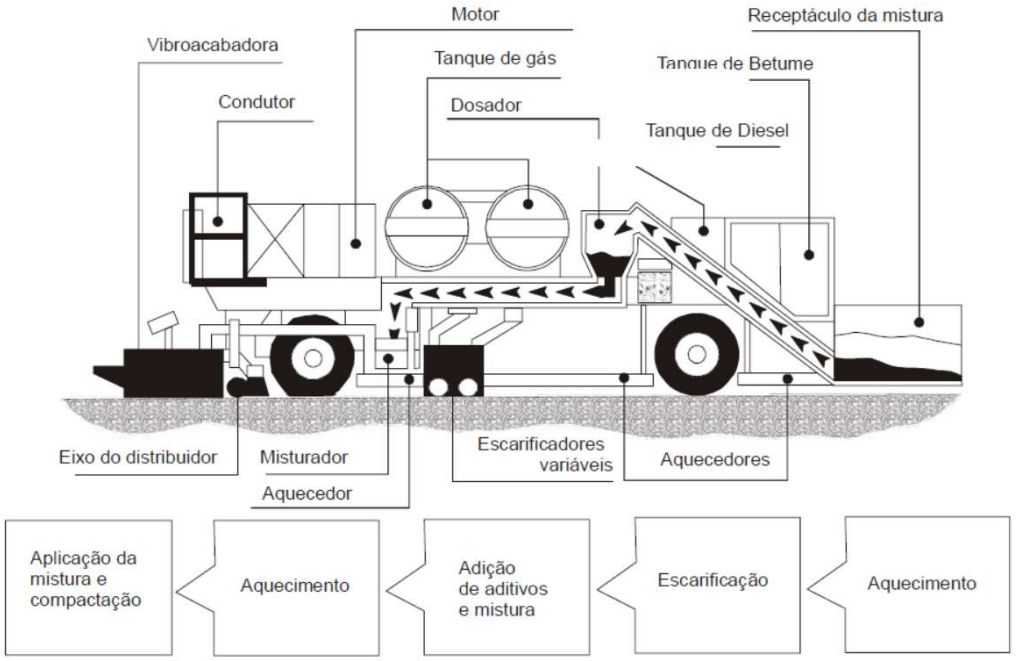
Fonte: DNIT (2006).

2.2.2 Fresagem à Quente

Consiste no procedimento de fresagem de pavimentos que são pré-aquecidos antes de passarem pelo desbaste, o que facilita o processo. Consequentemente ocorre a conservação da curva granulométrica dos materiais, uma vez que os agregados não são quebrados (BONFIM, 2011).

Na figura 6 temos a representação esquemática de como ocorre o procedimento de fresagem a quente.

Figura 6: Fresagem à Quente



Fonte: DNIT (2006).

2.2.3 Classificação da Fresagem de Pavimentos

2.2.3.1 Quanto a Espessura de Corte

As máquinas de fresagem realizam o procedimento de retirada do revestimento asfáltico por meio de espessuras controladas (DNIT, 2006). Nessa classificação a caracterização é feita conforme a espessura do pavimento que sofrerá o desbaste.

Para essa classificação tem-se: fresagem superficial, fresagem rasa e fresagem profunda.

2.2.3.1.1 Fresagem Superficial

É a técnica utilizada para corrigir pequenos defeitos existentes na superfície do pavimento (BARROS, 2013). É conhecida como fresagem de regularização e não

necessita de uma nova camada de revestimento após a sua realização (BONFIM, 2011).

2.2.3.1.2 Fresagem Rasa

Esse tipo já possui uma espessura superior a fresagem anterior, chegando a profundidade média de 5cm. A fresagem rasa realiza o desbaste na camada superior do revestimento, podendo chegar a camada de ligação (BONFIM, 2011).

Sua utilização é indicada em locais onde se deseja corrigir defeitos funcionais e remendos superficiais. Também é usada em vias onde o greide do pavimento deve ser mantido (BARROS, 2013).

2.2.3.1.3 Fresagem Profunda

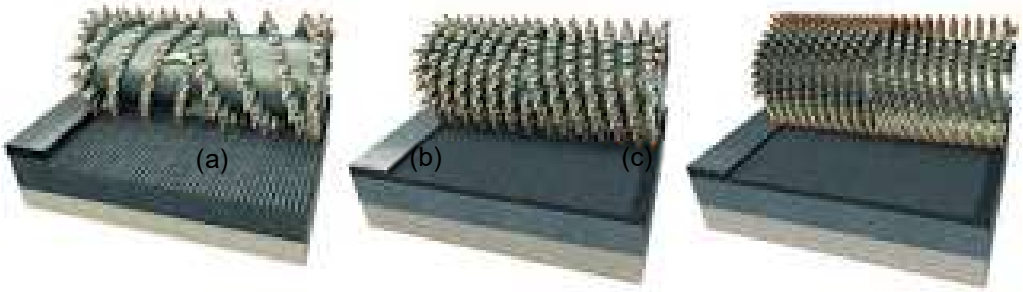
Tal modalidade é caracterizada pela fresagem ultrapassar a camada de revestimento, podendo atingir as camadas de base e sub-base (BONFIM, 2011).

É utilizada quando se deseja alterar o greide das vias ou quando é necessária recomposição da estrutura do pavimento (BONFIM, 2011).

2.2.3.2 Quanto a Rugosidade Resultante na Pista

A rugosidade, item classificatório dessa modalidade, é resultante do tipo de tambor utilizado na execução da fresagem. Quanto a rugosidade, a fresagem pode ser classificada em fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem (BONFIM, 2011). Na figura 7 temos a ilustração do tambor utilizado em cada tipo.

Figura 7: Tambor para: (a)fresagem padrão, (b)fresagem fina e (c)microfresagem



Fonte: Asfalto de qualidade. Disponível em: http://asfaltodequalidade.blogspot.com/.

2.2.3.2.1 Fresagem Padrão

É a fresagem resultante da utilização do tambor original dos equipamentos. A distância entre os dentes de corte é de 15mm e é utilizada nos casos onde é necessária aplicação de uma nova camada de revestimento. (BONFIM, 2011). Na figura 8 tem-se um exemplo de fresagem do tipo padrão.

Figura 8: Revestimento Asfáltico após Fresagem Padrão

Fonte: Bonfim, 2011.

2.2.3.2.2 Fresagem Fina

É a resultante da utilização de tambores com dentes de corte espaçados em aproximadamente 8mm, deixando a superfície fresada menos rugosa. Em alguns casos pode ser dispensada a necessidade de recolocação da camada de revestimento (BONFIM, 2011). Como exemplo de fresagem fina tem-se a figura 9.

Figura 9: Revestimento Asfáltico após Fresagem Fina

Fonte: Bonfim, 2011.

2.2.3.2.3 Microfresagem

Essa categoria é resultado da utilização de tambores que possuem dentes de cortes espaçados de 2 a 3mm. Remove uma camada muito fina do revestimento, sendo utilizada quando se deseja retirar sinalização horizontal das vias para posterior alteração. (BONFIM, 2011).

Essa modalidade dispensa a necessidade de aplicação de uma nova camada de revestimento e um exemplo pode ser visto na figura 10 a seguir.

Figura 10: Revestimento Asfáltico após Microfresagem

Fonte: Bonfim, 2011.

2.2.4 Equipamentos de Fresagem

As fresadoras de asfalto são máquinas que utilizam rolos especiais com pontas afiadas para processar o corte de parte ou de todo o revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2010)

Atualmente existem equipamentos de fresagem no Brasil de diversos fabricantes, tamanhos e modelos, atendendo as necessidades do mercado (BONFIM, 2011). Os equipamentos podem ser classificados quanto ao seu tamanho e geralmente a largura, em milímetros ou em centímetros, do cilindro fresador é a característica é apresentada no nome da máquina (BONFIM, 2011).

2.2.4.1 Equipamentos de Pequeno Porte

Segundo BONFIM (2011), são os aqueles utilizados para a fresagem de arremates em pavimentos, sendo utilizados em pontos localizados, como remendos, acabamentos, locais próximos a sarjetas, entre outros.

Apesar do tamanho reduzido, possuem correia transportadora para carregamento simultâneo do material fresado em caminhão basculante, exceto os modelos com cilindro com largura de 350 mm (BONFIM, 2011). Na figura 11 são mostradas duas máquinas de pequeno porte.

Figura 11: Máquinas fresadoras de pequeno porte

Fonte: Bonfim (2011).

2.2.4.2 Equipamentos de Médio Porte

Esse tipo de equipamento é utilizado na fresagem de locais de médio e grande porte (BONFIM, 2011). Possuem bom desempenho em fresagem com boas condições, onde não ocorrem muitas interrupções ou em ruas estreitas pela maior facilidade nas manobras e também apresentam correia transportadora com mesma função das máquinas de pequeno porte (BONFIM, 2011).

Como exemplo de máquinas fresadoras de médio porte, tem-se as apresentadas na figura 12.

Figura 12: Máquinas fresadoras de médio porte

Fonte: Bonfim (2011).

2.2.4.3 Equipamentos de Grande Porte

Conforme Bonfim (2011), são máquinas fresadores com cilindros maiores do que as de médio porte, sendo indicadas para fresagem de grandes áreas. São indicadas para locais sem muitas interferências, como ruas largas, avenidas e rodovias. Devido ao seu tamanho, são evitadas manobras, pois elas são de difícil realização e causam prejuízo na produtividade. Na figura 13 são expostas máquinas fresadoras de grande porte.

Figura 13: Máquinas fresadoras de grande porte

Fresadora PM-465,
da Caterpillar

Fresadora MP 2000, da Marini

Fresadora PL 2000 S,
da Dynapac

Fresadora W 1900, da Wirtgen

Fonte: Bonfim (2011).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Segundo DNIT (2006), entende que solo é toda matéria não consolidada ou parcialmente cimentada na superfície da Terra, sendo orgânica ou inorgânica. Também pode ser considerado todo material que pode ser escavado sem a necessidade de explosivos.

A sua origem está, em boa parte, no intemperismo das rochas, portanto, as suas características dependem dos minerais que as compõem. Tal aspecto é de grande importância para os estudos da pavimentação, uma vez que os solos precisam obedecer aos critérios de utilização especificados pelas normas rodoviárias (BRAJA, 2014).

Cada camada do pavimento possui especificações distintas para o material que será utilizado na sua composição. Sendo assim, devem respeitar as características exigidas pelas normas, conforme descrito nos itens 2.1.1.1 a 2.1.1.5. Contudo, segundo SARTORI (2015), “é de se esperar que os solos naturais não alcancem por si só valores altos de CBR, daí a necessidade de incorporar aditivos ao solo, para que este possa enfim ser empregado como base”.

Estabilização de solos é o procedimento onde as propriedades do solo são alteradas com o intuito de criar um material com as características exigidas pelo projeto (CRISTELO, 2001). Esse processo pode ocorrer de vários métodos, sendo classificado em estabilização mecânica, física e química (BARROS, 2013).

Os métodos de estabilização podem ser utilizados separadamente, porém, é comum a utilização de uma combinação de mais de um método para obtenção de melhores resultados. O tipo a ser utilizado dependerá do tipo de material disponível, das características que se deseja, da futura utilização do solo, das exigências do projeto e da viabilidade técnica e econômica de cada opção (BRITO, 2017).

2.3.1 Estabilização Mecânica

Segundo SOLIZ (2007), a estabilização mecânica é aquela em que ocorre a simples compactação dos solos ou até mesmo a estabilização granulométrica dos mesmos. A compactação é pela aplicação de sucessivas cargas com a finalidade de diminuir a porosidade, uma vez que o aumento da resistência mecânica dos solos está ligado a redução do volume de vazios do mesmo (BARROS, 2013).

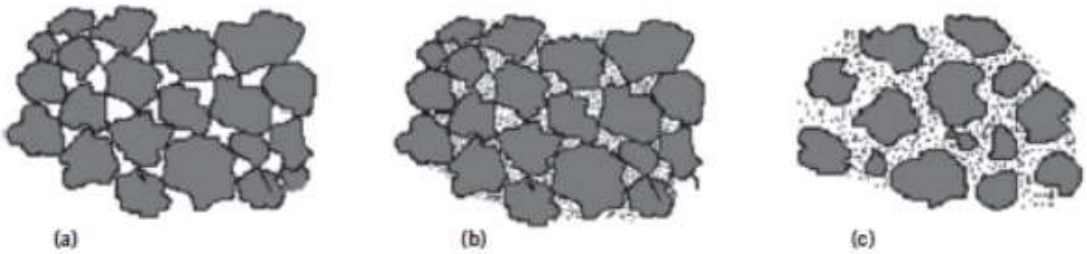
A compactação ocorre com uso de equipamento mecânicos em obras de grande porte ou com equipamentos manuais em obras menores, como valetas (PINTO; PREUSSLER, 2002). A utilização desse método é comum na execução de qualquer camada do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização (SARTORI, 2015).

Por outro lado, a estabilização mecânica por correção granulométrica ocorre com a melhoria das características do solo a partir da mistura de solos distintos, com o objetivo de obter material com as características exigidas (SANTOS, LIMA, BUENO, 1995).

Segundo (BERNUCCI et al., 2010), solos-agregados são misturas naturais ou britadas. Para Yoder e Witczak (1975) apud Bernucci et al. (2010), podemos dividir

os solos-agregados em três tipos, conforme a proporção entre agregados graúdos e agregados miúdos. A divisão proposta está demostrada na figura 14 a seguir:

Figura 14: Tipos de solos-agregados



Fonte: Yoder e Witczak (1975) apud Bernucci et al. (2010).

Para Yoder e Witczak (1975 apud Bernucci et al., 2010) as características de cada mistura são:

(a): contato grão-grão; baixa densidade, permeável, não suscetível a mudanças com a umidade ou congelamento; compactação difícil;

(b): finos preenchem os vazios, alta densidade, permeabilidade mais baixa que o tipo anterior, contato grão-grão, mais resistente que o tipo (a), menor deformabilidade e tem nível de dificuldade moderado para compactação;

(c): matriz de finos, contato grão-grão não é garantido, densidade mais baixa que o tipo (b), permeabilidade menor que o tipo (b) – chegando a ser impermeável em alguns casos, mistura é afetada pela variação de umidade e de fácil compactação.

Segundo Bernucci et al. (2010), as misturas do tipo (a) e (b) são as indicadas para o uso em base de pavimentos, onde o contato grão-grão deve ser garantido. Propõe também que as misturas devem ser bem graduadas e com preenchimento dos vazios.

Apesar da mistura tipo (c) não ser indicada para base de pavimentos, a mesma vem sendo utilizada e tido bons resultados. As misturas (b) e (c) são empregadas com frequência e são chamadas de solo-brita ou solo-areia (BERNUCCI et al., 2010).

2.3.2 Estabilização Física

Essa técnica de estabilização ocorre a partir da mistura de materiais de diferentes granulometrias a fim de obter um solo bem graduado (MACEDO, 2004) e materiais que se enquadrem nas faixas granulométricas de uma determinada especificação (HILÁRIO, 2016).

Outras técnicas consideradas como estabilização física são: tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que promovem melhoras nas características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA, 1994 apud MACÊDO, 2004). Contudo, os métodos elétrico e térmico não são utilizados na pavimentação (MARQUES, 2006).

No método elétrico tem-se a passagem de uma corrente elétrica através do solo. São usadas descargas sucessivas de alta tensão para adensamento de solos arenosos saturados e de baixa tensão para solos argilosos, onde são usados os fenômenos de eletrosmose, eletroforese e consolidação química (MARQUES, 2006).

Ainda segundo Marques (2006), o método de estabilização térmica consiste no emprego de energia térmica a partir do congelamento, aquecimento ou termosmose. O congelamento é temporário e altera a textura do solo, o aquecimento objetiva rearranjar a rede cristalina dos minerais constituintes do solo e a termosmose é uma técnica de drenagem em que um fluído é difuso em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura.

Segundo CRISTELO (2001, p.227) “A técnica de eletro-osmose consiste em colocar dois eléctrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente eléctrica entre eles”. A água presente no solo passa do eletrodo positivo para o negativo, onde é feita retirada da água, diminuindo a quantidade do solo e permitindo a sua consolidação.

Observa-se então a migração da água presente no solo do eléctrodo positivo para o negativo, de onde é feita a remoção da água. Diminui-se assim a quantidade de água no solo, o que permite a sua estabilização.

2.3.3 Estabilização Química

A estabilização química é o processo que visa a melhoria das características físicas e mecânicas do solo por meio da utilização de aditivos. Cimento

e cal são exemplo de aditivos (SARTORI, 2015). Outros aditivos: betumes, pozolanas, resinas, entre outros.

É utilizada nos casos onde a estabilização mecânica e a estabilização granulométrica não são suficientes para melhorar o solo até as características exigidas.

Nesse procedimento ocorre a reação química do aditivos com os minerais do solo (BARROS, 2013). No solo-cimento e solo-cal, onde o solo tem adição de cimento e cal respectivamente, a reação inicial é caracterizada como físico-química, pois são liberados íons Ca++ pela hidratação do cimento e que reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução. (SOLIZ, 2007).

Conforme Medina (1987), a mistura solo - estabilizador pode ocorrer com a formação ou não de uma matriz contínua com o solo. No caso de formação de matriz contínua, o agente estabilizador preenche os poros e as partículas ficam mergulhadas nela como se fossem um enchimento inerte. Nesse caso ocorre a predominância das características do estabilizador e algumas das reações resultantes são: precipitação, polimerização, oxidação, solução, carbonatação e troca catiônica.

No caso de formação de matriz descontínua, o estabilizador não preenche todos os poros e podem ocorrer três tipos de ação: modificação das características das superfícies das partículas, vedação inerte dos poros e interconexão das partículas de solo-solda por pontos (MEDINA, 1987).

2.4 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS GRANULOMÉTRICAMENTE

Segundo Balbo (2007) solo-brita, solo-agregado ou solo estabilizado granulometricamente é quando ocorre a melhoria de um solo com características indesejáveis para pavimentação a partir da adição de agregados. Quando se utiliza material natural e pedra britada, dá-se o nome de base e sub-base de solo brita. Quando são adicionados produtos resultantes de britagem tem-se bases e sub-bases de brita graduada ou brita corrida (DNIT, 2006).

No brasil, as normas que regulamentam tal procedimento são DNIT 139/2010 – ES: Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço e DNIT 141/2010 – ES: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço.

Para sub-bases devem ser respeitadas especificações, obtidas a partir de DNIT 139/2010 – ES, e que são expostas no quadro 1.

Quadro 1: Especificações para sub-base

Norma	DNIT 139/2010 - ES
Camada do pavimento	Sub-base
especificação	valor
Índice de Suporte Califórnia	>20%
Energia de compactação	Intermediária ou maior
Expansão	≤1%
Índice de Grupo	0

Fonte: Adaptado de DNIT 139/2010.

Já para bases ocorre uma exigência maior, possuindo outros requisitos. A norma DNIT 141/2010 especifica faixas granulométricas para tráfegos leves, médios e pesados, conforme o número N do tráfego. As faixas granulométricas estabelecidas pela norma DNIT 141/2010 são expostas no quadro 2.

Quadro 2 : Faixas granulométricas para bases estabilizadas granulometricamente

Peneiras	Para $N > 5 * 10^6$				Para $N < 5 * 10^6$		Tolerância da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
N°4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
N°10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
N°40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
N°200	2-8	5-15	5-15	out/25	6-20	6-20	±2

Fonte: Adaptado de DNIT 141/2010.

Além da granulometria, a norma também estabelece outros critérios que devem ser atendidos para aceitação do material e são mostrados no quadro 3 a seguir.

Quadro 3: Parâmetros estabelecidos por DNIT 141/2010 para bases estabilizadas granulometricamente

Norma	DNIT 141/2010 - ES
Camada do pavimento	Base
especificação	valor
Índice de Suporte California	>60% para tráfego leve e médio
	>80% para tráfego pesado
Energia de compactação	Modificada
Expansão	≤0,5%
Abrasão "Los Angeles"	≤ 55%
Limite de Liquidez (LL)	≤ 25% para material passante na peneira n°40
Índice de Plasticidade (IP)	≤ 6% para material passante na peneira n°40
Equivalente de areia	≤ 30%, somente quando os valores de LL e IP forem ultrapassados
Índice de Grupo	0

Fonte: Adaptado de DNIT 141/2010.

2.5 BASES E SUB-BASES ESTABILIZADAS QUIMICAMENTE COM CAL

2.5.1 Cal

A matéria prima da cal são matérias ricos em carbonato de cálcio, como os mármores, calcários e detritos de organismos marinhos. O carbonato de cálcio, ao sofrer queima, promove a calcinação, originando óxido de cálcio (CaO), popularmente conhecido como cal. A reação a da expressão 1 demonstra a formação (BALBO, 2007).

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$

A cal pode ser virgem ou hidratada, sendo a cal virgem um produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio (SILVA, 2009). A cal virgem pode ser de três tipos, sendo cal virgem cálcica quando possui óxido de cálcio com teor entre 90% a 100%, cal virgem magnesiana quando possui teor de óxido de cálcio entre 65% a 90% e cal virgem dolomítica para teores de óxido de cálcio entre 58% a 65% (SILVA, 2009)

A cal hidratada é, segundo ABNT NBR 7175:2003, p2:

> [...] Pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de

> uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

O produto resultante dessa hidratação é classificado conforme a cal virgem que lhe deu origem, sendo classificado, através da ABNT NBR 7175:2003, em Cal hidratada CH-I, CH-II e CH-III. Essa norma também especifica as exigências físicas e químicas para cada um dos tipos citados.

2.5.2 Estabilização de solos com cal

A estabilização química com uso de cal é realizada com a intenção de melhorar características como o enrijecimento, trabalhabilidade e expansão (BERNUCCI et al.,2010).

Segundo manual de pavimentação DNIT (2006), o processo de estabilização ocorre de três maneiras: por modificação do solo, quando se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água; por carbonatação, que é uma cimentação fraca; ou por pozolanização, que é uma cimentação forte.

Quando é verififcada predominância do primeiro efeito, a mistura é considerada flexível e é chamada de solo melhorado com cal. Na ocorrência dos dois últimos efeitos, a mistura é considerada semi-rígida e chamada de solo-cal.

O solo-cal possui um maior tempo de cura quando comparado com solo-cimento (BERNUCCI et al., 2010). Os teores de cal frequentemente utilizados estão entre 5% a 6%, segundo manual de pavimentação DNIT (2006). E entre 4% a 10% em massa segundo Bernucci et al. (2010).

Quando se trata da adição de cal em solos, não existe uma norma específica para especificação das características dos materiais de misturas solo - cal. Por tal motivo, será utilizada a norma DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de solo-cimento – Especificação de Serviço. Essa norma indica que uma mistura de solo-cimento com tempo de cura de 7 (sete) dias deve possuir uma resistência a compressão com valor mínimo de 21kg/cm² ou 2,1MPa.

Devido ao mesmo motivo anterior, para sub-bases de solo-cal, será adotada a norma DNIT 058/2004 – ES: Pavimento rígido – Execução de sub-base de solo-cimento – Especificação de serviço.

3 METODOLOGIA

A metodologia dessa pesquisa teve início com a definição do tema, sendo seguida por pesquisas bibliográficas referente ao assunto abordado, definindo os métodos de pesquisa. Posteriormente forem definidos os ensaios que deveriam ser realizados, assim como a coleta dos matérias utilizados.

De posse dos materiais e dos seus resultados dos ensaios de caracterização, foram definidas as misturas entre os resíduos de RAP e do solo na tentativa de uma estabilização granulométrica. Após a definição das misturas, as mesmas foram ensaiadas e julgadas conforme os resultados dos testes laboratoriais, verificando a sua viabilidade na utilização em camadas estruturais de pavimentos.

Nesse capítulo serão apresentados os materiais e ensaios laboratoriais utilizados na pesquisa.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado nas margens da MA – 207, popularmente conhecida como Via Expressa, na região próxima a entrada para o bairro Cohafuma, na cidade de São Luís, Maranhão. As figuras 15 e 16 mostram a localização da região de coleta da amostra.

Figura 15: Local de coleta da amostra de solo

Fonte: Google Maps (2018).

Figura 16: Local de coleta da amostra de solo

Fonte: Google Maps (2018).

O material foi coletado com auxílio de pá, picareta, enxada e carro de mão, e em quantidade suficiente para realização dos ensaios laboratoriais. A amostra foi coletada, transportada e armazenada no laboratório de solos e pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão.

O local de armazenamento era coberto e livre de intempéries, sendo a amostrada mantida em sacos de ráfia e baldes. Na figura 17 tem-se o material coletado e na figura 18 são expostos o material e o seu local de armazenamento.

Figura 17: (a) Local de coleta da amostra e (b) acondicionamento do material coletado em baldes e sacos de ráfia

Fonte: Autor (2018).

Figura 18: (a) Laboratório de Solos e (b) Pavimentação e material armazenado

Fonte: Autor (2018).

3.1.2 RAP

O resíduo de asfalto fresado foi coletado na Avenida José Sarney, nas proximidades dos bairros Tirirical, Retiro Natal e Jardim São Cristóvão, conforme figura19. A fresadora utilizada no procedimento era Wirtgen W 200, do tipo grande porte, e estava programada para realizar fresagem com 1,5m de largura e ± 3cm de profundidade. Os detalhes do cilindro da máquina fresadora são mostrados na figura 21.

O material fresado era depositado em um caminhão basculante, conforme figura 20, e um dos caminhões utilizados fez o transporte do material até o Laboratório de solos e pavimentação da UEMA, onde foi disposto.

Durante a fresagem foi observada a condição do revestimento asfáltico da via, sendo verificada uma irregularidade tanto nas cotas da pista de rolamento como no tipo de revestimento utilizado devido a existência de uma grande quantidade de remendos. Como consequência, tivemos uma fresagem irregular nas camadas do pavimento, resultando em áreas mais atingidas pela fresagem do que outras, como mostra a figura 22.

Figura 19: Local de coleta do RAP.

Fonte: Autor (2018).

Figura 20: Imagem da máquina fresadora e caminhão caçamba utilizados no procedimento

Fonte: Autor (2018).

Figura 21: Detalhe do cilindro da máquina fresadora

Fonte: Autor (2018).

Figura 22: (a), (b) e (c)Imagens do Pavimento fresado e (d) fresagem resultante

Fonte: Autor (2018).

3.1.3 Cal

Para a pesquisa foi utilizada cal hidratada do tipo CHI da marca Carbomil. A cal foi adquirida no mercado local em novembro de 2018. A figura 23 mostra a cal utilizada na pesquisa:

Figura 23: Cal hidratada utilizada na pesquisa

Fonte: Autor (2018).

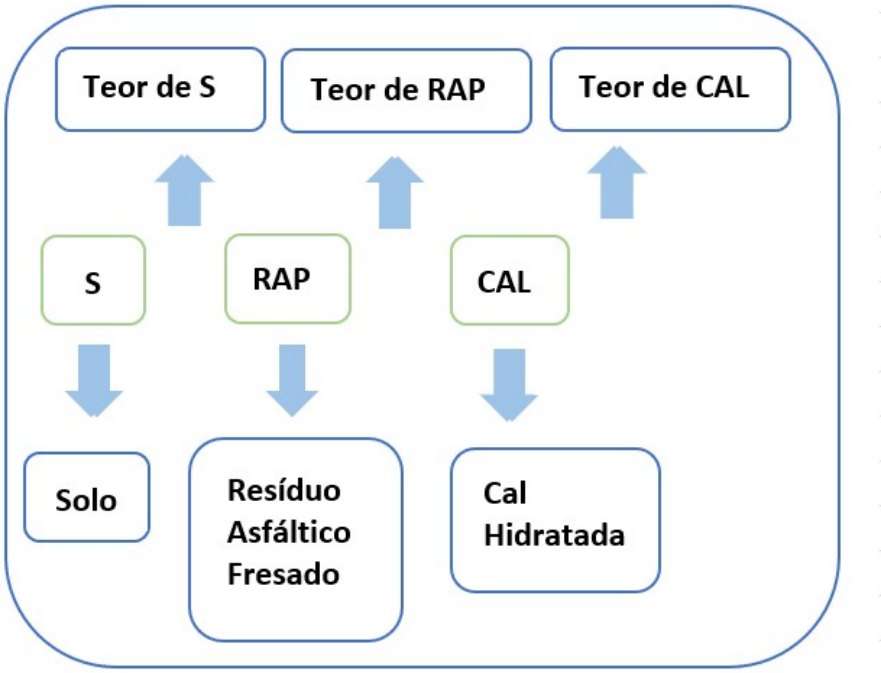
3.2 MISTURAS

Objetivando realizar melhorias nas características do solo em estudo, foram realizados testes em diferentes misturas compostas por solo, resíduo asfáltico fresado e cal hidratada.

O teor de resíduo asfáltico fresado foi estabelecido de modo que a composição granulométrica da mistura resultante se enquadrasse em uma das faixas granulométricas estabelecidas por DNIT 141/2010 – ES. O Teor de cal foi arbitrado em 4%.

Na figura 24 é exposta a metodologia utilizada para a simbologia das misturas e no quadro 4 são apresentadas as misturas realizadas na pesquisa.

Figura 24: Simbologia das misturas



Fonte: Autor (2018).

Quadro 4: Composição das misturas da pesquisa

Símbolo da Mistura	Teor de Solo (%)	Teor de RAP (%)	Teor de CAL (%)	Mistura
S100	100	-	-	Mistura 1
S80RAP20	80	20	-	Mistura 2
S60RAP40	60	40	-	Mistura 3
S45RAP55	45	55	-	Mistura 4
S35RAP65	35	65	-	Mistura 5
S25RAP75	25	75	-	Mistura 6
S96CAL4	96	-	4	Mistura 7
S43RAP53CAL4	43	53	4	Mistura 8

Fonte: Autor (2018).

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

3.3.1 Classificação MCT

Atualmente existem três metodologias de classificação de solos que são mais utilizadas em obras viárias: HRB (Highway Research Board), AASHTO e USCS (Unified Soil Classification System). Tais metodologias levam em consideração aspectos como a granulometria, o limite de liquidez (LL) e o índice de plasticidade (IP) (VILLIBOR et al., 2009).

Apesar dessas metodologias serem as mais utilizadas, são notadas dificuldades na sua utilização, como o fato desses métodos serem desenvolvidos para solos de clima frio e temperado e ser utilizado em solos de clima tropical. Essa prática vem ocasionando na classificação equivocada de solos e, para solucionar tal problemática, Nogami e Villibor desenvolveram a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical), específica para solos tropicais (VILLIBOR et al, 2009).

A metodologia MCT depende da realização de ensaios para verificação de parâmetros relacionados com propriedades mecânicas e hidráulicas (BALBO, 2007). O ensaio de compactação padrão MCT é normatizado pela DNER – ME 228/94 – Solos – compactação em equipamento miniatura.

Para enquadramento dos solos finos na classificação MCT é realizado o ensaio de compactação Mini-MCV e o ensaio de perda de massa por imersão, conforme diretrizes da DNER – ME 258/94 – Solos compactados em equipamento miniatura e DNER – ME 256/94 – Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão, respectivamente.

Esses ensaios fornecem parâmetros para a determinação dos coeficientes c' e e' que irão ser utilizados na classificação dos solos pela metodologia MCT (VILLIBOR et al., 2009). Finalizado todo o ensaio de classificação, é utilizada a norma DNER – ME 259/96 – Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamentos miniatura.

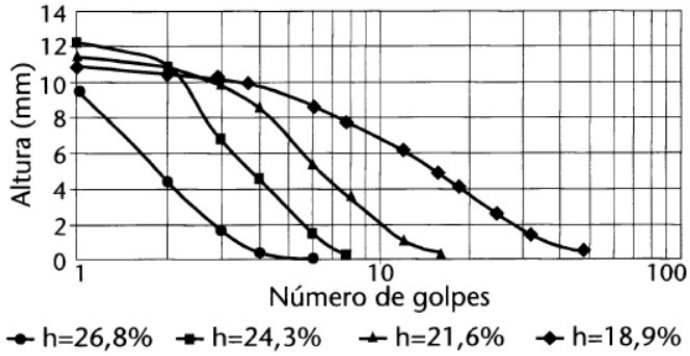
3.3.1.1 Compactação Mini-MCV

O ensaio de compactação Mini-MCV verifica a altura do corpo de prova em função do número crescente de golpes, relacionando o peso específico do solo em função do logaritmo do número de golpes (BALBO, 2007). Representa o aumento da massa específica aparente seca (MEAS) para vários teores de umidade com aplicação de energias crescentes, obtendo curvas de Mini-MCV (VILLIBOR et al., 2009).

A curva de deformabilidade é mostrada no gráfico 1. O valor do Mini-MCV é representado pela expressão 2, onde B_n é o valor do número de golpes do encontro da curva do ensaio com a altura de 2 mm.

$$Mini - MCV = 10 \log B_n \quad (2)$$

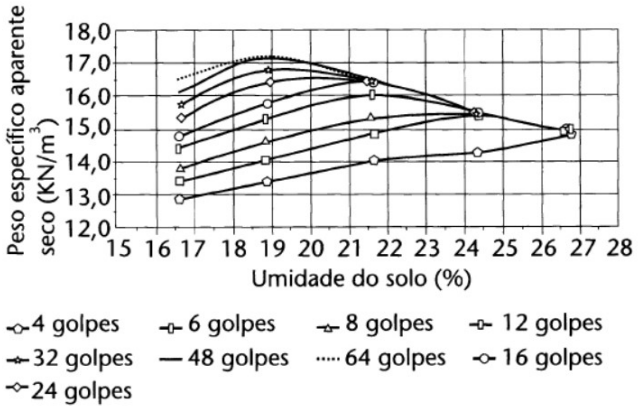
Gráfico 1: Curvas resultantes do ensaio de Mini- MCV



Fonte: BALBO (2007).

Com os valores obtidos é traçada a curva de compactação, relacionando o peso específico aparente seco com a umidade do solo. No gráfico 2 é exemplificada uma de curva de compactação.

Gráfico 2: Curvas de compactação Mini-MCV



Fonte: BALBO (2007).

O método de ensaio é descrito na DNER – ME 258/94 e tem como finalidade determinar os coeficientes para caracterização e classificação de solos tropicais passantes na peneira de abertura 2,0mm ou com proporções retidas desprezíveis.

Deve-se preparar uma amostra de 2500g de material passando na peneira de abertura 2 mm e em seguida preparar 5 porções com 500 g cada. Todas as porções devem receber umidades crescentes, homogeneizadas, armazenadas em sacos plásticos e acondicionadas em câmara úmida por um período de 24h para posterior compactação.

Os moldes utilizados na compactação são cilindros com 49,8 mm de diâmetro. Antes da compactação deve-se colocar vaselina na parede dos moldes e

remover os excessos. São pesados 200 g de material com o menor teor de umidade e em seguida o material é despejado no molde com auxílio de funil. O material restante é utilizado na verificação da umidade do solo.

Verifica-se a constante Ka do aparelho de compactação e o ensaio prossegue com golpes sucessivos e sendo feitas as leituras no extensômetro para os golpes: 2 – 3 – 4 – 6 – 12 – 16 – 24 – 32 – 48 – 64 – 96 – 128 – 192 – 256, interrompendo o processo conforme os critérios de parada do item 8.8.3 da DNER – ME 258/94:

a) Diferença de altura entre 4n golpes e n golpes menor que 2 mm;

b) Ocorrência de intensa exsudação no topo e na base do corpo de prova;

c) Atingir o número de 256 golpes.

O procedimento é repedido para os demais teores de umidade.

Na figura 25 tem-se a sequencia realizada na execução do ensaio.

Figura 25: Sequência do ensaio

Fonte: Autor (2018).

3.3.1.2 Perda de Massa por Imersão

O ensaio é normatizado pela DNER – ME 256/94 – Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão.

Nesse ensaio é utilizado o corpo de prova do ensaio de compactação Mini-MCV, deslocando a amostra de solo compactada parcialmente do molde a uma distância de 10 mm. Em seguida o corpo de prova é colocado em imersão com o molde na posição horizontal, com suporte para que o mesmo se mantenha nessa posição. Também são posicionadas cápsulas alinhadas com os corpos de prova para que o solo desprendido fique retido nelas.

O corpo de prova é deixado em repouso pelo menos 20 horas. Em seguida o corpo de prova e as cápsulas são retirados cuidadosamente. As cápsulas são levadas a estufa para secagem e posterior determinação da massa perdida. O procedimento é repetido para os demais teores de umidade e a perda de massa é encontrada a partir da expressão 3:

$$P_i = \frac{M_d * 100}{M_o} \tag{3}$$

Onde:

P_i é a perda de massa por imersão, em porcentagem;

M_d é a massa de solo seco desprendido, em gramas;

M_o é a massa de solo correspondente a 10 mm do corpo de prova depois da compactação, em gramas.

Ainda segundo Villibor e Nogami (2009), o coeficiente P_i pode ser calculado pela expressão 4:

$$P_i = 100 * \frac{M_i * L_{cp}}{M_s * L_e} * F_c \tag{4}$$

Onde:

P_i é a perda de massa por imersão, em porcentagem;

M_i é a massa de solo seco desprendido, em gramas;

M_s é a massa de solo correspondente a 10 mm do corpo de prova depois da compactação, em gramas.

L_{cp} é a altura do corpo de prova após a compactação, em mm;

L_e é a altura da parte extraída do corpo de prova ($L_e = 10\ mm$);

F_c é o fator de correção, sendo 0,5 nos casos de desprendimento de monobloco e 1,0 para desprendimento normal.

Na figura 26 são expostos o esquema para o ensaio de perda de massa por imersão e a sequência do ensaio.

Figura 26: (a) Esquema para ensaio de perda de massa por imersão e (b), (c) sequência do ensaio realizado

Fonte: Autor (2018).

3.3.1.3 Classificação dos Solos pela Metodologia MCT

De posse dos resultados dos ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão, a classificação do solo pode ser concluída.

Primeiro é obtido o valor de c', chamado de coeficiente de deformabilidade, que corresponde ao valor da inclinação da parte mais retilínea e íngreme da curva de Mini-MCV (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

O coeficiente d' é o valor do coeficiente angular da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, correspondente a 12 golpes (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

O índice e' é denominado de índice de laterização e pode ser encontrado a partir da expressão 5:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \qquad (5)$$

Onde:

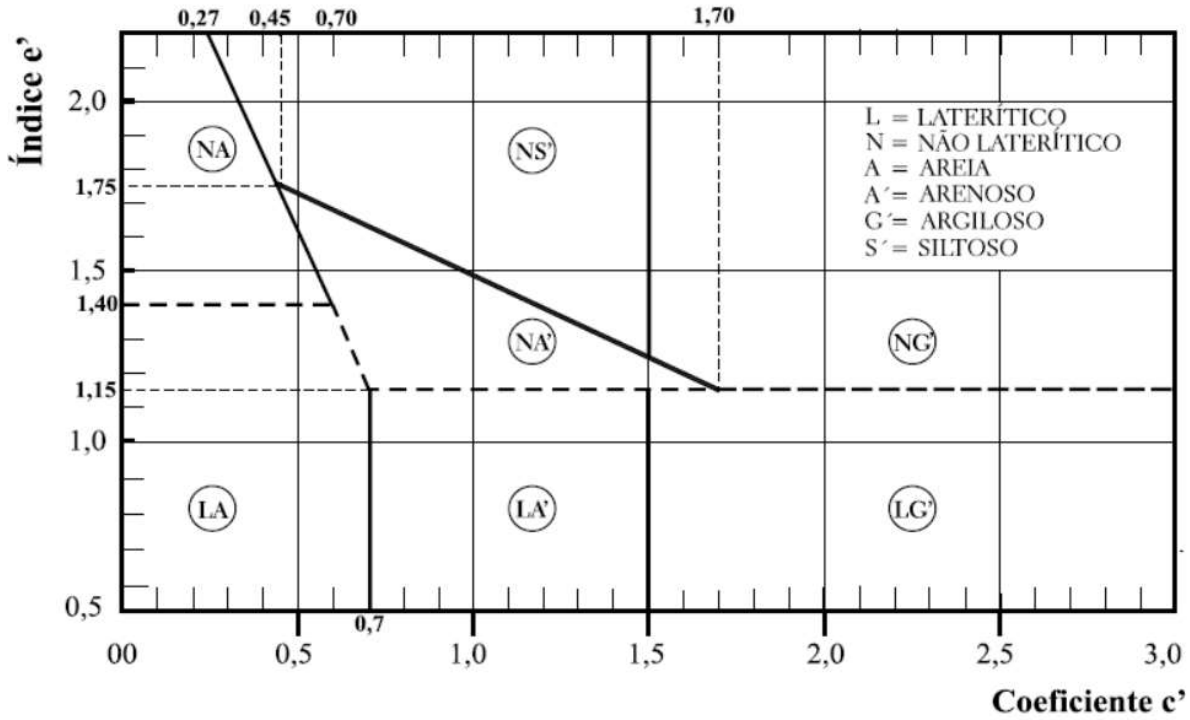
e' é o índice de laterização;

P_i é a perda de massa por imersão, em porcentagem;

d' é o coeficiente angular da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV.

Com os valores de e' e d', utiliza-se o ábaco do gráfico 3 para classificação dos solos tropicais.

Gráfico 3: Gráfico para classificação de solos pela metodologia MCT



Fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009.

"L" índica um comportamento laterítico, é um solo maduro, pouco expansível e com propriedades mecânicas e hidráulicas favoráveis para pavimentação (BALBO, 2007). Pode ser utilizado em camadas de subleito, reforço de subleito e até em camadas de sub-base e bases de pavimentos (BALBO, 2007).

"N" indica um solo com comportamento não laterítico, sendo desfavorável quando utilizado em pavimentação devido às propriedades permeabilidade e expansão (BALBO, 2007).

"A" indica solo com presença de areia, "S" para solos siltosos e "G" para solos argilosos (BALBO, 2007).

A seguir, no quadro 5, temos a classificação dos solos e seus principais locais de aplicação em camadas de pavimentos.

Quadro 5: Tipos de solos e sua utilização

Tipo MCT	Denominação	Empregos em camadas de pavimentos
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
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

Fonte: Adaptado de Balbo, 2007.

3.3.2 Análise Granulométrica

Segundo BRAJA (2014, p.33), “a análise granulométrica é a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como uma percentagem do peso seco total”. Tal composição tem importância no estudo dos materiais seja como elemento constituinte da fundação em que se apoia um pavimento ou como constituinte das camadas de um pavimento (SENÇO, 2007).

Segundo BERNUCCI et al. (2010), os agregados são classificados em agregado graúdo, agregado miúdo e material de enchimento (filer). O primeiro é representado pelos materiais com dimensões maiores que 2,0mm ou retidos na peneira n°10. Os agregados miúdos são aqueles com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mmm, ou seja, passantes na peneira n°10 e retidos na n°200. Já o filer é representando por aqueles onde pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075mm.

Segundo a ABNT NBR 6502:1995 a classificação dos grãos conforme o tamanho dos grãos é a apresentada no quadro 6:

Quadro 6: Classificação granulométrica do solo

Descrição	Diâmetro das Partículas
Argila	< 0,002 mm
Silte	0,002 a 0,06 mm
Areia fina	0,06 a 0,2 mm
Areia média	0,2 a 0,6 mm
Areia grossa	0,6 a 2,0 mm
Pedregulho	> 2,0 mm

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6502:1995.

A análise granulométrica pode ser feita de duas maneiras: pelo ensaio de peneiramento e pelo ensaio de sedimentação, sendo escolhida conforme o tamanho dos grãos a serem analisados. A norma DNER – ME 051/94 - Solos – análise granulométrica - define as diretrizes para a análise granulométrica de solos para agregados graúdos, miúdos e material de enchimento. A etapa de peneiramento é destinada para os grãos maiores que 0,075mm e o ensaio de sedimentação para os grãos menores que 0,075mm.

A norma DNER – ME 083/98: Agregados – análise granulométrica - define as diretrizes para a determinação granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto. Essa norma descreve o procedimento de peneiramento de forma semelhante a DNER – ME 051/94, divergindo apenas na série de peneiras utilizadas no ensaio, onde na DNER – ME 083/98 não é especificada uma série de peneiras para realização do ensaio.

Como o resíduo asfáltico fresado não se encaixa na categoria de solo e nem será utilizado como agregado para concreto, foi utilizada a série de peneira da DNER – ME 051/94 no intuito de ter o jogo de peneira para os dois materiais. 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.

A etapa de peneiramento é feita com a coleta de uma amostra do material a ser analisado em quantidade mínima indicada na norma DNER – ME 083/98. Pesa-se a amostra total de solo e é realizado o peneiramento do material, da peneira de maior abertura para a de menor abertura, por meio de agitador mecânico ou pelo método manual.

Nos ensaios de granulometria realizados o material foi colocado e agitado inicialmente em toda a série de peneiras para que fosse evitado o entupimento provocado pelo excesso de material. Tal procedimento foi seguido pelo peneiramento

individual de cada peneira. Na figura 27 é exibida a sequência de peneiras utilizadas e o procedimento de peneiramento.

Figura 27: (a) Série de Peneiras utilizada no ensaio e (b) peneiramento da amostra

Fonte: Autor (2018).

Na sedimentação é utilizado o princípio de que as partículas do solo sedimentam em velocidades diferentes. Segundo a DNER – ME 051/94, pesa-se 120g, no caso de solos arenosos e 70g para solos siltosos e argilosos. A amostra separada é pesada e misturada com 125ml de defloculante, solução de hexametafosfato de sódio com concentração de 47,5g do sal por litro. Ambos são colocados em um béquer e a mistura é agitada até que toda a amostra de solo fique completamente molhada e sem seguida é deixada em repouso por um período mínimo de 12 horas.

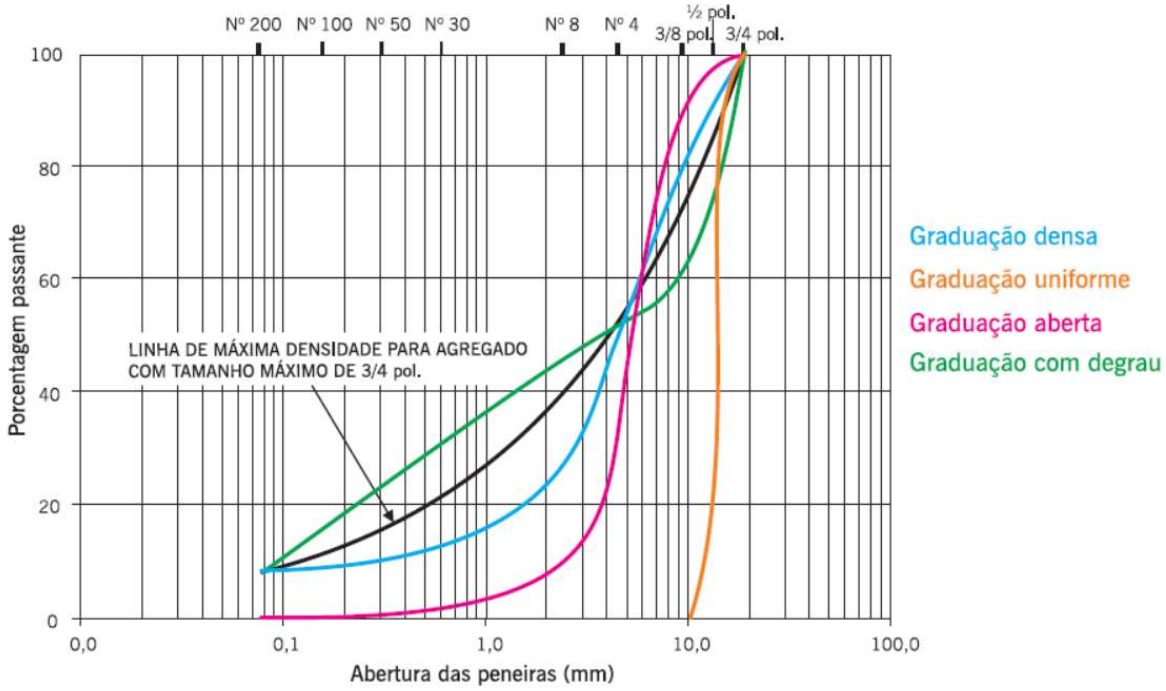
Passada essa etapa, a mistura é colocada no copo de dispersão e utiliza-se água destilada para retirar qualquer material que tenha ficado retido no béquer e adiciona-se mais água destilada até que o nível fique 5 cm abaixo da borda do copo. Em seguida a mistura é agitada por tempo determinado pela norma e variando conforme o índice de plasticidade do solo. Para a amostra foi utilizado tempo de 5 minutos.

Após o período de agitação o conteúdo é transferido para a proveta, utilizado água destilada para retirar qualquer material retido no copo do dispersor e completa, também com água destilada, até atingir a marca de 1000ml. Após o

equilíbrio da temperatura da suspensão, a proveta é agitada pelo tempo de 1 minuto, tampando a boca da proveta com a mão e uma luva de latéx. 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.

De posse dos dados do ensaio de granulometria, é possível traçar a curva granulométrica do material, onde o mesmo será classificado conforme a curva resultante. BERNUCCI et al. (2010) faz a classificação da graduação dos materiais conforme o gráfico 4:

Gráfico 4: Curvas granulométricas de acordo com a graduação



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Segundo Bernucci et al. (2010), agregados com graduação densa ou bem-graduada são aqueles com distribuição granulométrica contínua, chegando a densidade máxima. A graduação uniforme é representada pelos agregados com partículas com praticamente o mesmo tamanho e sua curva é íngreme. Agregados com graduação aberta possuem pouca quantidade de agregado fino - ou seja, menor que 0,075mm – e curva granulométrica contínua, provocando grande quantidade de vazios. Por fim tem-se os agregados com graduação com degrau ou descontínua, que possuem pequena quantidade de agregados com tamanhos intermediários, possuindo uma curva granulométrica com um patamar (degrau).

A partir da curva granulométrica podem ser definidos o diâmetro efetivo, o coeficiente de uniformidade e grau de curvatura (CAPUTO, 2011). O diâmetro efetivo corresponde ao diâmetro com 10% de peso passante na amostra, o coeficiente de uniformidade é a razão entre o diâmetro com 60% de peso passante e 10% de peso passante, conforme a expressão 6:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{6}$$

O valor de C_u é maior para solos menos uniformes e a partir dele é formada a seguinte classificação:

$$\begin{cases} C_u < 5 \; para \; solos \; muito \; uniformes; \\ 5 < C_u < 15 \; para \; solos \; de \; uniformidade \; média; \\ C_u > 15 \; para \; solos \; desuniformes; \end{cases}$$

Por fim tem-se o grau de curvatura, que para solos bem graduados está entre 1 a 3. É determinado pela expressão 7, onde d_{30} é o diâmetro para 30% de peso passante e as demais variáveis já foram definias anteriormente.

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} * d_{10}} \tag{7}$$

Foram realizados ensaios de granulometria com amostras do solo e do resíduo de asfalto fresado utilizados.

3.3.3 Equivalente de areia

Os materiais utilizados na construção civil não estão livres de contaminação. A presença de substâncias que não estão relacionadas com a natureza doa agregados pode afetar suas características, como a trabalhabilidade, durabilidade e até a resistência (BALBO,2007).

Ainda segundo Balbo (2007), a presença de argilas e siltes finos, e até pó de britagem de forma excessiva pode provocar danos nas características dos agregados. Para isso tem-se o ensaio de equivalente de areia, que determina a

proporção dos materiais tipo argila ou pó em agregados miúdos (BERNUCCI et al., 2010).

Esse ensaio é normatizado pela DNER – ME 054/97 – Equivalente de areia. O ensaio começa com a coleta de uma amostra com material passante na peneira de abertura 4,8 mm. É necessária uma solução de cálcio-glicerina-formaldeído para realização do ensaio, sendo armazenada em um garrafão com capacidade de 5 litros e esse garrafão deve ser colocado a 90 cm acima da superfície de trabalho.

A amostra é colocada em uma cápsula padrão e a solução é colocada na proveta até a altura de 10 cm. Em seguida a amostra é colocada na proveta contendo a solução e o conjunto é mantido em repouso por 20min. Passado esse tempo, a proveta é vedada com rolha de borracha e agitada com um movimento horizontal de vai e vem com velocidade de 90 ciclos em 30 segundos e deslocamento de 20 cm.

Finalizada a agitação, as paredes da proveta são lavadas com a solução e em seguida o tubo do garrafão é colocado no fundo da proveta para que a mesa seja preenchida com a solução até que o líquido atingir a marca superior da proveta. Após essas etapas, deixa-se o material em repouso por mais 20 minutos.

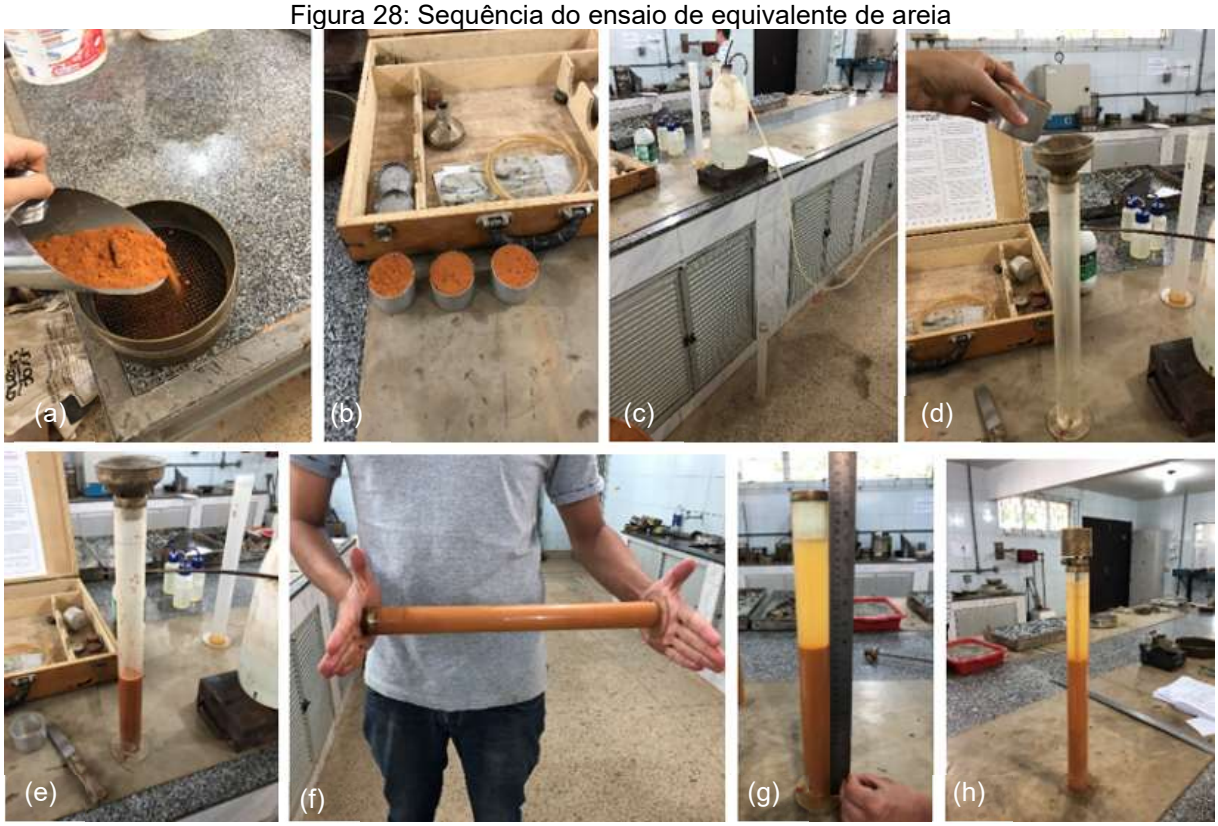
Após o período, determinar a altura da suspensão argilosa (h_1) e depois introduzir um pistão com haste metálica com 46 cm de comprimento e uma sapata de 25,4 mm de diâmetro na extremidade inferior, tento peso total de 1kg. O pistão é introduzido até assentar completamente na areia e é determinada a altura do agregado depositado pela sedimentação (h_2).

O resultado do equivalente de areia (EA) é determinado pela expressão 8:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (8)$$

Esse ensaio foi realizado em três amostras do solo e a sua sequência pode ser encontrada na figura 28.

Figura 28: Sequência do ensaio de equivalente de areia



Fonte: Autor (2018).

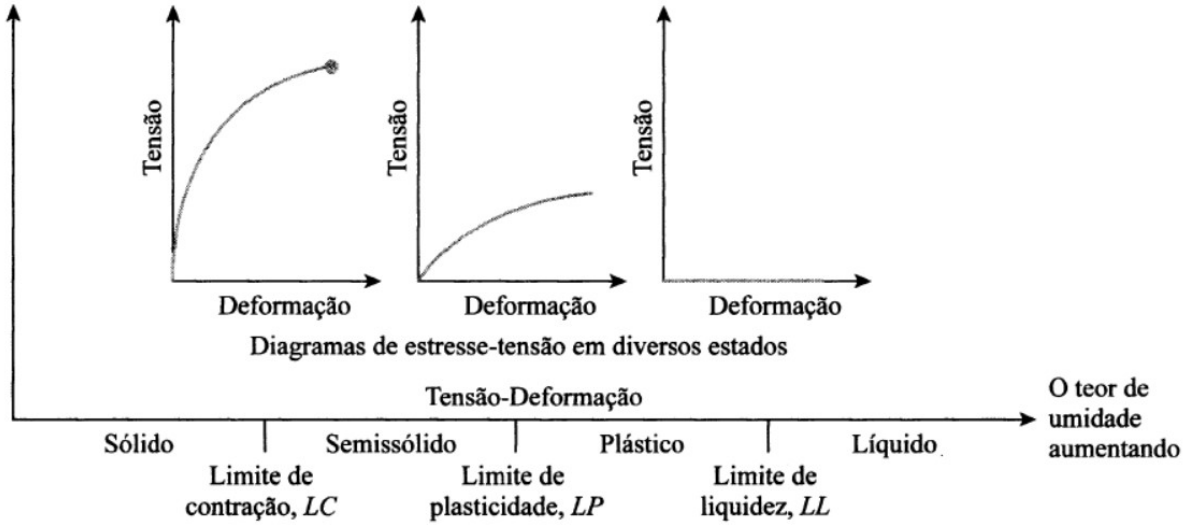
3.3.4 Limites de Consistência

Segundo Caputo (2011), a granulometria não é suficiente para caracterizar os solos, pois suas propriedades plásticas dependem também do teor de umidade, forma das partículas e da sua composição química e mineralógica. Portanto, são necessários outros ensaios para definir as propriedades que interessam (SENÇO, 2007).

A plasticidade é a propriedade do solo que demonstra a maior ou menor capacidade de ser moldado sob certa umidade, sem variação de volume. Tal característica é sustentado pela relação tensão-deformação, onde um corpo é considerado elástico quando recupera sua forma e volume originais quando as forças externas são cessadas e é dito plástico quando não recupera sua forme e volume originais (CAPUTO, 2011).

Os limites de consistência estudam os diferentes estados dos solos em presença de água (SENÇO, 2007). Os estados físicos do solo são chamados estados de consistência e seus limites são chamados de limites de consistência, sendo demonstrados o gráfico 5:

Gráfico 5: Estados de consistência e limites de consistência



Fonte: Braja, 2014.

O estado líquido é quando o solo está com a umidade muito elevada a ponto de se tornar um fluido denso. Diminuindo a umidade, perde-se a capacidade de fluir, o solo pode ser moldado facilmente e passa a conservar a sua forma, chegando ao estado plástico. A passagem do estado líquido para o estado plástico é identificada como limite de liquidez (LL) (CAPUTO, 2011).

Ao perder mais umidade, o solo perde a capacidade de ser moldando, desmanchando-se ao ser trabalhado, esse é o estado semi-sólido. O limite de plasticidade (LP) marca o fim do estado plástico e início do estado semi-sólido. O estado sólido é o estágio final da perda de umidade e é separado do estado semi-sólido pelo limite de contração (LC) (CAPUTO, 2011). Esses parâmetros também são conhecimentos como limites de atterberg (BRAJA,2014).

3.3.4.1 Limite de Plasticidade (LP)

O limite de plasticidade é o teor de umidade para o qual o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento.

A determinação desse índice é feita pela DNER – ME 082/94 - Solos – Determinação do limite de plasticidade. O ensaio começa com a coleta de uma amostra de solo conforme a DNER – ME 041/94 - Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização, onde são separados 200 gramas de solo passante

na peneira 0,42mm, sendo 70g para o ensaio de limite de liquidez, 50g para o de limite de plasticidade e 50g para o ensaio de limite de contração.

Adiciona-se água destilada na amostra de solo de modo que seja obtida uma massa plástica. Em seguida é separada uma amostra de 20g da massa obtida e tal amostra deve ser modelada na forma elipsoidal. Deve-se rolar a amostra entre os dedos e a placa de vidro até formar um cilindro de diâmetro uniforme, onde o número de rolagens deve estar de 80 a 90 por minuto, considerando como uma rolagem o movimento para frente e para trás completo.

Rola-se o cilindro até a sua fragmentação. Após esse acontecimento, seus pedaços são transferidos para um recipiente e sua umidade é medida. Essa operação deve ser repetida até que se tenha 3 valores que não tenham uma variação maior que 5% em relação à média. O resultado é a média dos valores de umidade medidos. Na figura 29 é apresentada a sequência do ensaio.

Figura 29: Sequência do ensaio de limite de plasticidade

Fonte: Autor (2018).

3.3.4.2 Limite de Liquidez (LL)

O ensaio de limite de liquidez é normatizado pela DNER – ME 122/94 – Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Sua determinação é feita através do aparelho de Casagrande, que é um prato de latão em forma de concha que sofre quedas de 1 cm quando solicitado.

A DNER – ME 122/94 (1994, p.2) define o limite de liquidez como:

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

O solo é incialmente umedecido com 15cm³ a 20cm³ de água destilada e a mistura é homogeneizada com auxílio de uma espátula. As adições de água posteriores são na quantidade de 1cm³ a 3cm³. Após a completa homogeneização d mistura, tomar uma amostra e coloca-la na concha do aparelho de Casagrande no local de contato da concha com a base. Espalhar a mistura de modo que a mesma ocupe 2/3 da superfície da concha e alisar com espátula a massa de solo até que esta fique com 1 cm de espessura no ponto de espessura máxima.

Deve-se produzir uma canelura na massa da mistura com auxílio do cinzel de modo que a espessura na parte central seja 1cm. Em seguida deve-se iniciar a realização dos golpes na velocidade de 2 golpes por segundo até que as duas bordas inferiores da canelura se unam na espessura de 1 cm. A quantidade de golpes necessárias para o fechamento é anotada e deve ser retirada uma porção da mistura para verificação do teor de umidade. Um modelo do equipamento utilizado no ensaio pode ser visto na figura 30.

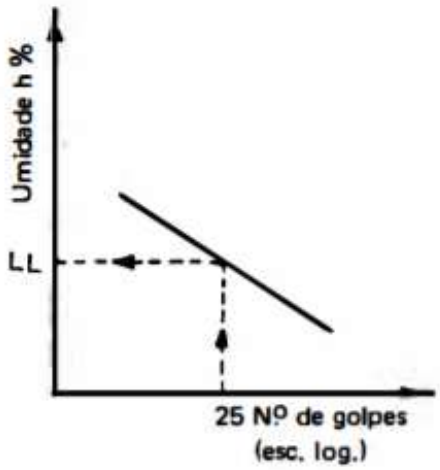
Figura 30: Aparelho utilizado no ensaio

Fonte: Autor (2018).

A mistura é retirada da concha e o procedimento é realizado pelo menos mais 3 vezes com 3 teores de umidades crescentes. Caputo (2011) sugere que o procedimento seja realizado pelo menos 6 vezes e que o número de golpes

necessários em cada repetição esteja entre 6 a 35. De posse dos resultados é traçada a linha de escoamento com os valores da umidade no eixo das ordenadas e o número de golpe no eixo das abcissas. No gráfico 6 tem-se um exemplo de linha de escoamento.

Gráfico 6: Linha de escoamento



Fonte: Caputo, 2011.

3.3.4.3 Índice de Plasticidade (IP)

O índice de plasticidade é a diferença entre os limites de liquidez e do limite de plasticidade, podendo ser obtido a partir da expressão 9:

$$IP = LL - LP \tag{9}$$

Ele define a zona em que o material se encontra no estado plástico. Seu valor é máximo para argilas e mínimo ou nulo para areias (CAPUTO, 2011). A seguir é apresentada a classificação dos solos a partir do índice de plasticidade, segundo Caputo (2011):

$$\begin{cases} 1 < IP < 7, solos\ fracamente\ pláasticos \\ 7 < IP < 15, solos\ mediamente\ plásticos \\ IP > 15, solos\ plásticos \end{cases}$$

No caso de índice de plasticidade nulo, escreve-se $IP = NP\ (não\ plástico)$.

3.3.5 Classificação do solo pelo método TRB (antigo HRB)

Além da classificação pelo método MCT, existe a classificação dos solos pelo método HRB, que leva em consideração propriedades como: limite de liquides, índice de plasticidade e granulometria (VILLIBOR et al., 2007).

No quadro de classificação, determina-se o grupo do solo a partir do processo de eliminação da esquerda pra direita. A classificação será o primeiro grupo a partir da esquerda que os valores do solo ensaiado coincidirem (DNIT, 2006). A figura 31 é expõe o método de classificação para esse ensaio.

Figura 31: Tabela para classificação pelo método TRB.

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

Fonte: DNIT, 2006.

O índice de grupo pode ser calculado pela expressão 10:

$$IG = 0{,}2 * a + 0{,}005 * a * c + 0{,}01 * c * d \qquad (10)$$

Onde:

P = % do material que passa na peneira n° 200.

$a = p - 35$. Se o valor de “p” for maior que 75, adotar a = 75. Se for menor que 35, adotar a = 0.

$b = p - 15$. Se o valor de “p” for maior que 55, adotar b = 40. Se for menor que 15, adotar b = 0.

$c = LL - 40$. Se LL for maior que 60, c = 20. Se LL for menor que 60, c = 0.

$d = IP - 15$. Se IP for maior que 30, d = 20. Se for menor, d = 0

3.3.6 Abrasão “Los Angeles”

Entende-se por abrasão como o desgaste de um material sólido a partir do atrito com outro sólido, gás, líquido ou combinações (DNIT, 2017). Essa característica é importante para a pavimentação pois os materiais utilizados estão sujeitos a esse tipo de desgaste durante o seu manuseio e execução das camadas do pavimento, podendo ocorrer abrasão também durante o tráfego na via (BERNUCCI et al., 2010).

O ensaio comumente utilizado para medir o desgaste a abrasão dos materiais é o ensaio de abrasão Los Angeles. Ele é normatizado pela DNER – ME 035/98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.

O ensaio consiste em coletar uma amostra do material. Uma amostra deve ser lavada e seca em estufa. Após a secagem, peneirar a amostra de modo que atenda uma das sete graduações disponíveis na norma, devendo ser escolhida aquela que mais se aproxima com a granulometria do agregado em estudo. Após a separação, somar as massas parciais de cada peneira e obter a massa total.

Em seguida adicionar a carga abrasiva, que será especificada conforme a graduação utilizada na preparação da amostra. Deve-se limpar o tambor, colocar a amostra do agregado e a carga abrasiva e fazer o tambor 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. A máquina utilizada no ensaio é a apresentada na figura 32.

Figura 32: Máquina utilizada no ensaio

Fonte: Autor (2018).

Passadas as revoluções, retirar o material do tambor, separar as esferas, limpá-las com escova e passar todo o material na peneira 1,7mm, rejeitando o material passante. Lavar o material retiro e levá-lo para secagem em estufa. Pesar o material seco.

O resultado o ensaio é dado pela expressão 11:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \quad (11)$$

Onde:

A_n é a abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação em 1%;

n é a graduação escolhida para o ensaio (A, B, C, D, E ou G);

m_n é a massa total da amostra seca colocada na máquina;

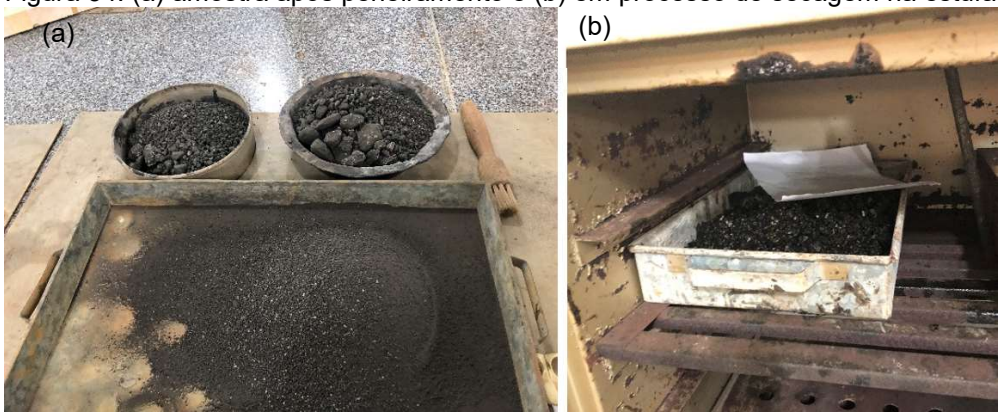
m'_n é a massa da amostra lavada e seca após o ensaio (retida na peneira 1,7mm);

Esse ensaio foi realizado com amostras do resíduo de asfalto fresado e a graduação escolhida foi a “A”. A seguir, na figura 33, são mostradas imagens da execução do ensaio.

Figura 33: (a) Material antes e (b) depois do ensaio com a carga abrasiva

Fonte: Autor (2018).

Figura 34: (a) amostra após peneiramento e (b) em processo de secagem na estufa



Fonte: Autor (2018).

3.3.7 Densidade e Absorção

Segundo DNIT (2017, p.9 e p.93), absorção “no caso de agregado imerso em água, ocorre aumento da sua massa devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, expressa como percentagem de sua massa seca” e densidade “é uma grandeza física que expressa a razão entre a massa de um material e o volume por ele ocupado”.

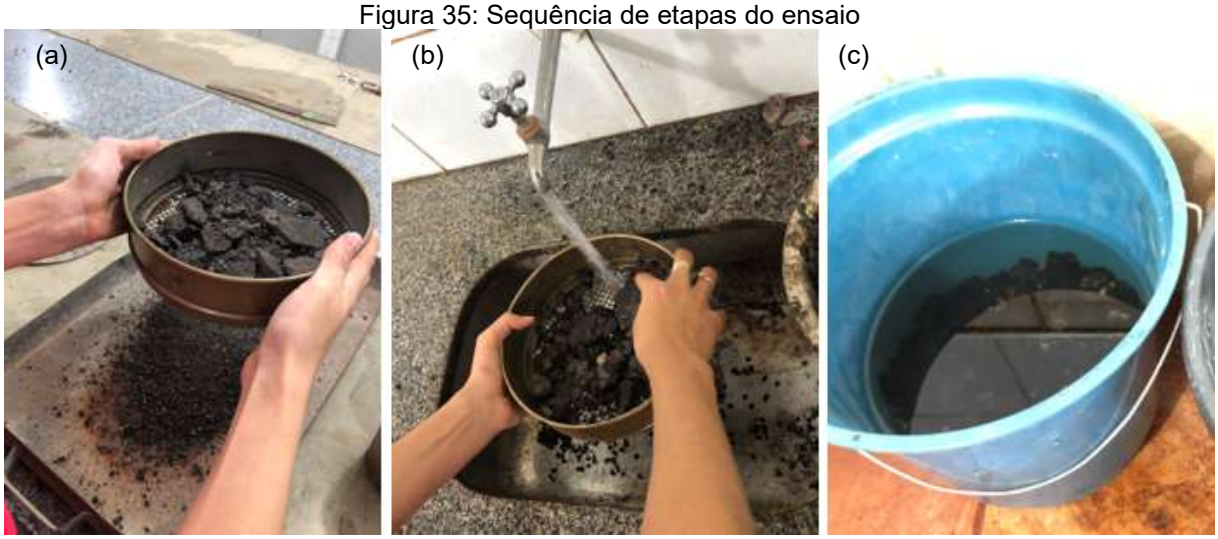
A determinação desses índices é feita de métodos diferentes para agregados graúdos e agregados miúdos. Para agregados graúdos é utilizada a DNER – ME 081/98 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.

A amostra deve ser coletada, sendo desprezado todo o material passante na peneira 4,8mm exceto quando a quantidade passante exceder 2% em peso ou quando apresentar sinais de alteração mineralógica. Ocorrendo tal situação, o material passante será ensaiado conforme a norma para agregados miúdos.

A massa da amostra dependerá da dimensão máxima característica do agregado, variando de 2,0Kg até 125,0 Kg. Após separação, a amostra deve ser

levada a estufa até constância de massa e em seguida deverá ser imergido em água a temperatura ambiente por um período de 24h. Na figura 35 temos a sequência do ensaio.

Figura 35: Sequência de etapas do ensaio



Fonte: Autor (2018).

Em seguida deve-se remover a amostra da água e coloca-la sobre um pano absorvente e secá-la até que as partículas visíveis de água sejam eliminadas. Determinar o peso da amostra na condição saturada superfície seca. Determinar também o peso do material submerso em água potável, conforme figura 36, e em seguida leva-lo para estufa para sua completa secagem e determinar o peso seco.

Figura 36: Pesagem da amostra submersa em água

Fonte: Autor (2018).

A absorção é encontrada a partir da expressão 12:

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \tag{12}$$

Onde:

a é a absorção do agregado, em porcentagem;

M_h é a massa do agregado na condição saturada superfície seca, em g;

M_s é a massa do agregado seco em estufa, em g;

A densidade aparente do agregado é determinada pela expressão 13:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \tag{13}$$

Onde:

D_{ap} é a densidade aparente;

M_h é a massa do agregado na condição saturada superfície seca, em g;

M_s é a massa do agregado seco em estufa, em g;

L é a leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g;

Para agregados miúdos é utilizada a DNER – ME 194/98 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

Segundo a norma DNER – ME 194/98, amostra deve ser quarteada e seca em estufa até constância de massa. Colocar água no frasco Chapman até a marca de 200cm³, deixando-o em repouso. Em seguida adicionar 500g de agregado miúdo seco no frasco, agitando-o cuidadosamente para eliminação de bolhas e sem que fique material retido nas paredes do frasco.

Verificar a leitura indicada no frasco após a colocação total da amostra. A densidade ou massa especifica do agregado miúdo é dada pela expressão 14:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \tag{14}$$

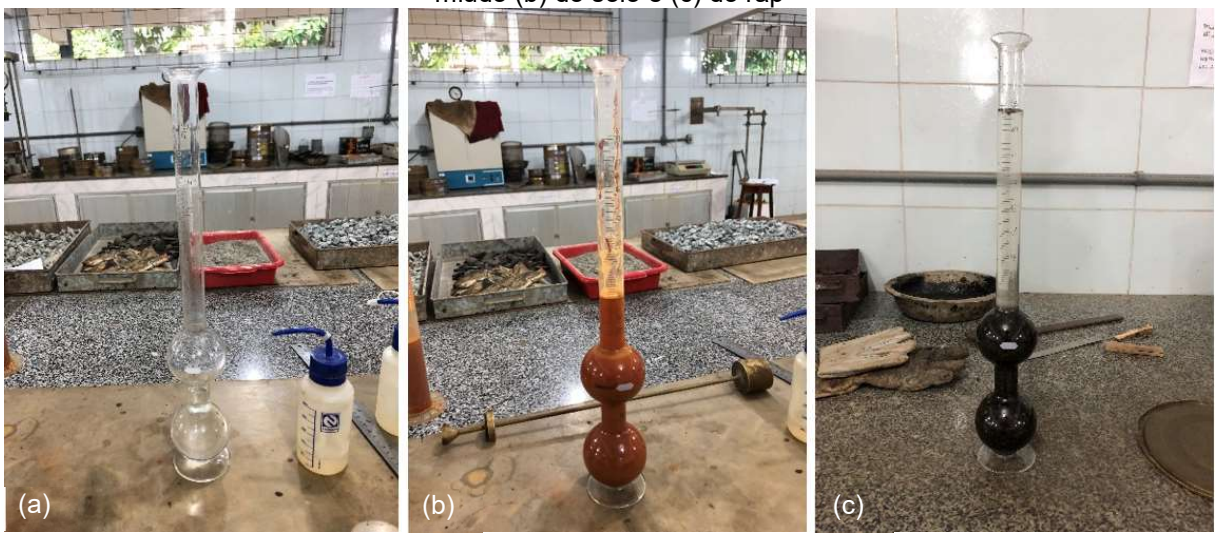
Onde:

γ é a massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L é a leitura final do frasco.

Na figura 37 temos a sequencia do ensaio para o solo natural e agregado miúdo do RAP.

Figura 37: (a) Frasco Chapman com água até a marca de 200 cm³ e frasco Chapman com agregado miúdo (b) do solo e (c) do rap



Fonte: Autor (2018).

3.3.8 Índice de Forma

A forma de um agregado é a forma como a partícula é vista por fora e é caracterizado pelas relações de suas dimensões (DNIT, 2017). Esse critério é importante pois influencia na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, além de alterar a energia de compactação necessária para obter maiores densidades (BERNUCCI et al., 2010).

Esse índice pode ser determinado de duas maneiras, pela DNER – ME 086/94 – Agregado – determinação do índice de forma ou pela ABNT NBR 7809:2006 Versão corrigida 2008 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Na presente pesquisa foi utilizada a norma ABNT NBR 7809:2006 versão corrigida 2008.

Primeiro deve ser coletada uma amostra conforme as normas NBR NM 26 e NBR NM 27, onde deve ser quarteada. A quantidade de amostra coletada varia confirme a dimensão máxima característica do agregado e é mostrada no quadro 7:

Quadro 7: Peso da amostra conforme tamanho dos agregados

Dimensão máxima característica (mm)	Quantidade mínima da amostra (kg)
Dmáx ≤ 19	5
19 < Dmáx ≤ 25	10
25 < Dmáx ≤ 37,5	15
Dmáx >37,5	20

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7809:2006 Versão corrigida 2008.

Em seguida o material deve ser levado a estufa até constância de peso e realizar o peneiramento. De posse do resultado do peneiramento, desprezar as frações passantes na peneira de abertura 9,5mm e aquelas cujas massas retidas individuais sejam menores ou iguais que 5%. Na figura 8 são mostradas a amostral peneirada e as frações resultantes do peneiramento.

Figura 38: (a) Amostra total a ser peneirada e (b) frações após peneiramento

Fonte: Autor (2018).

calcular o número de grãos necessários para o ensaio para cada fração pela expressão 15:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^{n} F_i} * F_i \qquad (15)$$

Onde:

200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

F_i é a porcentagem de massa retida na fração i

N_i é a quantidade de grãos da fração i necessária.

Calculada a quantidade de grãos de cada fração, conta-los e coloca-los todos juntos em uma mesma amostra. Dessa porção, realizar quarteamento até atingir a quantidade de 200 grãos necessários para o ensaio. Efetuar a medição do comprimento, largura e espessura de cada grão, especificando como “a” a maior medida, “b” a medida intermediária e “c” a menor medida. Para cada grão deverão ser calculadas as relações b/a e c/b que servirão para classificar o grão. Na figura 39 tem-se cada fração prontas para a homogeneização e o processo de quarteamento. Na figura 40 tem-se a amostra resultante do quarteamento e o processo de medição dos grãos. A classificação é feita conforme a figura 41.

Figura 39: (a) Grãos de cada fração prontos para homogeneização e (b) realização do quarteamento

Fonte: Autor (2018).

Figura 40: (a) Amostra resultante do quarteamento e (b) medição do agregado

Fonte: Autor (2018).

Figura 41: Classificação dos grãos

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 et al. (2010).

3.3.9 Angularidade

A angularidade é a propriedade que mostra o atrito entre as partículas do agregado, propiciando resistência a deformação constante (DNIT, 2017). É encontrada a partir da porcentagem de vazios de ar presentes em agregados com dimensão inferior a 2,36mm na condição de estado solto (BERNUCCI et al., 2010).

O ensaio para sua verificação é normatizado pela ASTM C 1252/03. O ensaio consiste na coleta da amostra conforme as exigências da norma, que determina a quantidade de material em cada fração de peneira a ser utilizado. A quantidade de cada fração que deve ser utilizada é exposta no quadro 8. Após pesagem as frações devem ser misturadas. Na figura 42 tem-se o processo de preparação da amostra.

Figura 42: Preparação da amostra

Fonte: Autor (2018).

Quadro 8: Frações do agregado para ensaio

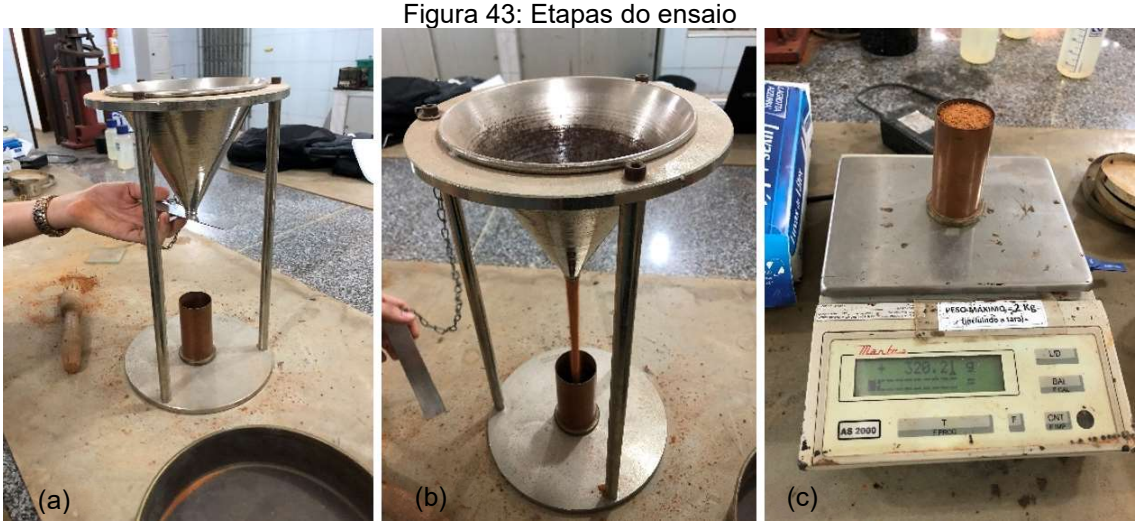
Fração	Massa (g)
N°8 - N°16	44
N°16 - N°30	57
N°30 - N°50	72
N°50 - N°100	17

Fonte: Adaptado de ASTM C 1252/03.

Inicialmente pesa-se o cilindro com a placa de vidro, depois o cilindro é preenchido com água destilada e coberto com a placa de vidro e pesado. Após essas pesagens, o cilindro é centralizado no equipamento e o final é tapado com a placa do equipamento. A amostra é colocada totalmente no final e depois a passagem é desbloqueada, permitindo que o agregado caia no cilindro.

Após a total queda do material, o excesso de material é retirado com auxilio da placa rasando o recipiente, tomando cuidado para que não seja provocada a compactação do material. Após o arrasamento, dar batidas no recipiente, promovendo uma pequena compactação para que não seja perdido material durante o manuseio do cilindro. Pesar o cilindro e repetir o ensaio por mais 2 vezes. Na figura 43 são apresentadas as etapas do ensaio realizado.

Figura 43: Etapas do ensaio



Fonte: Autor (2018).

O valor da angularidade é dado pela expressão 16:

$$U(\%) = \frac{V - (\frac{F}{G})}{V} * 100 \qquad (16)$$

Onde:

$U(\%)$ é o valor da angularidade do agregado, em %;

V é o volume do cilindro, em cm³;

F é o peso do solo retido no cilindro, em g;

G é densidade relativa na condição seca, em g/cm³.

3.3.10 Teor de Ligante asfáltico

Esse ensaio busca identificar a quantidade de betume presente em misturas asfálticas. Suas diretrizes são definidas pela DNER – ME 053/94 – Misturas betuminosas – porcentagem de betume.

O ensaio consiste em coletar uma amostra do material e deixá-lo em estufa a 100°C – 120°C por uma hora. Após o tempo, retirar a amostra e desmanchar os grumos com colher e quartear até uma obter uma amostra final de 1000 g. Na figura 44 tem-se a amostra utilizada no ensaio.

Figura 44: Amostra de material fresado no prato do centrifugador para realização do ensaio

Fonte: Autor (2018).

Devem ser previamente pesados o prato do extrator de betume e o papel filtro que serão utilizados no ensaio.

A amostra deve ser pesada no interior do prato extrator de betume e o conjunto é colocado no centrifugador. É adicionada uma quantidade de 150 ml de solvente na amostra e espera-se cerca de 15 minutos para iniciar o ensaio. O aparelho centrifugador é acionado suavemente até que seja atingida uma velocidade de 3 600 rpm. A figura 45 expõe os procedimentos citados.

Figura 45: (a) Prato com papel filtro e (b) aparelho centrifugador fechado e pronto para início do ensaio

Fonte: Autor (2018).

O solvente começará a escoar e quando se esgotar a carga de solvente, o aparelho é parado e uma nova carga de solvente é adicionada no prato. Essa operação deve ser repetida, quantas vezes for necessária, até que o solvente saia com tonalidade clara.

Assim que o solvente sair claro, o prato com agregado e o papel filtro devem ser levados a estufa, de 80°C – 100°C, até constância de peso. Em seguida, o pesar o conjunto prato-agregado e filtro-agregado. Na figura 46 temos a exposição do material após a realização do ensaio. A porcentagem de betume é dada pela expressão 17:

$$\%betume = \frac{peso\ de\ betume\ extraído}{peso\ da\ amostra\ total} * 100 \qquad (17)$$

Onde:

$peso\ de\ betume\ extraído$ é diferença do peso inicial e final da amostra;

$peso\ da\ amostra\ total$ é o peso da amostra inicial.

Figura 46: Agregado após ensaio de extração de betume

Fonte: Autor (2018).

3.3.11 Ensaio de Compactação

Compactação é o processo mecânico realizado para redução de vazios no solo. A diminuição dos vazios eleva a massa específica do solo, resultando no aumento da resistência do mesmo. Ralph R. Proctor percebeu que o grau de compactação do solo dependia da umidade a ele adicionada, o que serviu de base para o desenvolvimento da técnica de compactação com prévia determinação da umidade ótima de compactação (SENÇO, 2007).

Para determinação da umidade ótima é utilizado o ensaio de compactação que é normatizado pela DNER – ME – 129/94 – Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas e pela DNER – ME – 162/94 - Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

A preparação da amostra para esse ensaio deve seguir as diretrizes da ABNT NBR 6457:2016 – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e caracterização. Com o material na umidade higroscópica, desmanchar os torrões e homogeneizar a amostra. Passar a amostra na peneira 4,8mm e reservar o material passante. O material retido deve ser passando na peneira 19,1mm para desmanchar os torreões eventualmente existentes.

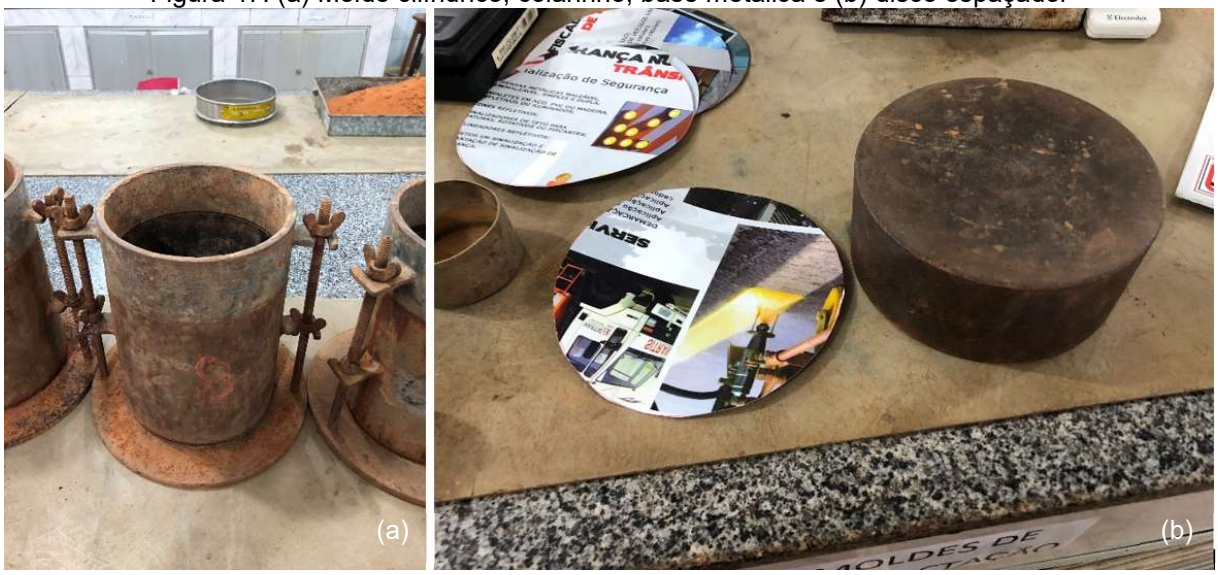
O ensaio por ser realizado com amostra trabalhadas ou não trabalhadas. Para a presente pesquisa foi utilizado o método de amostra não trabalhadas, uma vez que a possível quebra de articulas durante a compactação impede a reutilização do material. Deve ser coletado um total de 6kg para solos siltosos ou argilosos e 7kg para solos arenosos ou pedregulhosos.

Esse procedimento deve ser realizado para cada corpor de prova a ser moldado, sendo utilizado geralmente uma quantidade mínima de cinco corpos de prova, deve ser coletado um total de 35kg de amostra de material para realização do ensaio na modalidade amostra não trabalhada.

Inicialmente os cilindros que serão utilizados no ensaio devem ser medidos, diâmetro e altura, e pesados para que seja calculado o volume da amostra compactada. O disco espaçador utilizado no ensaio também deve ter sua altura determinada.

Em seguida fixa-se o molde cilíndrico e o colarinho a base metálica com posterior colocação do disco espaçador ao fundo do conjunto. Na figura 47 é exposto o molde e o cilindro espaçador utilizados no ensaio.

Figura 47: (a) Molde cilíndrico, colarinho, base metálica e (b) disco espaçador



Fonte: Autor (2018).

A amostra é umedecida com uma quantidade de água e após a total homogeneização é compactado em cinco camadas iguais para se obter um corpo de prova com cerca de 12,5cm de altura. O número de golpes em cada camada será conforme a energia utilizada no ensaio, podendo ser energia normal, intermediária e modificada.

A energia utilizada na compactação foi a modificada, conforme indica a DNER 141/2010 para materiais utilizados em base de pavimentos. Nela são aplicados 55 golpes com o soquete caindo de uma altura de 45,72 cm, devendo ser repetido esse procedimento em cada camada do corpo de prova moldado.

Finalizada a compactação, retirar o colarinho do molde e realizar o arrasamento do molde, retirando o excesso de material na altura exata do molde. Retirar o disco espaçador e realizar a pesagem do conjunto molde + material compactado.

Durante a compactação deve ser retirada uma porção da amostra para a determinação do teor de umidade da compactação durante a execução da segunda camada de compactação. De posse dos dados, podemos calcular a massa específica aparente do solo seco pelas expressões 18 e 19:

$$\gamma_s = \gamma_h \frac{100}{100 + h} \tag{18}$$

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V} \tag{19}$$

Onde:

γ_s é a massa específica aparente do solo seco, em g/cm³;

γ_h é a massa específica aparente do solo úmido, em g/cm³;

P'_h é o peso do solo úmido compactado, em g;

V é o volume do solo compactado, em cm³;

h é o teor de umidade do solo compactado, em %.

O procedimento deve ser realizado por mais 4 vezes com teores de umidade crescentes com passo de 2%, totalizando a execução de 5 corpos de prova.

Com os valores da massa específica aparente seca e da respectiva umidade utilizada na compactação, constrói-se o gráfico com os valores da massa especifica aparente do solo seco no eixo das ordenadas e os valores da umidade no eixo das abscissas. A curva gerada nos dará o valor da massa específica aparente máxima do solo seco ($\mathrm{MEAS}_{\mathrm{máx}}$) e o seu valor de umidade.

A sequência do ensaio é apresentada na figura 48.

Figura 48: Sequência de procedimentos do ensaio

Fonte: Autor (2018).

3.3.12 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Popularmente conhecido como CBR, Índice Suporte Califórnia vem do inglês California Bearing Ratio (CBR), e é uma das características mais aceitas para avaliar o comportamento do solo na utilização em pavimentação (SENÇO, 2007). Indica relação entre a pressão necessária para fazer penetrar um pistão numa amostra de solo ou material granular e numa amostra de material padrão (BERNUCCI et al., 2010).

Verifica também a capacidade de expansão do solo quando submergido em água parada por 96h, devendo ser anotada a expansão num intervalo de 24 em 24h.

O ensaio é normatizado pela DNER – ME 049/94 e pode ser realizado utilizando os corpos de prova provenientes do ensaio de compactação, conforme DNER – ME 129/94.

Primeiramente realizamos a etapa do ensaio para verificar a expansão, onde é retirado o disco espaçador do corpo de prova e ele é invertido e fixado novamente na base metálica. No local do espaçador serão colocador pratos-base perfurados e sobre eles os pesos anelares de sobrecarga com peso não inferior a 4,536 kg. Fixa-se o extensômetro em um suporte e ele é colocado no corpo de prova. Levar os corpos de prova imediatamente a imersão por um período de 96h, conforme figuras 49 e 50.

Figura 49: Corpo de prova com pesos anelares de sobrecarga e extensômetro

Fonte: Autor (2018).

Figura 50: Corpos de prova imersos em água

Fonte: Autor (2018).

Passadas as 96h de imersão, os cilindros são retirados da imersão. Deve-se retirar os pratos-base perfurados e as sobrecargas e deixar os corpos de prova em repouso por 15 min para que a água retida possa escoar. Em seguida, realizar o ensaio de penetração.

Devem ser recolocadas as sobrecargas no corpo de prova e o conjunto deve ser colocado na máquina para o ensaio de penetração. O corpo de prova é colocado na máquina e o pistão é assentado de modo que toque no solo, tomando cuidado para que não tenha contato com as sobrecargas, pois o contato poderá afetar as leituras do ensaio. O extensômetro da máquina deve ser posicionado de modo que

tenha livre movimentação e o ensaio pode ser iniciado. Esse processo é apresentado na figura 51.

Figura 51: Realização do ensaio de penetração na máquina CBR-Marshall automática

Fonte: Autor (2018).

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

Finalizado o ensaio com todos os corpos de prova, os resultados do CBR são obtidos pela expressão 20:

$$ISC = \frac{pressão\ calculada\ ou\ corrigida}{pressão\ padrão} * 100 \qquad (20)$$

Onde:

$pressão\ calculada$ é a pressão fornecida pela máquina do ensaio;

$pressão\ corrigida$ é a pressão fornecida pela máquina corrigida quando necessária;

$pressão\ padrão$ é a pressão padrão para a penetração em estudo, fornecida pela norma do ensaio.

A pressão deve ser corrigida quando a curva penetração X pressão apresentar ponto de inflexão. O ISC é calculado para as penetrações de 2,54mm e 5,08mm. O ISC do material estudado será o maior entre os dois valores calculados.

3.3.13 Resistência a Compressão Simples

Quando utilizamos materiais cimentados quimicamente são utilizados outros ensaios para verificação das suas características (BERNUCCI et al., 2010). O ensaio de resistência a compressão simples é utilizado nesses casos e consiste na aplicação de um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos de prova cilíndricos (BERNUCCI et al., 2010).

O ensaio é normatizado pela DNER – ME 180/94 – Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. A amostra para ensaio deve ser de 3.500g para solos siltosos ou argilosos e 4.500g para solos arenosos ou pedregulhosos, devendo ser passante na peneira 2,54 cm. No caso de amostra representativa ficar retira nessa peneira, substituir a porção retida por material passante na peneira 2,54 m e retida na 1,9 cm.

As porções dos materiais devem ser pesadas conforme as porcentagens de cada traço. Os corpos de prova foram moldados com a umidade ótima de forma a atingir a massa especifica aparente seca máxima, conforme umidade ótima obtida no ensaio de compactação. A figura 52 mostra o material pronto para ser homogeneizado e ser ensaiado.

Figura 52: Material pesado e pronto receber umidade para moldagem de corpo de prova

Fonte: Autor (2018).

Após separação das porções da amostra, adicionar a quantidade necessária para atingir a umidade ótima e dar início a compactação. Durante a compactação deve ser retirada uma amostra do material compactado para verificação do teor de umidade e aceitação do ensaio.

A quantidade de golpes por camada é definida pela expressão 21, segundo DNER – ME 180/94:

$$n = \frac{E * V}{9{,}8 * P * H * N_c} \tag{21}$$

Onde:

n é o número de golpes por camada;

E é a energia de compactação, em N.m/m³;

V é o volume de material compactado, em m³;

P é a massa do soquete, em kg;

H é a altura do soquete, em m;

N_c é o número de camadas.

Para o ensaio podem ser utilizadas três energias de compactação, sendo 0,59 MN.m por m³ para energia Normal, 1,26 MN.m por m³ para Intermediária e 2,69

MN.m por m³ para energia Modificada. A compactação é realizada com soquete de 4,536 kg em queda de uma altura de 45,72 cm. A altura do corpo de prova é fixada em 20 cm e seu diâmetro é 10cm, calculando assim o seu volume.

A compactação foi realizada em 5 camadas e, na presente pesquisa, foi utilizada energia modificada, resultando em um total de 41 golpes do soquete por camada. A figura 53 mostra o molde e soquetes utilizados no ensaio.

Figura 53: Soquete e molde utilizados no ensaio

Fonte: Autor (2018).

Finalizada a compactação, o corpo de prova é retirado do molde e em seguida é pesado e suas medidas são aferidas. Após esse processo, o corpo de prova é envolto por 2 sacos plásticos evitando a perda de umidade e carbonatação do hidróxido de cálcio pelo gás carbônico (CO_2) presente no ar, conforme figura 54.

Figura 54: (a) Desmoldagem do corpo de prova e (b) armazenamento em sacos para posterior cura

Fonte: Autor (2018).

Os corpos de prova devem ser mantidos em processo de cura por, no mínimo, três tempos: 7, 14 e 28 dias. A cura deve ser feita em câmara úmida, conforme figura 55. Terminado o processo de cura, os corpos de prova devem ser imersos em água durante 24 horas para posterior ruptura. Contudo, optou por não deixar os corpos de prova imersos em água.

Após a cura, os corpos de prova deverão ser retirados da câmara úmida e levados ao rompimento em prensa automática com velocidade de 0,3MPa a 0,8MPa por segundo até o ponto de ruptura. Em casos de superfície irregular do corpo de prova, deve-se fazer capeamento para regularização.

Figura 55: Cura dos corpos de prova em câmara úmida

Fonte: Autor (2018).

O corpo de prova deve ser colocado na base metálica da prensa e em seguida deve ser colocada outra base metálica no topo do corpo de prova para que a força aplicada seja distribuída por toda a superfície. O ensaio deve ser iniciado e no final devem ser anotados os valores de penetração (c.mm) e da carga de ruptura (kgf).

A resistência a compressão simples é encontrada pela expressão 22:

$$RCS = \frac{F}{Área} \tag{22}$$

Em que:

RCS é a resistência a com pressão simples, em kgf/cm²;

F é a carga de ruptura obtida no ensaio, em kgf;

$Área$ é a área de aplicação da força, em cm².

Nessa pesquisa foram moldados corpos de prova para as idades de 7 e 14 dias, uma vez que a idade de 28 dias não seria atingida antes da entrega final do trabalho. Totalizando 4 corpos de prova, sendo dois para a mistura solo-cal e dois para a mistura solo-RAP-cal. A figura 56 expõe o ensaio de resistência a compressão simples e o corpo de prova após o rompimento.

Figura 56: Rompimento do corpo de prova: (a) rompimento utilizando máquina de ruptura e (b) corpo de prova fissurado após ensaio.

Fonte: Autor (2018).

4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com as misturas estudadas. A metodologia aplicada em cada ensaio segue a exposta no capítulo anterior.

4.1 RESULTADO DOS ENSAIOS

4.1.1 Classificação MCT

Na tabela 2 são apresentados os valores encontrados para os coeficientes c', d' e e'. Também é exposto o valor da perda por imersão P_i resultante do ensaio de perda de massa por imersão.

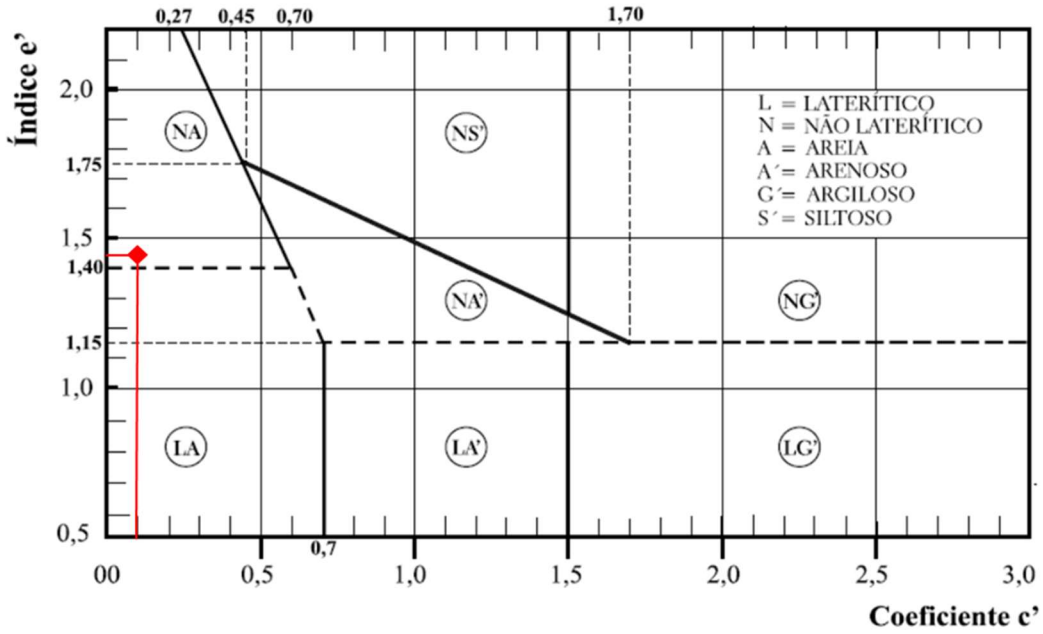
Tabela 1: Resultados do ensaio de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão.

Amostra	Coeficiente c'	Coeficiente d'	Pi (%)	Coeficiente e'
Solo natural	0,09	7,23	12,93	1,43

Fonte: Autor (2018).

Colocando esses valores na carta para classificação dos solos obteremos a classificação do solo como NA, conforme o gráfico 7.

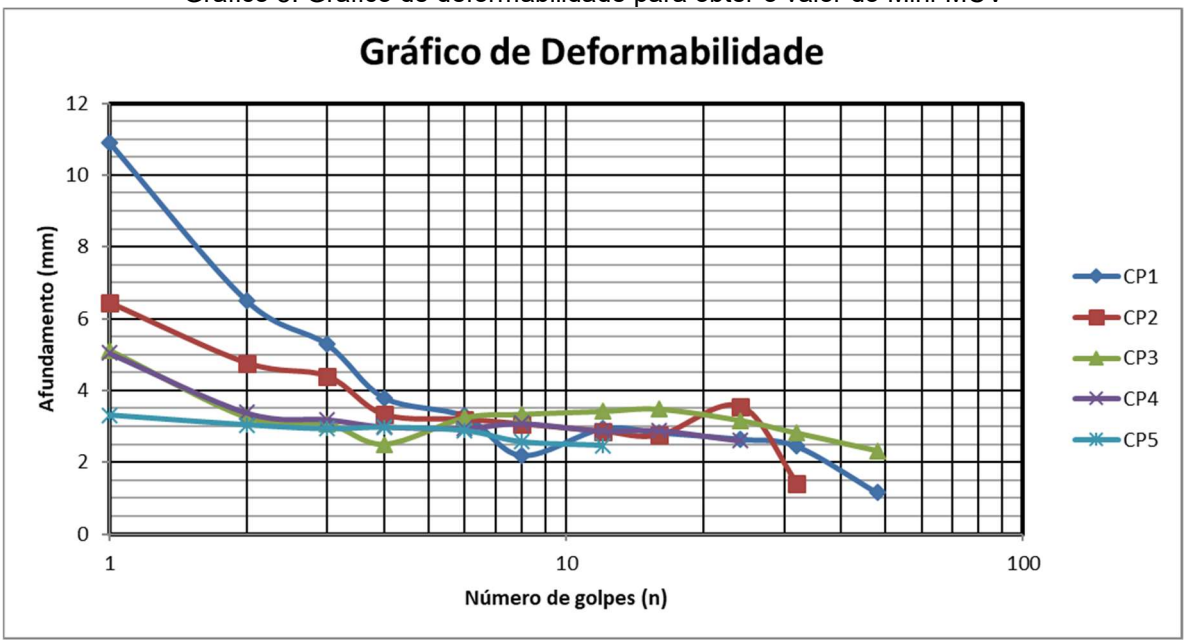
Gráfico 7: Classificação do solo utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2018).

No ensaio existiu dificuldade em determinar o valor do Mini-MCV, uma vez que apenas duas curvas tocaram na altura de 2mm, sendo utilizados apenas as curvas CP1 e CP2 na classificação do solo. No gráfico 8 são expostas as curvas obtidas para a elaboração do gráfico de deformabilidade.

Gráfico 8: Gráfico de deformabilidade para obter o valor do Mini-MCV



Fonte: Autor (2018).

Pelo fato de apenas 2 curvas mini-mcv terem tocado na altura 2mm, podem ter ocorrido inconsistências com o resultado do gráfico, uma vez que em outros projetos de pesquisa esse solo obteve classificação LA (SOARES, 2018; SILVA, 2018). Percebe-se, também, que o valor do índice e' está muito próximo do limite entre as classificações NA e LA, que corresponde ao valor e'=1,40.

4.1.2 Análise Granulométrica

Primeiramente foi realizado o ensaio de granulometria com o solo, resíduo asfáltico fresado (RAP) virgem, RAP destorroado e o material resultante do ensaio de teor de ligante asfáltico.

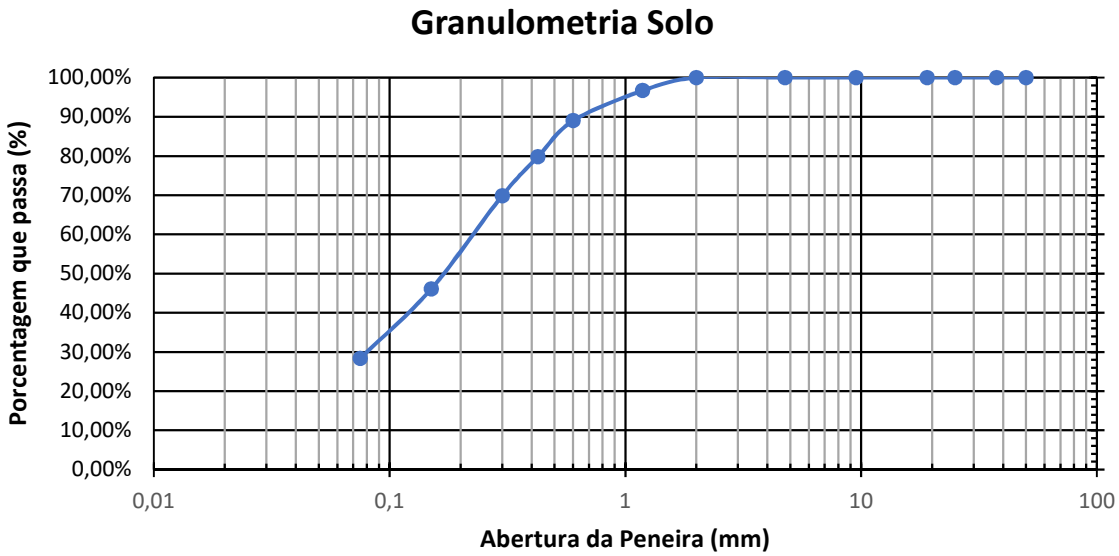
A partir da curva granulométrica, no gráfico 9, percebe-se que o solo possui predominantemente areia em suas partículas, conforme tabela 3.

Tabela 2: Composição do solo conforme ABNT NBR 6502:1995.

Descrição	%
Areia fina, Silte e Argila	56,00%
Areia média	33,02%
Areia grossa	10,98%

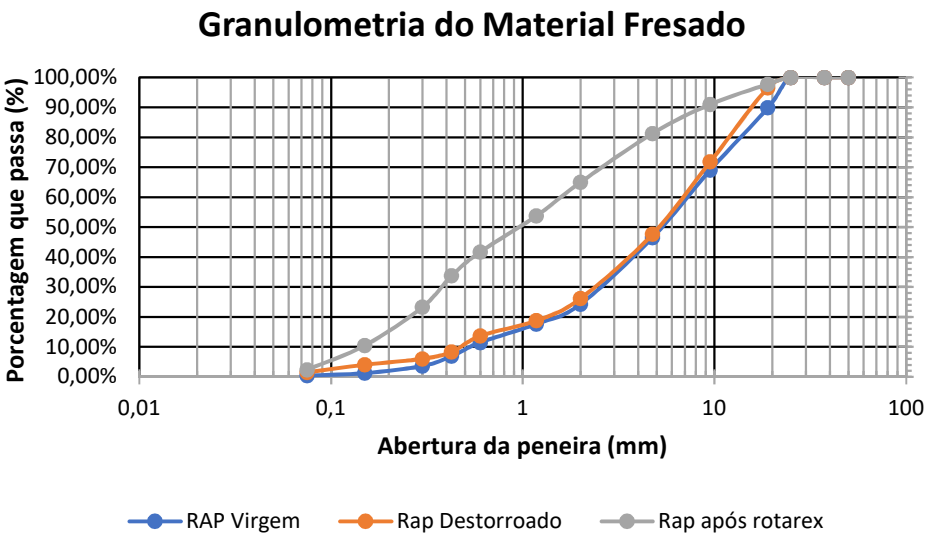
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 9: Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor (2018).

Gráfico 10: Curva granulométrica do material fresado



Fonte: Autor (2018).

A partir da análise das curvas granulométricas, do gráfico 10, resultantes para o peneiramento do material fresado, percebe-se que, após o destorroamento do

material, a quantidade de finos na amostra teve um pequeno aumento. Nota-se também que essa quantidade tornou a subir quando foi realizada a extração do ligante asfáltico. Isso mostra que a presença do ligante asfáltico ocasiona na formação de grumos que não possuem a mesma resistência do agregado original, podendo se desagregar durante o processo de mistura e compactação.

Por esse motivo, foi utilizada a granulometria do material após a extração do betume no processo de enquadramento das misturas nas faixas da norma DNIT 141/2010 para a realização da estabilização granulométrica.

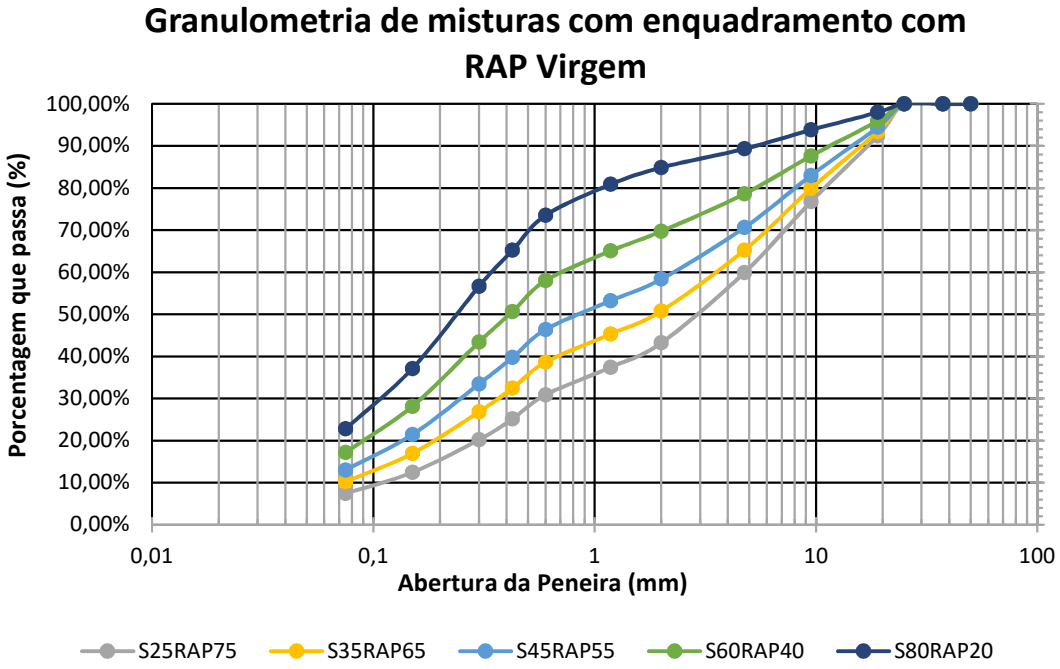
Contudo, outras pesquisas utilizaram a granulometria do RAP virgem no enquadramento (MOLZ, 2017; BARROS, 2013). Dessa forma, será feito o enquadramento das misturas com a granulometria antes e depois da extração do ligante e em seguida a verificação da faixa de enquadramento. Na tabela 4 tem-se o enquadramento com o RAP virgem e no gráfico 11 as suas curvas granulométricas. Na tabela 5 tem-se o enquadramento com o RAP após a extração do ligante e no gráfico 12 as suas curvas granulométricas.

Tabela 3: Enquadramento das misturas com granulometria do RAP Virgem

Peneira	Abertura peneira	Granulometria (% Passante)		ENQUADRAMENTO				
		Solo	RAP Virgem	S25RAP75	S35RAP65	S45RAP55	S60RAP40	S80RAP20
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	100,00%	89,85%	92,39%	93,40%	94,42%	95,94%	97,97%
3/8"	9,5	100,00%	69,06%	76,79%	79,89%	82,98%	87,62%	93,81%
4	4,75	100,00%	46,53%	59,90%	65,25%	70,59%	78,61%	89,31%
10	2	100,00%	24,28%	43,21%	50,78%	58,35%	69,71%	84,86%
16	1,18	96,67%	17,66%	37,41%	45,31%	53,21%	65,06%	80,87%
30	0,6	89,02%	11,48%	30,86%	38,62%	46,37%	58,00%	73,51%
40	0,425	79,79%	6,92%	25,14%	32,43%	39,71%	50,64%	65,21%
50	0,3	69,87%	3,63%	20,19%	26,81%	33,44%	43,37%	56,62%
100	0,15	46,07%	1,23%	12,44%	16,93%	21,41%	28,14%	37,10%
200	0,075	28,35%	0,45%	7,43%	10,22%	13,01%	17,19%	22,77%
Faixa de enquadramento				**C**	**D**	**D**	**F**	**F**

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 11: Curvas granulométricas das misturas enquadradas com RAP virgem



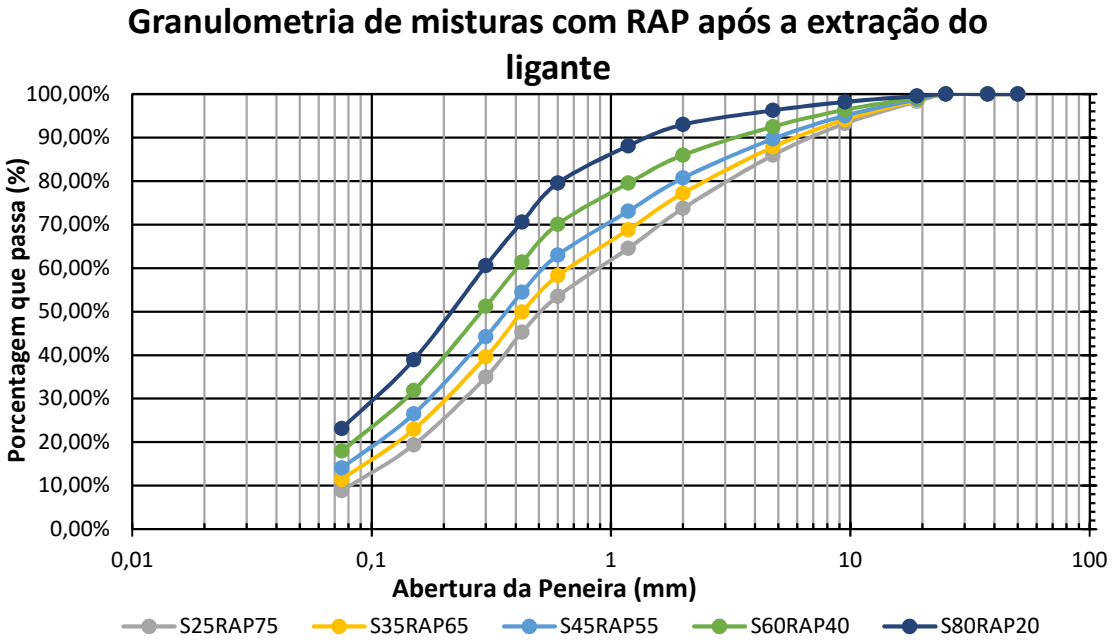
Fonte: Autor (2018).

Tabela 4: Enquadramento das misturas com granulometria do RAP após extração do ligante

Peneira	Abertura peneira	Granulometria (% Passante)		ENQUADRAMENTO				
		Solo	RAP após Rotarex	S25RAP75	S35RAP65	S45RAP55	S60RAP40	S80RAP20
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	100,00%	97,74%	98,30%	98,53%	98,76%	99,10%	99,55%
3/8"	9,5	100,00%	90,97%	93,23%	94,13%	95,04%	96,39%	98,19%
4	4,75	100,00%	81,28%	85,96%	87,84%	89,71%	92,51%	96,26%
10	2	100,00%	64,96%	73,72%	77,22%	80,73%	85,98%	92,99%
16	1,18	96,67%	53,81%	64,52%	68,81%	73,10%	79,52%	88,10%
30	0,6	89,02%	41,71%	53,54%	58,27%	63,00%	70,10%	79,56%
40	0,425	79,79%	33,78%	45,28%	49,88%	54,48%	61,38%	70,58%
50	0,3	69,87%	23,31%	34,95%	39,61%	44,26%	51,25%	60,56%
100	0,15	46,07%	10,49%	19,39%	22,94%	26,50%	31,84%	38,96%
200	0,075	28,35%	2,34%	8,84%	11,45%	14,05%	17,95%	23,15%
Faixa de enquadramento				**E**	**E/F**	**F**	**F**	**F**

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 12: Curvas granulométricas das misturas enquadradas com RAP após extração do ligante



Fonte: Autor (2018).

Após o enquadramento, percebe-se que todas as misturas se encaixaram em uma das faixas propostas pela norma, seja com utilização da granulometria do RAP virgem, seja com uso da granulometria do RAP após extração do ligante. A única diferença observada no processo de enquadramento é a faixa em que cada mistura ficou. No enquadramento com o RAP virgem, tivemos enquadramento nas faixas C, D e F; já na utilização do material após extração do ligante tivemos fixas E e F.

4.1.3 Equivalente de Areia (EA)

Seguindo as orientações da DNER 054/97, foi realizado o ensaio de equivalente de areia para três amostras de solo e os resultados encontram-se na tabela 6:

Tabela 5: Resultado do ensaio de equivalente de areia

	Amostra 1	**Amostra 2**	**Amostra 3**
h1	25,1	25,6	25,3
h2	2	2,3	2,2
EA (%)	7,97%	8,98%	8,70%
EA médio (%)		**8,55%**	

Fonte: Autor (2018).

Segundo DNIT 141/2010, para bases, o equivalente de areia deve ser menor que 30% quando os limites de limite de liquidez e índice de plasticidade forem ultrapassados. O resultado obtido está dentro da recomendação da norma, logo é aceitável.

A norma DNIT 139/2010 não faz exigências a respeito dessa característica para sub-base.

4.1.4 Limites de consistência

4.1.4.1 Limite de plasticidade

A amostra de solo foi analisada e todas as etapas do ensaio foram realizadas, porém, não foi possível realizar o ensaio devido a incapacidade de moldar o solo, conforme figura 57:

Figura 57: Tentativa de moldagem do solo

Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que o solo se fragmentou antes mesmo de ser moldado, logo o ensaio não pôde ser realizado e o solo é classificado como não plástico (NP).

4.1.4.2 Limite de liquidez

Conforme nota 3 do item 6 da DNER – ME 082/94 (1994, p.03), “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)”.

Pela classificação granulométrica, o solo é composto em grande parte por partículas arenosas e o ensaio de limite de plasticidade foi realizado primeiro. Como o limite de plasticidade não pode ser determinado, ambos são considerados como não plástico, logo o limite de liquidez também é considerado não plástico.

4.1.4.3 Índice de plasticidade

De acordo com a nota 2 do item 6 da DNER – ME 082/94 (1994, p.03), “Quando o limite de liquidez ou limite de plasticidade não puderem ser determinados, anota-se o índice de plasticidade como NP (não plástico).

Logo obtém-se o resultado exposto na tabela 7 para os limites de consistência:

Tabela 6: Resultados dos limites de consistência

Amostra	LP (%)	LL (%)	IP (%)
Solo natural	NP	NP	NP

Fonte: Autor (2018).

A norma DNIT 139/2010 não faz exigências a respeito dessa característica para sub-base. Já a norma DNIT 141/2010, no caso de material para aplicação em bases, exige LL ≤ 25% e IP ≤ 6% para material passante na peneira n°40, logo está de acordo.

4.1.5 Classificação do solo pelo método TRB (antigo HRB)

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade o solo pode ser classificado como A-2-4, um grupo onde predominam os pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas e seu comportamento é considerado excelente a bom quando utilizado em subleito de pavimentos. A tabela 8 expõe os utilizados na classificação, assim como o resultado do índice de grupo encontrado.

Tabela 7: Coeficientes para classificação do solo

coeficiente	valor
p	28,35
a	0
b	0
c	0
d	0
IG	0

Fonte: Autor (2018).

4.1.6 Abrasão “Los Angeles”

A norma DNIT 141/2010 para bases estabilizadas granulometricamente faz exigência de um índice de desgaste a abrasão “Los Angeles” ≤ 55%, enquanto DNIT 139/2010 para sub-bases não exige quanto a este critério.

O teste de abrasão foi realizado em 3 (três) amostras de resíduo asfáltico fresado e o resultado foi satisfatório, conforme tabela 9:

Tabela 8: Resultado do ensaio de abrasão a "Los Angeles"

Graduação da amostra do ensaio	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste médio (%)
A	5100,85	2950,9	42,15%	
A	5008,6	2856,2	42,97%	42,36%
A	4977,70	2889,0	41,96%	

Fonte: Autor (2018).

4.1.7 Densidade e Absorção

O ensaio de densidade foi realizado para os agregados miúdos do solo e agregados miúdos e graúdos do RAP. Para os agregados miúdos, de ambos os materiais, foram realizados os testes três vezes.

Para agregado graúdo do RAP, o teste foi realizado uma vez, junto com o ensaio de absorção. Os resultados dos ensaios são expostos nas tabelas 10 a 12.

Tabela 9: Resultado da massa específica do solo

Solo			
Leitura inicial	**Leitura final**	**ρ(g/cm³)**	**ρ médio(g/cm³)**
200	390	2,632	
200	389	2,646	2,636
200	390	2,632	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 10: Resultado da massa específica do agregado miúdo do RAP

Agregado miúdo do RAP			
Leitura inicial	**Leitura final**	**ρ(g/cm³)**	**ρ médio(g/cm³)**
200	450	2,000	
200	449	2,008	2,003
200	450	2,000	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 11: Resultado da densidade aparente e absorção do agregado graúdo do RAP

Agregado graúdo do RAP	
Densidade aparente (g/cm³)	**Absorção**
1,723	2,05%

Fonte: Autor (2018).

4.1.8 Índice de Forma

O ensaio foi realizado conforme ABNT NBR 7809:2006 Versão corrigida 2008 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. As normas de base e sub-base estabilizadas granulometricamente não fazem exigência quanto à forma dos agregados.

Foi realizado a verificação com o material fresado. As medidas dos grãos encontram-se no apêndice A e na tabela 13 o resultado final:

Tabela 12: Quantidade de cada tipo de grão conforme a sua forma

Tipo	%
Lamelar	40,50%
Cúbica	56,50%
Alongada	2,50%
Alongada - lamelar	0,50%

Fonte: Autor (2018).

Tabela 13: Média das dimensões dos grãos

Média das relações		Classificação
b/a	c/b	CÚBICA
0,7	0,5	

Fonte: Autor (2018).

4.1.9 Angularidade

O teste de angularidade foi realizado com três amostras de solo que foram preparadas conforme as especificações do item 3.3.8. As normas de estabilização de base e sub-base não definem critérios para angularidade. Os resultados do ensaio são mostrados na tabela 15:

Tabela 14: Resultado do ensaio de angularidade

U (%)	U média (%)
49,55%	50,28%
50,13%	
51,17%	

Fonte: Autor (2018).

4.1.10 Teor de Ligante de Asfáltico

O ensaio, realizado com auxílio do equipamento rotarex, foi efetuado em três amostras do material fresado, obtendo uma média do teor de ligante. O resultado encontrado está na tabela 16.

Tabela 15: Resultado do ensaio de teor de ligante de asfáltico

Peso inicial	Peso final	% ligante asfáltico	Média % ligante asfáltico
1018,6	953,7	6,37%	6,12%
1025,4	966,9	5,71%	
1070,9	1003,7	6,28%	

Fonte: Autor (2018).

4.1.11 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado com o solo natural e em todas as misturas, conforme proporções já estabelecidas. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 17 a 25 e nos gráficos 13 a 22.

Para o solo natural foram obtivas as seguintes umidades e seus pesos específicos aparentes secos, conforme tabela 17.

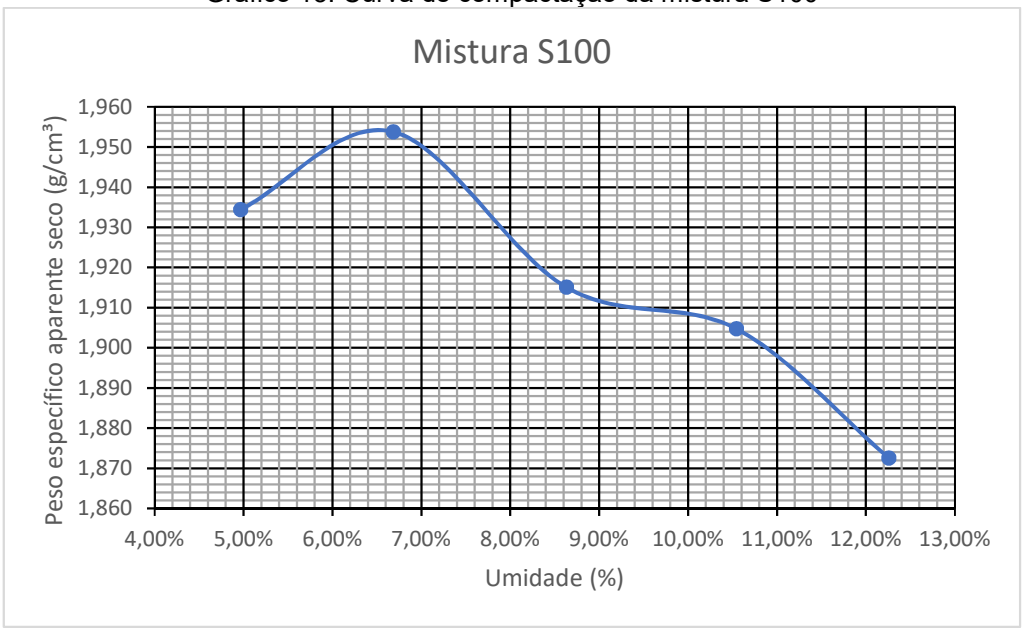
Tabela 16: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S100

Mistura		**S100**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	2,031	4,97%	1,934
2	2,084	6,68%	1,954
3	2,080	8,63%	1,915
4	2,106	10,54%	1,905
5	2,102	12,26%	1,873

Fonte: Autor (2018).

A partir da tabela 17 é traçada a curva de compactação para obter a umidade ótima, sendo 6,5%, e o peso específico aparente seco máximo, que foi 1,954 g/cm³. No gráfico 13 tem-se a curva de compactação para a mistura S100.

Gráfico 13: Curva de compactação da mistura S100



Fonte: Autor (2018)

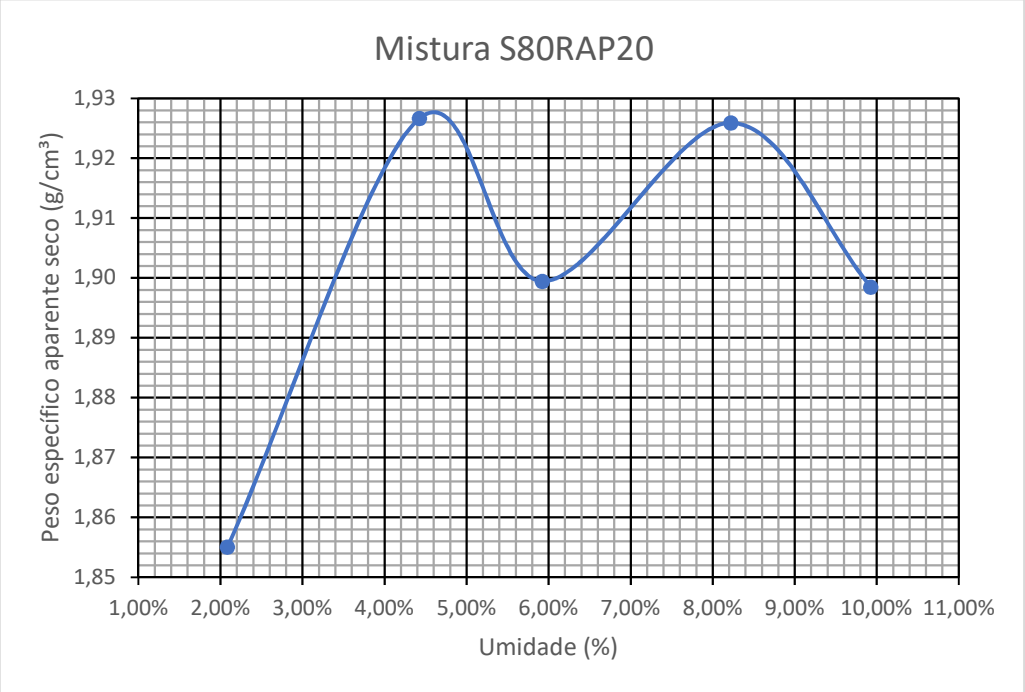
.Para a mistura S80RAP20 umidade ótima de 4,6% e peso específico aparente seco máximo 1,928 g/cm³. Na tabela 18 e no gráfico 14 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 17: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S80RAP20

Mistura		**S80RAP20**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	1,894	2,09%	1,855
2	2,012	4,43%	1,927
3	2,012	5,93%	1,899
4	2,084	8,22%	1,926
5	2,087	9,93%	1,898

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 14: Curva de compactação da mistura S80RAP20



Fonte: Autor (2018).

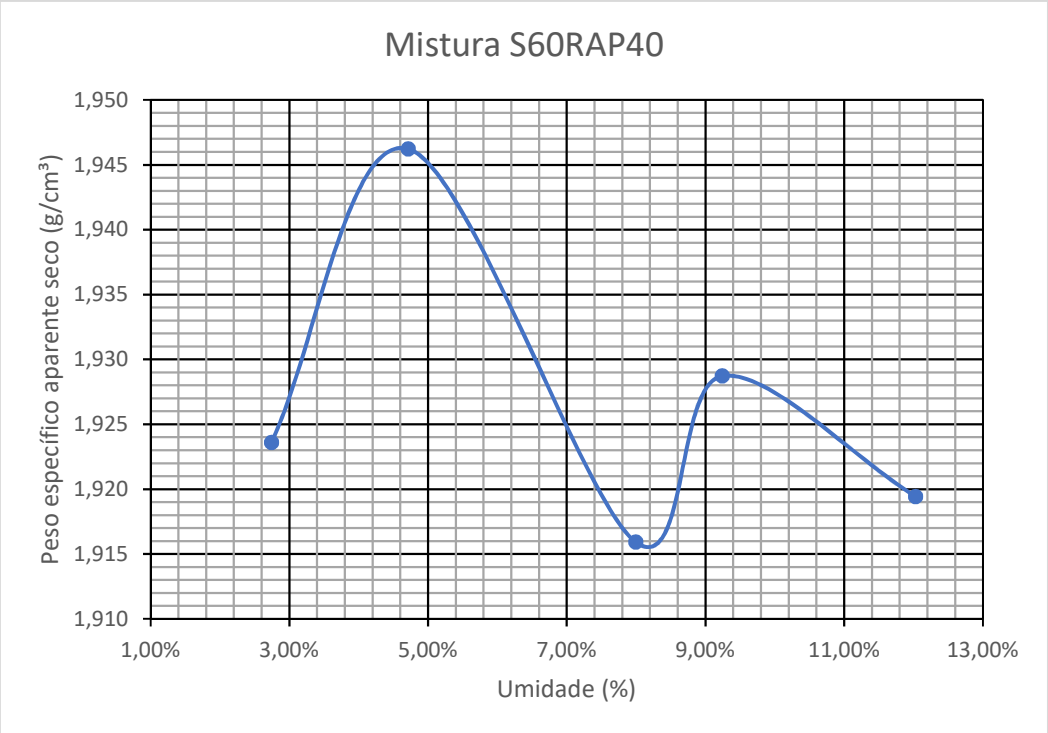
Para a mistura S60RAP40 umidade ótima de 4,6% e peso específico aparente seco máximo 1,946 g/cm³. Na tabela 19 e no gráfico 15 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 18: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S60RAP40

Mistura		**S60RAP40**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	1,976	2,74%	1,924
2	2,038	4,72%	1,946
3	2,069	8,00%	1,916
4	2,107	9,24%	1,929
5	2,150	12,03%	1,919

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 15: Curva de compactação da mistura S60RAP40



Fonte: Autor (2018).

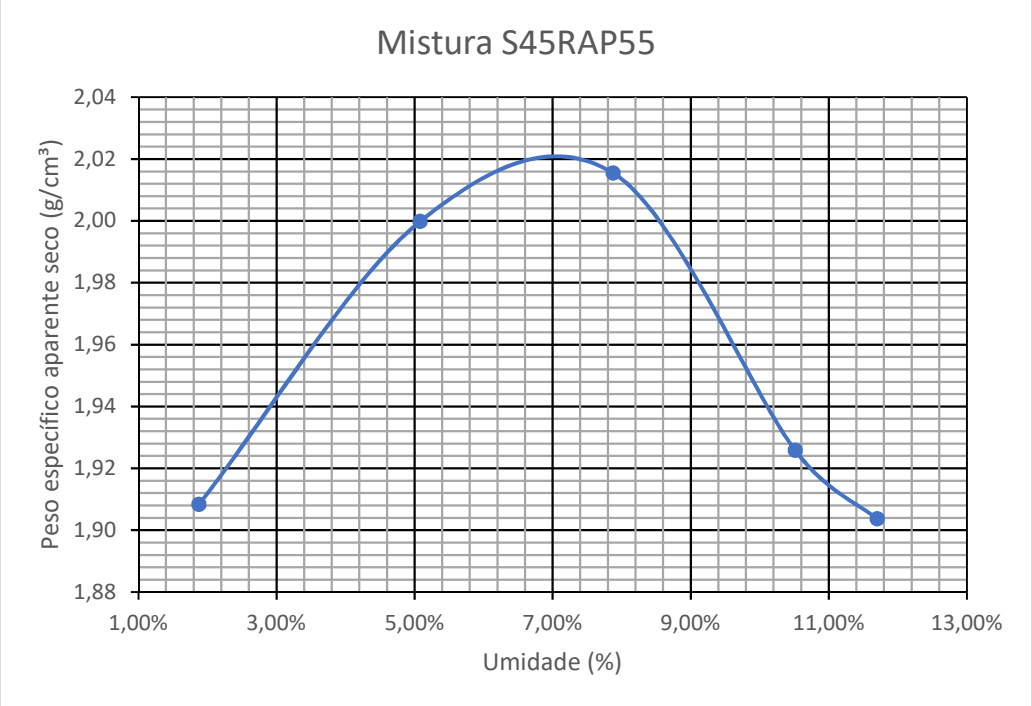
Para a mistura S45RAP55 umidade ótima de 7,0% e peso específico aparente seco máximo 2,024g/cm³. Na tabela 20 e no gráfico 16 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 19: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S45RAP55

Mistura		**S45RAP55**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	1,944	1,88%	1,908
2	2,101	5,08%	2,000
3	2,174	7,88%	2,015
4	2,128	10,52%	1,926
5	2,126	11,70%	1,904

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 16: Curva de compactação da mistura S45RAP55



Fonte: Autor (2018).

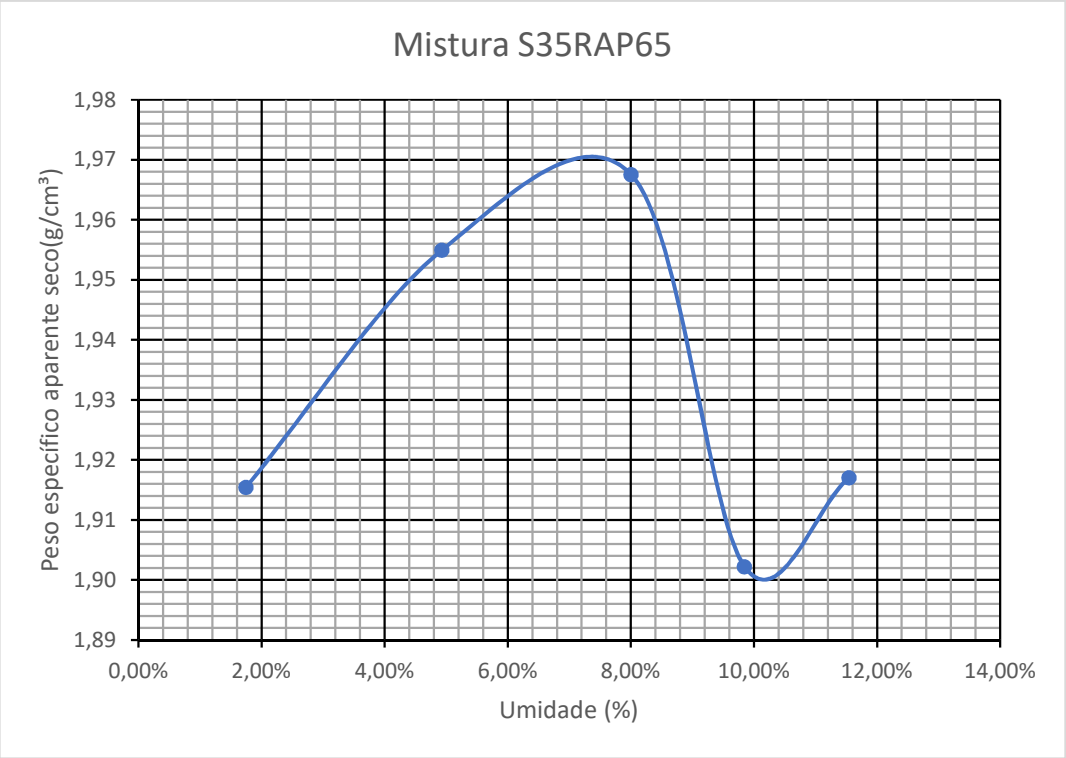
Para a mistura S35RAP65 umidade ótima de 7,4% e peso específico aparente seco máximo 1,972 g/cm³. Na tabela 21 e no gráfico 17 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 20: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S35RAP65

Mistura		**S35RAP65**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	1,949	1,75%	1,915
2	2,051	4,93%	1,955
3	2,125	8,00%	1,968
4	2,090	9,85%	1,902
5	2,138	11,54%	1,917

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 17: Curva de compactação da mistura S35RAP65



Fonte: Autor (2018).

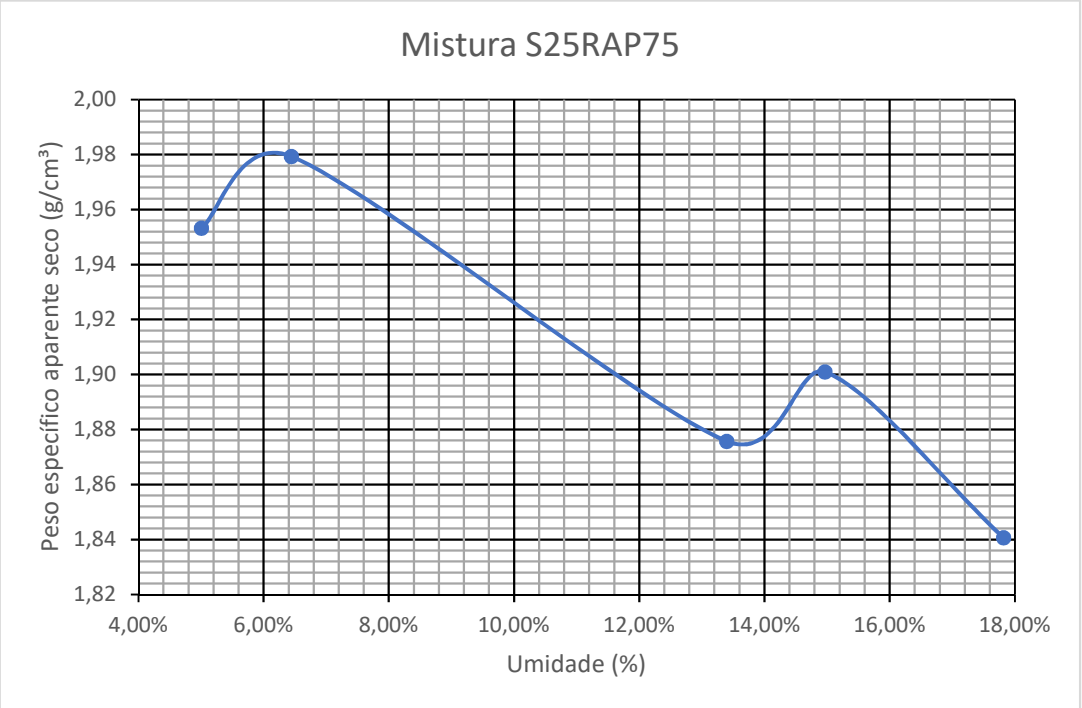
Para a mistura S25RAP75 umidade ótima de 6,2% e peso específico aparente seco máximo 1,98 g/cm³. Na tabela 22 e no gráfico 18 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 21: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S25RAP75

Mistura		**S25RAP75**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	2,051	5,01%	1,953
2	2,107	6,44%	1,979
3	2,127	13,40%	1,876
4	2,185	14,97%	1,901
5	2,169	17,82%	1,841

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 18: Curva de compactação da mistura S25RAP75



Fonte: Autor (2018).

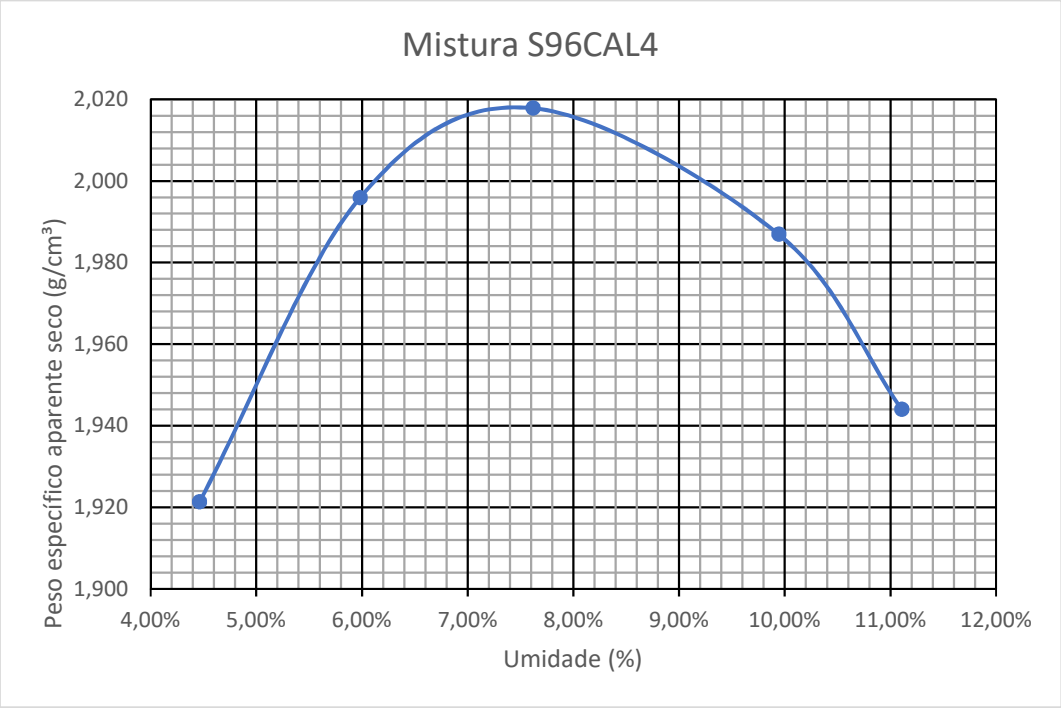
Para a mistura S96CAL4 umidade ótima de 7,5% e peso específico aparente seco máximo 2,018 g/cm³. Na tabela 23 e no gráfico 19 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 22: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S96CAL4

Mistura		**S96CAL4**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	2,007	4,46%	1,921
2	2,115	5,98%	1,996
3	2,172	7,62%	2,018
4	2,184	9,94%	1,987
5	2,160	11,11%	1,944

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 19: Curva de compactação da mistura S96CAL4



Fonte: Autor (2018).

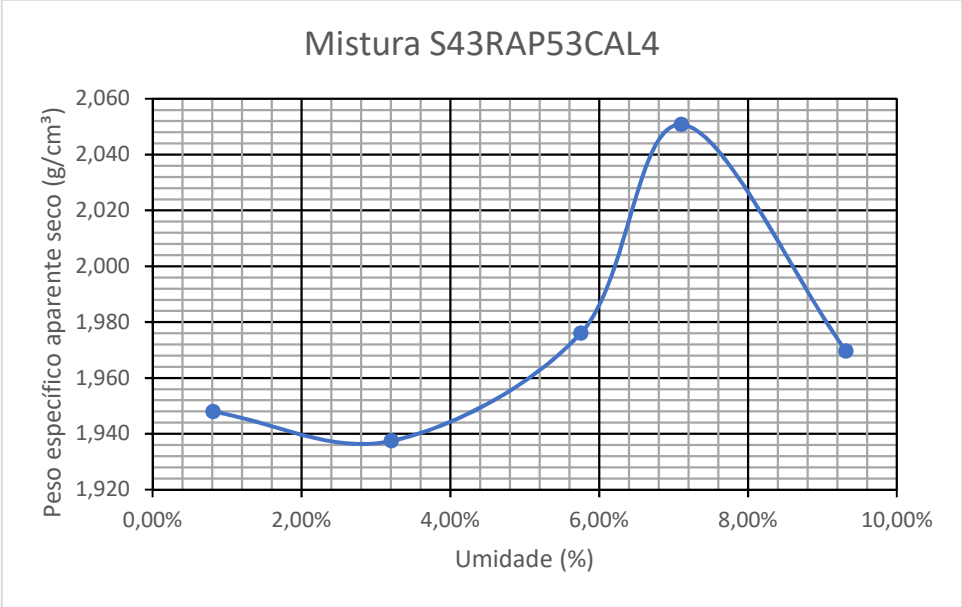
Para a mistura S43RAP53CAL4 umidade ótima de 7,1% e peso específico aparente seco máximo 2,05 g/cm³. Na tabela 24 e no gráfico 20 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 23: Resultado do ensaio de compactação para a mistura S43RAP53CAL4

Mistura		**S43RAP53CAL4**	
Ponto de compactação	**Peso específico aparente (g/cm³)**	**Umidade (%)**	**Peso específico aparente seco (g/cm³)**
1	1,964	0,81%	1,948
2	2,000	3,21%	1,937
3	2,090	5,75%	1,976
4	2,196	7,11%	2,051
5	2,153	9,32%	1,970

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 20: Curva de compactação da mistura S43RAP53CAL4



Fonte: Autor (2018).

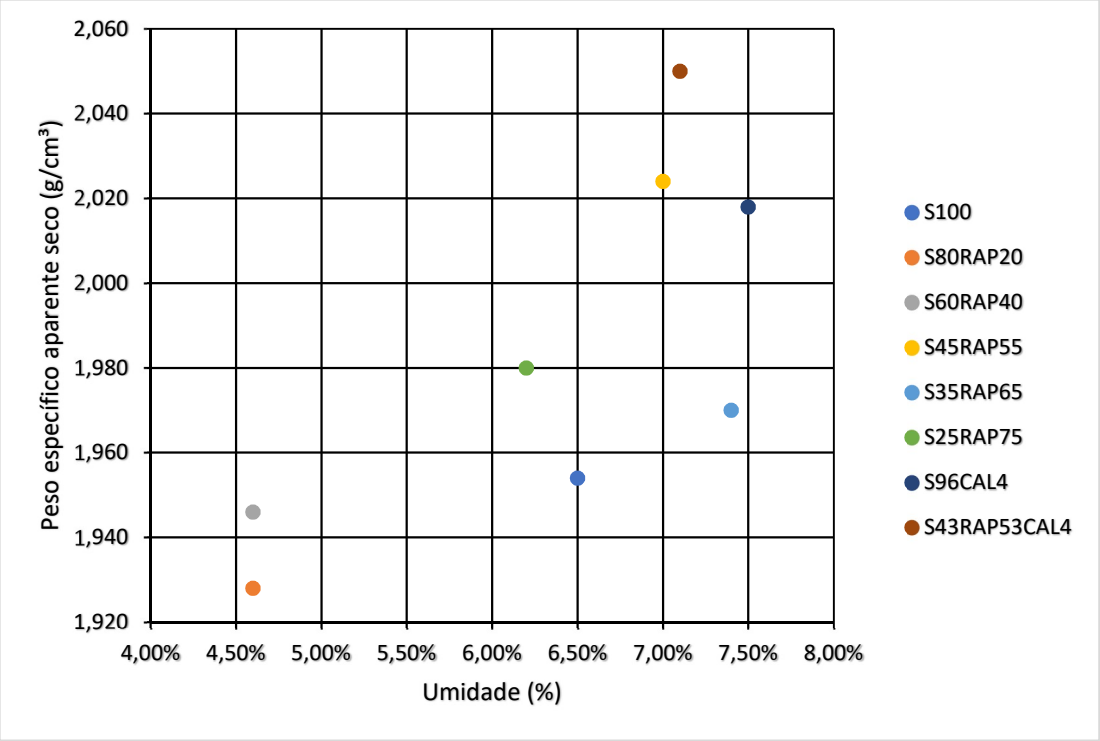
A tabela 25 expõe todos os valores de umidade ótima e ρmáx obtidos, tem-se também uma comparação entre todas as curvas de compactação obtidas no gráfico 21 e no gráfico 22 são apresentadas todas as curvas de compactação obtidas.

Tabela 24: Resumo dos resultados do ensaio de compactação obtidos

Mistura	Umidade ótima	ρmáx
S100	6,50%	1,954
S80RAP20	4,60%	1,928
S60RAP40	4,60%	1,946
S45RAP55	7,00%	2,024
S35RAP65	7,40%	1,972
S25RAP75	6,20%	1,980
S96CAL4	7,50%	2,018
S43RAP53CAL4	7,10%	2,050

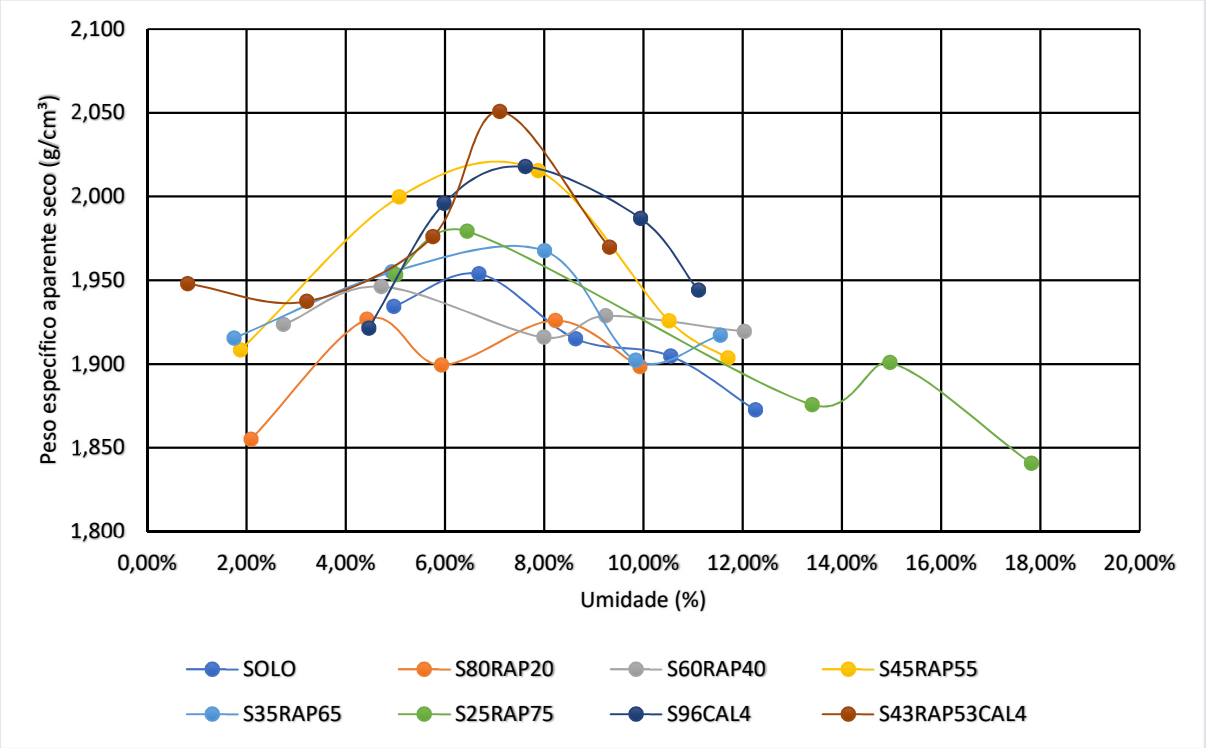
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 21: Comparação entre os resultados das misturas



Fonte: Autor (2018).

Gráfico 22: Comparação entre as curvas de compactação obtidas



Fonte: Autor (2018).

De posse dos resultados, não foram constatadas correlações entre o aumento da massa específica aparente seca com o aumento da proporção de material fresado na mistura. Percebe-se que as misturas com quantidade de RAP mais próximas de 50% foram aquelas que obtiveram maior peso específico aparente seco, S45RAP55 e S43RAP53CAL4.

4.1.12 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio foi realizado com todas as misturas apresentadas e seguiu as diretrizes da DNER 049/94, que foram apresentadas no item 3.3.11. Os gráficos 23 a 31 mostram os resultados para CBR de cada mistura, as tabelas 26 a 33 mostram os resultados do CBR.

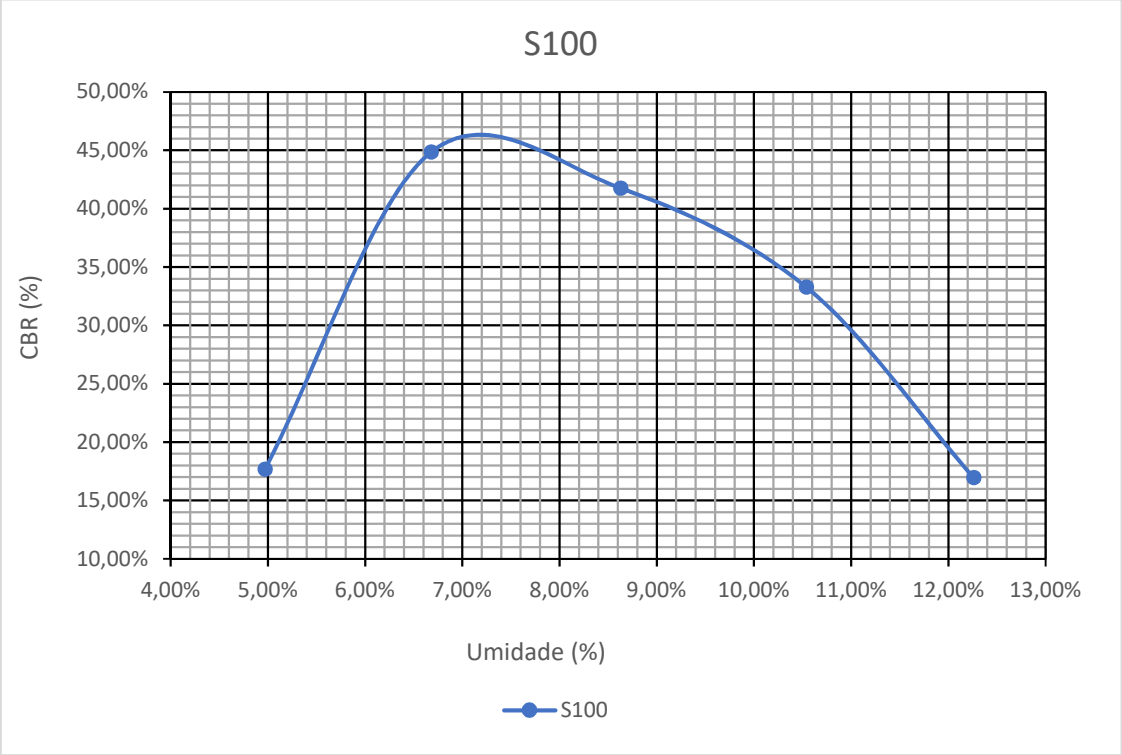
Para a mistura S100 foi encontrado CBR = 45,00% para umidade ótima de 6,5%. Na tabela 26 e no gráfico 23 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 25: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S100

Mistura	S100		
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	4,97%	0,009%	17,68%
2	6,68%	0,009%	44,85%
3	8,63%	0,009%	41,75%
4	10,54%	0,000%	33,27%
5	12,26%	0,004%	16,95%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 23: Curva de CBR para mistura S100



Fonte: Autor (2018).

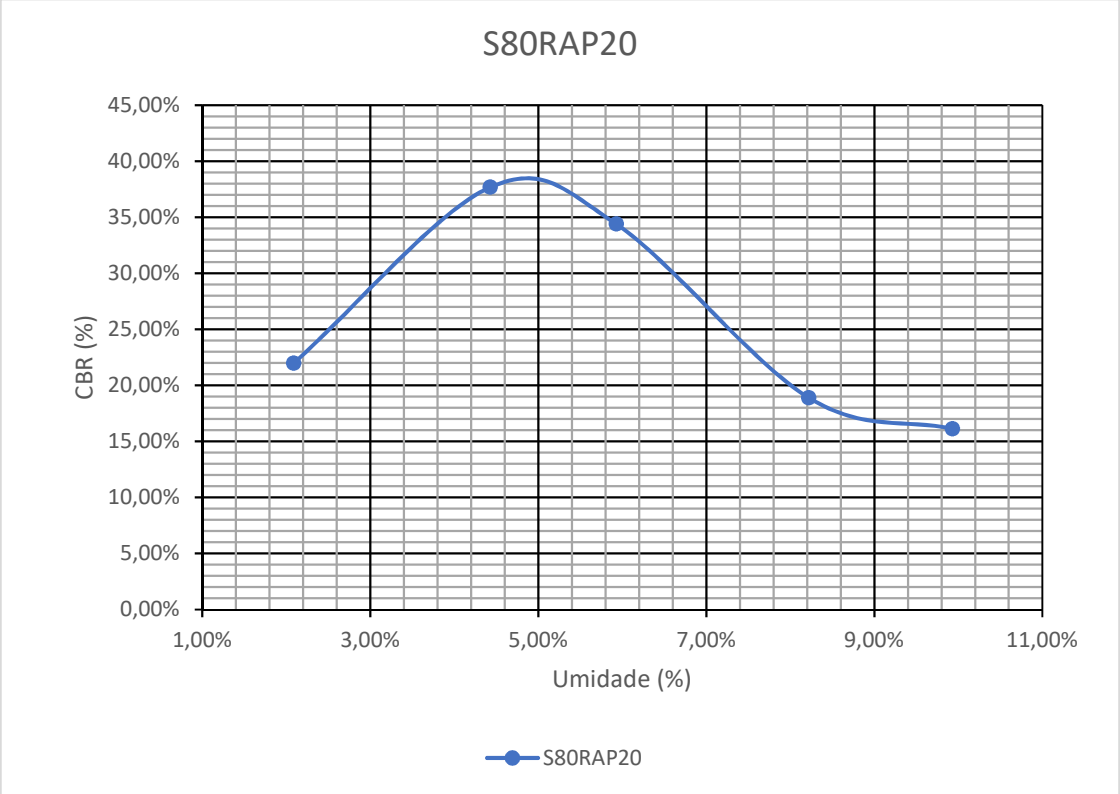
Para a mistura S80RAP20 foi encontrado CBR = 39,00% para umidade ótima de 4,6%. Na tabela 27 e no gráfico 24 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 26: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S80RAP20

Mistura		**S80RAP20**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	2,09%	0,017%	21,99%
2	4,43%	0,000%	37,68%
3	5,93%	0,000%	34,39%
4	8,22%	0,009%	18,89%
5	9,93%	0,017%	16,13%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 24: Curva de CBR para a mistura S80RAP20



Fonte: Autor (2018).

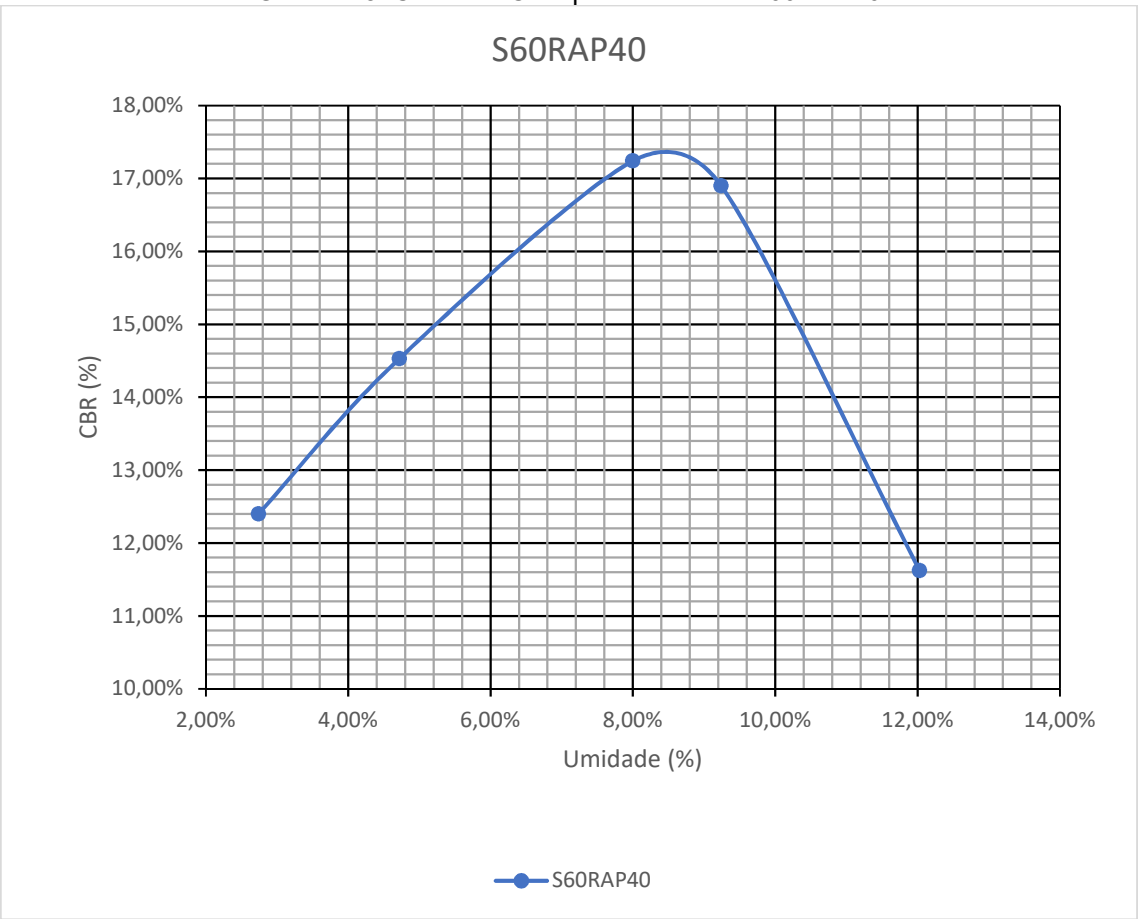
Para a mistura S60RAP40 foi encontrado CBR = 14,80% para umidade ótima de 4,6%. Na tabela 28 e no gráfico 25 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 27: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S60RAP40

Mistura		**S60RAP40**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	2,74%	0,017%	12,40%
2	4,72%	0,043%	14,53%
3	8,00%	0,017%	17,24%
4	9,24%	0,087%	16,90%
5	12,03%	0,017%	11,62%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 25: Curva de CBR para a mistura S60RAP40



Fonte: Autor (2018).

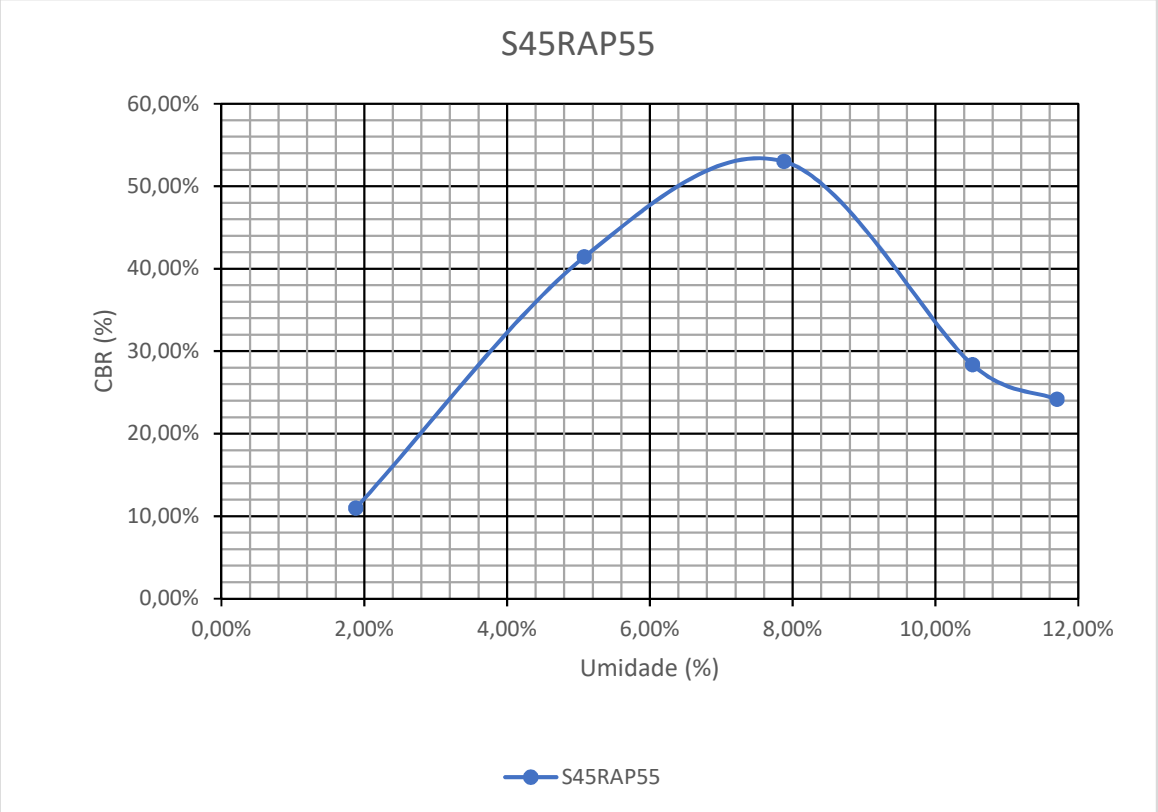
Para a mistura S45RAP55 foi encontrado CBR = 53,00% para umidade ótima de 7,00%. Na tabela 29 e no gráfico 26 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 28: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S45RAP55

Mistura		**S45RAP55**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	1,88%	0,030%	10,95%
2	5,08%	0,009%	41,41%
3	7,88%	0,035%	52,98%
4	10,52%	0,095%	28,33%
5	11,70%	0,052%	24,17%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 26: Curva de CBR para a mistura S45RAP55



Fonte: Autor (2018).

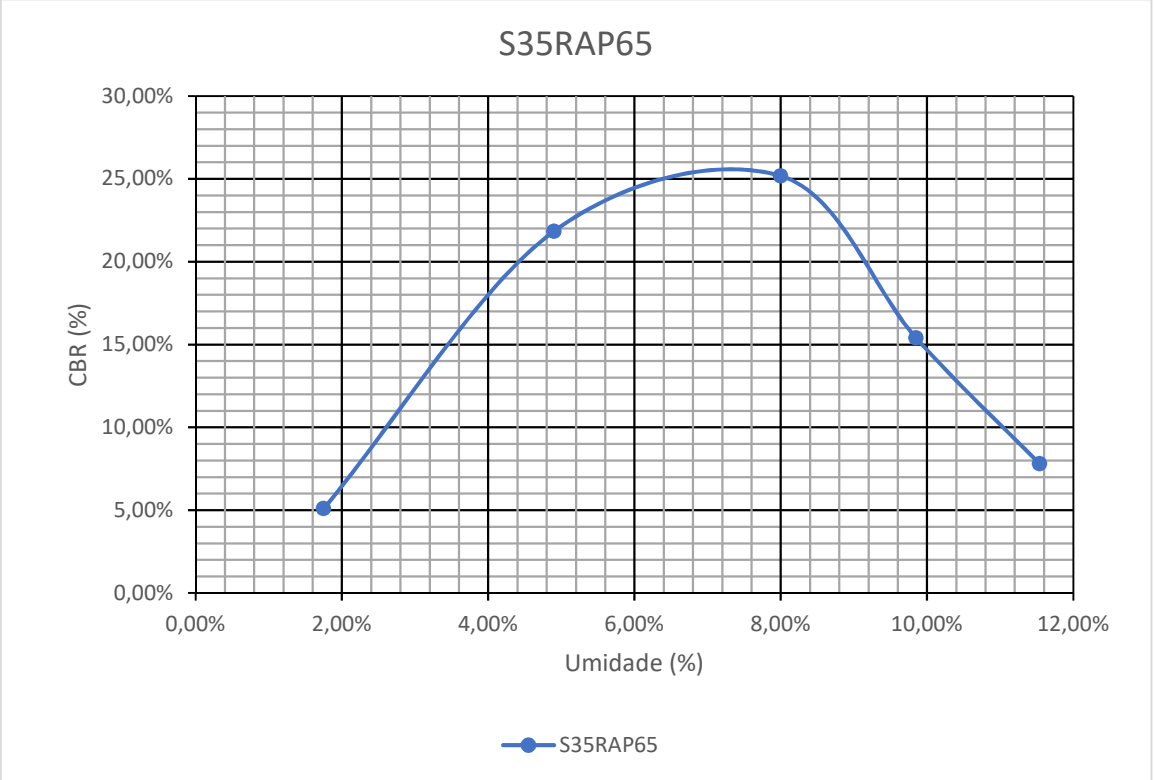
Para a mistura S35RAP65 foi encontrado CBR = 25,50% para umidade ótima de 7,40%. Na tabela 30 e no gráfico 27 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 29: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S35RAP65

Mistura		**S35RAP65**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	1,75%	0,035%	5,09%
2	4,93%	0,043%	21,84%
3	8,00%	0,104%	25,18%
4	9,85%	0,035%	15,40%
5	11,54%	0,147%	7,80%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 27: Curva de CBR para a mistura S35RAP65



Fonte: Autor (2018).

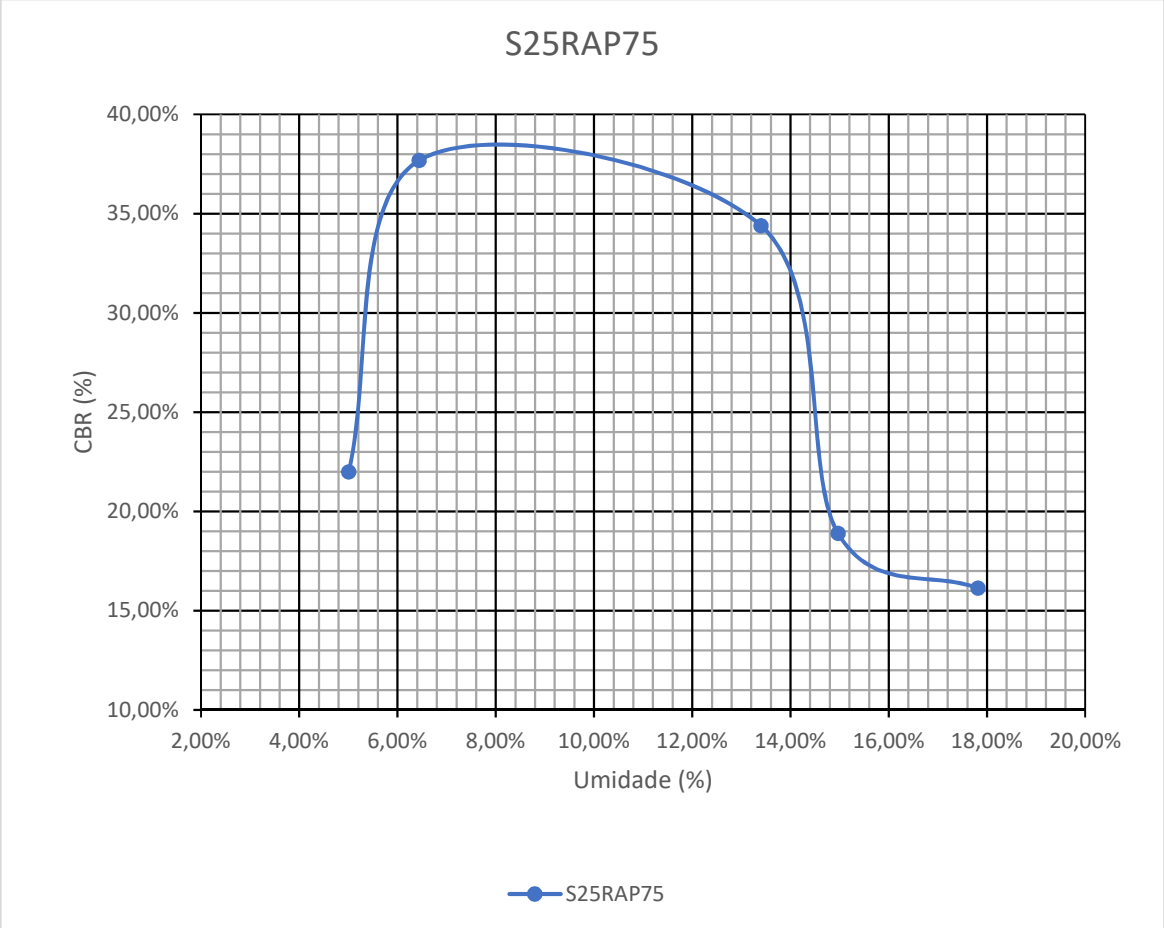
Para a mistura S25RAP75 foi encontrado CBR = 37,00% para umidade ótima de 6,20%. Na tabela 31 e no gráfico 28 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 30: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S25RAP75

Mistura		**S25RAP75**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	5,01%	0,035%	21,99%
2	6,44%	0,104%	37,68%
3	13,40%	0,216%	34,39%
4	14,97%	0,078%	18,89%
5	17,82%	0,000%	16,13%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 28: Curva de CBR para a mistura S25RAP75



Fonte: Autor (2018).

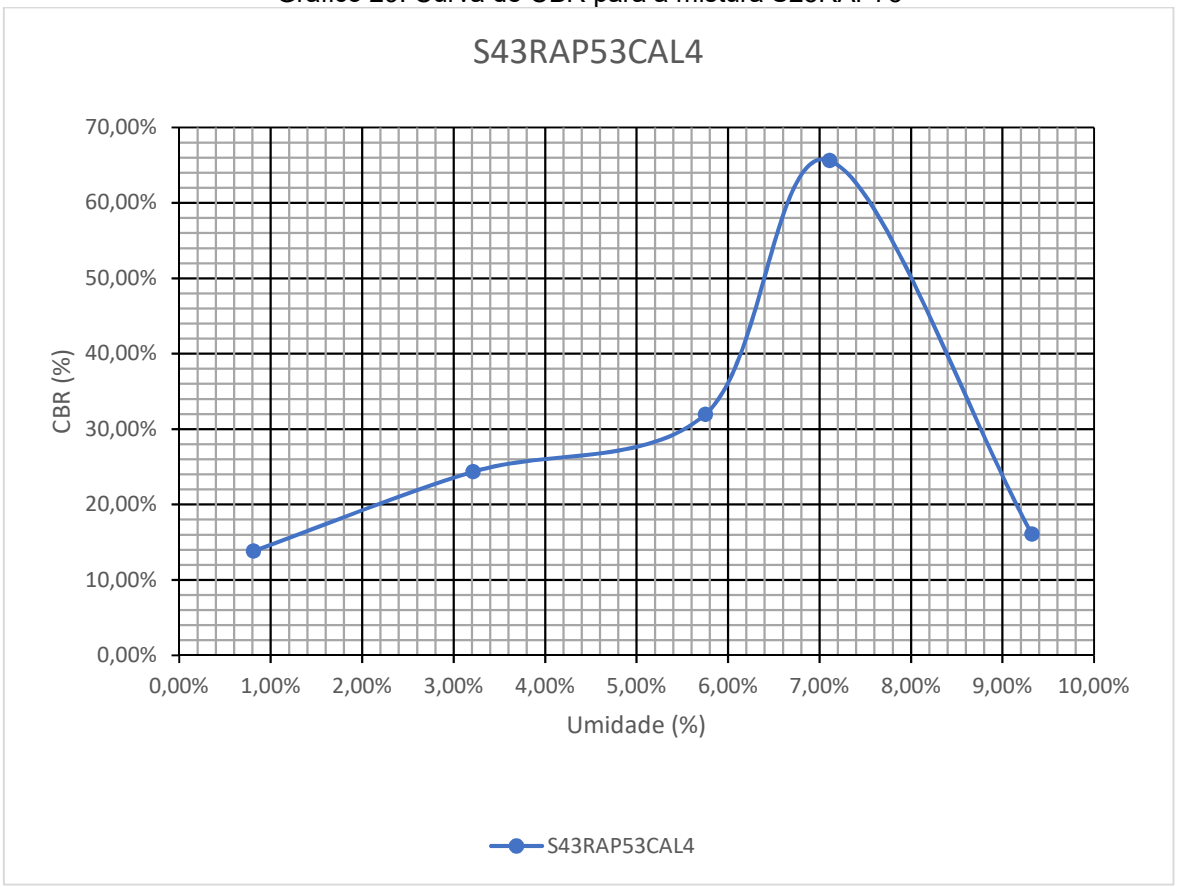
Para a mistura S43RAP53CAL4 foi encontrado CBR = 66,00 para umidade ótima de 7,10%. Na tabela 32 e no gráfico 29 são expostos os resultados do ensaio para a mistura.

Tabela 31: Resultado do ensaio de CBR para a mistura S43RAP53CAL4

Mistura		**S43RAP53CAL4**	
Ponto de compactação	**Umidade (%)**	**Expansão (%)**	**CBR (%)**
1	0,81%	0,017%	13,80%
2	3,21%	0,035%	24,34%
3	5,75%	0,009%	31,96%
4	7,11%	0,017%	65,61%
5	9,32%	0,000%	16,08%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 29: Curva de CBR para a mistura S25RAP75



Fonte: Autor (2018).

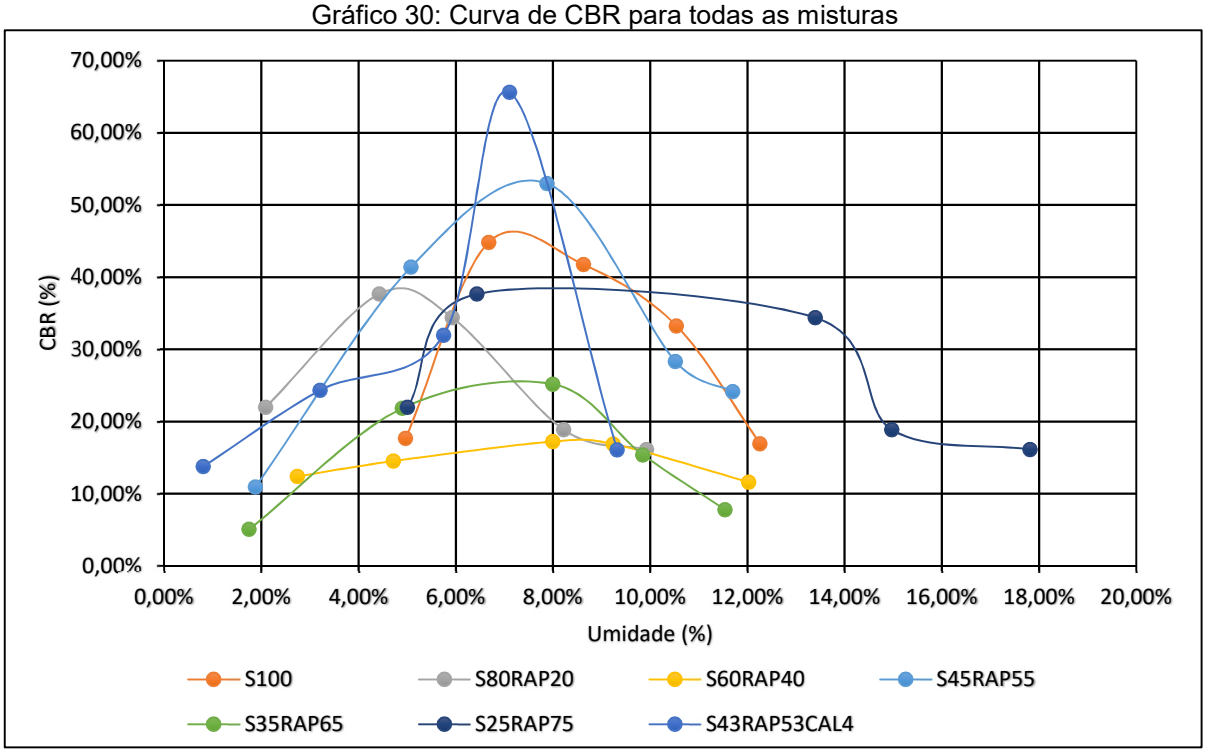
O CBR É obtido a partir do valor correspondente para a umidade ótima encontrada. Os resultados estão na tabela 33. Nos gráficos 30 e 31 temos a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 32: tabela comparativa entre os resultados obtidos

Mistura	Umidade ótima	CBR	ρmáx
S100	6,50%	45,00%	1,954
S80RAP20	4,60%	39,00%	1,928
S60RAP40	4,60%	14,80%	1,946
S45RAP55	7,00%	53,00%	2,024
S35RAP65	7,40%	25,50%	1,970
S25RAP75	6,20%	37,00%	1,980
S43RAP53CAL4	7,10%	66,00%	2,050

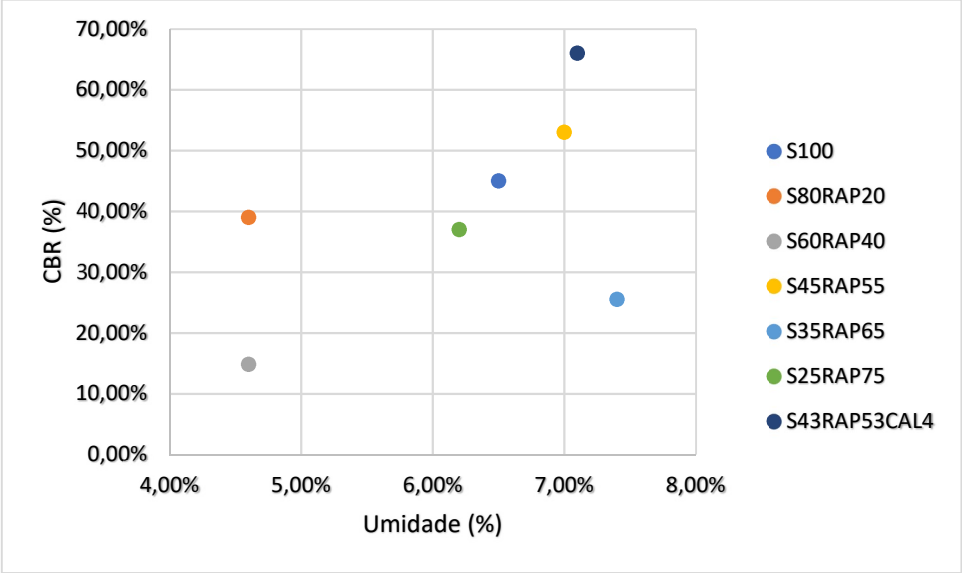
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 30: Curva de CBR para todas as misturas



Fonte: Autor (2018).

Gráfico 31: Comparação entre os pontos de CBR máximo encontrados



Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que também não pôde ser determinada nenhuma relação entre os valores de CBR e a quantidade de RAP adicionada. Porém, verifica-se que os maiores valores de CBR encontrados são os das misturas S43RAP53CAL4 e S45RAP55, coincidindo com as misturas com maiores valores de peso específico aparente seco na umidade ótima.

Nota-se que os valores do ensaio de CBR para a mistura S96CAL4 não foram apresentados devido aos dados serem inconclusivos. A curva Pressão x Penetração obtida das leituras da máquina de CBR não foram crescentes e os resultados não puderam ser utilizados. As curvas obtidas no ensaio e a curva padrão estabelecida pela norma DNIT 049/94 são apresentadas no apêndice B.

4.1.13 Resistência a Compressão Simples

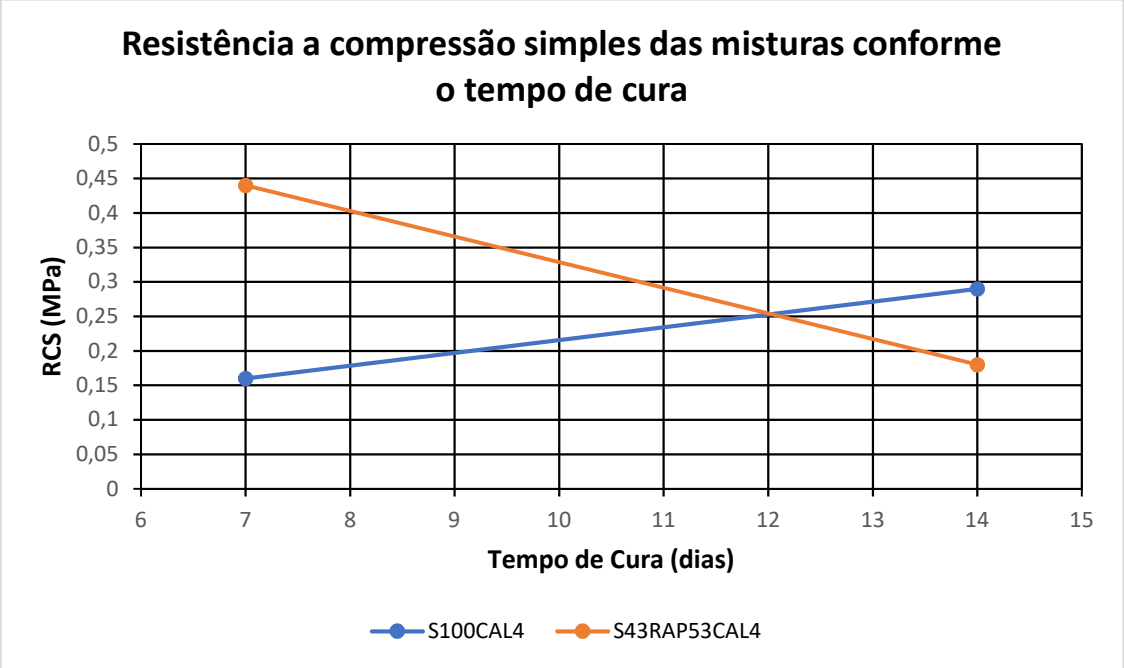
Após a realização do ensaio, os resultados do ensaio de resistência a compressão mostraram-se mais satisfatórios para a mistura S43RAP53CAL com um período de cura de 7 dias. Para um período de cura de 14 dias o resultado foi melhor para a mistura S96CAL4. Porém, percebe-se que pode ter ocorrido algum erro durante o rompimento do corpo de prova da mistura S43RAP53CAL4, uma vez o valor de sua resistência a compressão simples teve sofreu uma queda.

Tabela 33: Resultado do ensaio de resistência a compressão simples

Mistura	Umidade ótima	ρmáx	RCS (MPa) 7 dias	RCS (MPa) 14 dias	Ganho de resistência (%)
S96CAL4	7,50%	2,018	0,16	0,29	81%
S43RAP53CAL4	7,10%	2,050	0,440	0,180	-59%

Fonte: Autor (2018).

Gráfico 32: Resultado do Ensaio de Resistência a Compressão Simples



Fonte: Autor (2018).

Não foi encontrada nenhuma norma que especifique valores de resistência a compressão simples para misturas do tipo solo – cal. O valor determinado por DNIT 143/2010 é para misturas de solo – cimento e tem valor mínimo de 2,1MPa com sete dias de cura. Verifica-se que a mistura não atingiu esse valor com o tempo de cura estipulado.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Fez uma comparação dos resultados obtidos nessa pesquisa com os resultares de outros trabalhos. A seguir serão mostrados os resultados.

Tabela 34: Resultados obtidos por Silva (2013)

Autor	SILVA, 2013		
Mistura	densidade (g/cm³)	CBR (%)	RCS (MPa)
100% solo	1,47	11	0,915
80% solo + 20% RAP	1,59	24	1,157
60% solo + 40% RAP	1,69	28	1,302
40% solo + 60% RAP	1,85	37	1,394
40% solo + 60% RAP + 2% cimento	1,82	145	2,297
40% solo + 60% RAP + 4% cimento	1,83	163	2,44

Fonte: Autor (2018).

Tabela 35: Resultados obtidos por Barros (2013)

Autor	BARROS, 2013
Mistura	CBR (%)
100% solo	15,02
75% solo + 25% RAP	19,85
50% solo + 50% RAP	28

Fonte: Autor (2018).

Tabela 36: Resultados obtidos por Dias, Pinto, Costa, (2015)

Autor	DIAS, PINTO, COSTA, (2015)
Mistura	**CBR (%)**
100% solo	33
70% solo + 30% RAP	38
50% solo + 50% RAP	47
30% solo + 70% RAP	52
10% solo +90% RAP	62

Fonte: Autor (2018).

Com base na análise dos resultados obtidos pelos outros autores e pelos resultados dessa pesquisa, percebe-se que o material fresado tem capacidade de realizar melhorias no solo, sendo possível a estabilização.

Silva (2013) realizou adição de cimento em pequenas porcentagens a mistura de solo com material fresado, obtendo um grande aumento na resistência a penetração do solo. Barros (2013) obteve melhorias no solo utilizado, porém não foram suficientes para que o material fosse utilizado em bases de pavimentos, contudo, podendo ser utilizados em sub-bases. Nesse caso, poderia ser tentada a solução feita por Silva (2013), adicionar cimento em pequenas proporções.

Dias, Pinto, Costa (2015) realizaram procedimento semelhante e obtiveram resultado satisfatório para utilização em bases de pavimentos com tráfegos leves e médios.

Portando, é notória a capacidade do RAP de realizar melhorias na resistência do solo quando se trata de pavimentação, sendo necessários maiores pesquisas para aprimorar tal técnica.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa permitiu avaliar a viabilidade da utilização do resíduo asfáltico fresado na estabilização granulométrica de um solo arenoso de ocorrência na cidade de São Luís. O solo analisado possui características adequadas para utilização em camadas de reforço e sub-base de pavimentos asfálticos. Buscou-se melhorar o solo para que o mesmo pudesse ser utilizado na camada de base.

Nos resultados para estabilização granulométrica do solo com material fresado é observada a melhoria das características do solo na mistura S45RAP55, porém, não em proporção suficiente para sua utilização em camada de base, pois o valor do CBR da mistura ficou em torno de 43%, enquanto a norma DNIT 141/2010 exige, para camadas de base, um CBR ≥ 80% para tráfego pesado e CBR ≥ 60 % para tráfegos leve e médio.

Quando é analisado o resultado da mistura S43RAP53CAL4, verifica-se que o resultado do teste de resistência a compressão simples foi de 0,44MPa, não atendendo a especificação da norma DNIT 143/2010, que especifica materiais com resistência de 2,1MPa aos 7dias de cura. Contudo, tal norma é destinada para solo-cimento, que não é o caso da mistura estudada, sendo seu valor utilizado apenas como método comparativo.

Quando é analisado o resultado do CBR para a mistura S43RAP53CAL4, é verificado que o seu resultado foi de 66%, atendendo a especificação para camada de base em tráfegos leves. Vale ressaltar que a cal necessita maior tempo de cura para que ocorram as reações responsáveis pelo aumento da resistência (BERNUCCI et al., 2010) e o ensaio do CBR foi medido com apenas 4 dias. Em sua pesquisa, Almeida (2016), realizou o rompimento dos corpos de prova para CBR com um total de 14 dias de cura, e, por isso, sugere-se a realizar de um novo ensaio de CBR da mistura com um tempo de cura maior em busca de melhores resultados.

O material fresado utilizado não se mostrou um bom agregado para estabilização granulométrica, porém foi possível aprimorar o valor do CBR do solo. Para trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar o ensaio de módulo de resiliência com as misturas e analisar o resultado;
- Realizar os testes em diferentes tipos de solo;

- Realizar estabilização de solos com utilização de material fresado com algum tipo de ligante, como emulsão asfáltica;
- Utilizar cimento como material aglutinante no lugar da cal;

REFERÊNCIAS

ADADA, L.B., **Programa de integração e capacitação:** tópicos de projetos de pavimentos asfálticos e de Cimento Portland, DER, 2008.

ALMEIDA, M.G., **Estabilização de solos com cinza volante para utilização em pavimentos.** Programa de bolsas de iniciação cientifica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASSHTO C1252:** Standard Test Methods for Uncompacted Void Contento of Fine Aggrgate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Granding). Pensilvânia. Estados Unidos da América, 2003.

APLICAÇÃO de camada granular de base com vibroacabadora. **Asfalto de Qualidade,** 2018**.** Disponível em: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com/>. Acesso em: 08 de novembro de 2018.

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 6502:1995:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7175:2003:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **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**. 1°ed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2010.

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

BOURDEAU, J.; **Collaborative Ontological Engineering of Instructional Design Knowledge for na ITS Authoring Environment**. Proceedings of the 6th Intl. Conference on Intelligente Tutoring Systems (ITS 200), Springer Verlag, 2000.

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

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n°. 307, de 05 de julho de 2002. Brasília. **Diário Oficial da União**, de 30 de agosto de 2002, seção I, p.95-96.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Pesquisa anual da indústria da construção 2016.** Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2016_v26_informativo.pdf> Acesso em: 08 de novembro de 2018.

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, 2017.

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

CONSTRUÇÃO civil representa 6,2% do PIB Brasil. **FIBRA, 2017.** Disponível em**: <**https://www.sistemafibra.org.br/fibra/sala-de-imprensa/noticias/1315-construcao-civil-representa-6-2-do-pib-brasil>. Acesso em: 08 de novembro de 2018.

CRISTELO, N.M.C., **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2001.

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 129/94:** Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 162/94:** Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 180/94:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. 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.

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

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2° ed. Rio de Janeiro, 2006, 314p.

_____. **Manual de Pavimentação.** 3° ed. Rio de Janeiro, 2006, 274p.

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

_____. **DNIT 139/2010 - ES:** Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 141/2010 - ES:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 143/2010 - ES:** Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação se serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DIAS, P.S.; PINTO, I.E.; COSTA, C., **Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argiloso siltoso para o uso em camadas de pavimentos.** 44° RAPv – Reunião anual de pavimentação e 18° ENACOR – Encontro nacional de conservação rodoviária, Foz do Iguaçu, PR, 2015.

HILÁRIO, R. Q., **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias - estudo de caso: BR-120.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2016.

MACEDO, M. M., **Solos Modificados com Cimento – Efeito no Módulo de Resiliência e no Dimensionamento de Pavimentos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2004.

MARQUES, G.L.O., **Notas da aula da disciplina pavimentação.** Minas Gerais, 2006.

MEDINA, J. **Apostila de Estabilização de Solos** – COPPE/UFRJ. 1987.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. Editora Interciênica. Rio de Janeiro. Brasil. 2015.

MOLZ, C., **Viabilidade da utilização do material estabilizado granulometricamente em base de pavimentos.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis.** ED. COPIARTE. Rio de Janeiro, 2002.

PROGRAMA de Qualidade ABRECON. **ABRECON.** Disponível em: <https://abrecon.org.br/programa-qualidade/>. Acesso em: 08 de novembro de 2018.

RIBEIRO, Thiago Pinheiro. **Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 04. Ano 02, Vol. 01. pp 733-754, Julho de 2017.

SACHET, T. **Reciclagem in situ de bases granulares de pavimentos asfálticos**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande, n 11, p. 31-42, abril 2008.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., **Estabilização de solos com cal e betume.** 6° reunião de pavimentação urbana, pp. 74-97, Santos, São Paulo, Abril, 1995.

SARTORI, G., **Estudo de Estabilização de Solos Para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, PR, 2015.

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

_____, **Manual de Técnicas de Pavimentação**. V.2, Editora Pini, São Paulo, 2001.

SILVA, A.K.G., **Estudo de estabilização de solo com brita para uso na pavimentação.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, 2018.

SILVA, José Otávio. **Projeto Estal: projeto de assistência técnica ao setor de energia**. Ministério de Minas e Energia, 2009

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 cientifica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, MA, 2018.

SOLIZ, V.V.P., **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

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. Bases alternativas com solos laterítico.** Arte & Ciência Editora. São Paulo, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE ÍNDICIE DE FORMA

Tabela 37: medidas do ensaio de índice de forma

n°	a	b	c	b/a	c/b
1	44,78	36,72	11,55	0,80	0,30
2	57,16	43,24	12,29	0,80	0,30
3	62,40	38,46	20,00	0,60	0,50
4	65,39	36,00	25,06	0,60	0,70
5	47,42	37,80	15,98	0,80	0,40
6	47,90	41,35	12,07	0,90	0,30
7	90,95	33,59	18,58	0,40	0,60
8	41,71	40,95	12,24	1,00	0,30
9	41,96	40,60	17,19	1,00	0,40
10	47,69	39,90	14,37	0,80	0,40
11	55,60	39,70	21,34	0,70	0,50
12	50,75	43,57	17,93	0,90	0,40
13	43,45	34,19	13,41	0,80	0,40
14	65,54	27,50	13,92	0,40	0,50
15	45,60	38,53	18,62	0,80	0,50
16	45,71	33,43	6,97	0,70	0,20
17	44,38	41,12	10,89	0,90	0,30
18	52,25	32,58	24,10	0,60	0,70
19	44,35	30,47	14,84	0,70	0,50
20	33,10	32,02	10,65	1,00	0,30
21	42,88	31,70	14,28	0,70	0,50
22	67,41	39,83	13,40	0,60	0,30
23	66,94	29,49	11,01	0,40	0,40
24	43,74	25,61	10,83	0,60	0,40
25	42,50	37,38	16,08	0,90	0,40
26	46,70	24,64	14,48	0,50	0,60
27	45,75	31,60	13,93	0,70	0,40
28	42,43	36,15	11,98	0,90	0,30
29	32,44	22,22	12,34	0,70	0,60
30	54,49	40,83	17,37	0,70	0,40
31	49,92	28,85	12,06	0,60	0,40
32	38,32	33,49	3,33	0,90	0,10
33	46,28	27,35	12,85	0,60	0,50
34	28,12	16,15	8,38	0,60	0,50
35	38,24	21,90	8,32	0,60	0,40
36	31,22	27,51	7,26	0,90	0,30
37	34,01	29,73	10,30	0,90	0,30
38	31,77	22,77	10,80	0,70	0,50
39	47,44	38,64	14,13	0,80	0,40
40	28,66	19,66	12,20	0,70	0,60
41	27,97	21,47	8,65	0,80	0,40

n°	a	b	c	b/a	c/b
42	27,92	16,50	7,65	0,60	0,50
43	71,13	20,19	15,64	0,30	0,80
44	38,63	29,62	13,33	0,80	0,50
45	23,81	23,07	7,71	1,00	0,30
46	32,51	19,11	7,76	0,60	0,40
47	33,54	26,42	9,97	0,80	0,40
48	34,02	22,07	12,49	0,60	0,60
49	23,78	21,03	12,77	0,90	0,60
50	28,46	21,11	12,44	0,70	0,60
51	28,96	21,57	8,26	0,70	0,40
52	41,75	26,11	8,89	0,60	0,30
53	33,38	13,89	9,32	0,40	0,70
54	29,44	26,68	7,54	0,90	0,30
55	29,76	28,42	10,35	1,00	0,40
56	26,84	19,59	12,07	0,70	0,60
57	25,97	20,12	6,26	0,80	0,30
58	26,88	14,13	10,48	0,50	0,70
59	22,26	18,37	7,92	0,80	0,40
60	25,26	15,51	8,95	0,60	0,60
61	22,73	20,87	7,96	0,90	0,40
62	40,94	21,41	12,32	0,50	0,60
63	24,94	18,10	10,26	0,70	0,60
64	25,41	14,77	8,22	0,60	0,60
65	29,93	24,01	8,31	0,80	0,30
66	26,44	19,16	9,05	0,70	0,50
67	29,58	15,54	9,74	0,50	0,60
68	24,73	16,15	9,09	0,70	0,60
69	19,82	15,55	6,88	0,80	0,40
70	20,04	14,83	13,04	0,70	0,90
71	26,70	26,53	11,64	1,00	0,40
72	30,87	22,30	10,72	0,70	0,50
73	28,55	22,07	9,17	0,80	0,40
74	26,70	20,23	8,36	0,80	0,40
75	23,90	12,92	8,40	0,50	0,70
76	19,98	19,64	6,20	1,00	0,30
77	24,19	22,84	7,52	0,90	0,30
78	20,40	18,22	7,65	0,90	0,40
79	27,56	20,19	13,41	0,70	0,70
80	23,01	14,94	6,80	0,60	0,50
81	28,80	16,25	9,55	0,60	0,60
82	20,23	15,82	11,09	0,80	0,70
83	18,24	16,25	3,67	0,90	0,20
84	22,52	17,02	10,20	0,80	0,60
85	18,52	16,12	10,21	0,90	0,60
86	17,95	12,22	7,70	0,70	0,60
87	21,01	13,71	4,82	0,70	0,40

n°	a	b	c	b/a	c/b
88	24,70	12,11	2,51	0,50	0,20
89	25,11	21,22	8,41	0,80	0,40
90	22,67	16,02	13,21	0,70	0,80
91	16,87	12,61	11,38	0,70	0,90
92	23,72	16,47	7,95	0,70	0,50
93	24,25	22,07	6,08	0,90	0,30
94	28,27	18,71	6,87	0,70	0,40
95	23,50	18,12	9,66	0,80	0,50
96	18,26	12,51	10,20	0,70	0,80
97	21,98	12,29	8,31	0,60	0,70
98	29,34	15,26	5,97	0,50	0,40
99	20,55	12,02	7,96	0,60	0,70
100	20,57	16,44	5,02	0,80	0,30
101	23,30	19,37	8,68	0,80	0,40
102	21,16	12,33	7,99	0,60	0,60
103	23,29	15,43	6,14	0,70	0,40
104	16,91	13,67	8,44	0,80	0,60
105	18,49	14,09	8,67	0,80	0,60
106	25,70	13,60	5,25	0,50	0,40
107	22,91	14,57	6,10	0,60	0,40
108	20,14	13,25	9,49	0,70	0,70
109	19,56	9,62	6,20	0,50	0,60
110	15,47	14,23	7,63	0,90	0,50
111	21,23	13,79	13,76	0,60	1,00
112	20,62	14,94	9,46	0,70	0,60
113	19,52	15,13	6,78	0,80	0,40
114	27,62	12,32	7,47	0,40	0,60
115	24,80	14,97	9,70	0,60	0,60
116	19,34	14,10	5,05	0,70	0,40
117	19,47	12,38	4,33	0,60	0,30
118	24,59	12,18	5,50	0,50	0,50
119	13,63	12,37	6,25	0,90	0,50
120	13,46	11,94	8,55	0,90	0,70
121	18,63	13,47	11,20	0,70	0,80
122	16,99	14,02	7,26	0,80	0,50
123	16,59	15,97	10,24	1,00	0,60
124	12,34	11,38	8,44	0,90	0,70
125	14,65	11,44	6,88	0,80	0,60
126	15,80	13,27	8,77	0,80	0,70
127	15,57	14,40	8,60	0,90	0,60
128	15,01	11,34	9,13	0,80	0,80
129	13,55	13,13	9,37	1,00	0,70
130	15,00	12,61	9,91	0,80	0,80
131	16,64	14,21	5,96	0,90	0,40
132	17,45	14,41	6,56	0,80	0,50
133	16,32	14,39	7,14	0,90	0,50

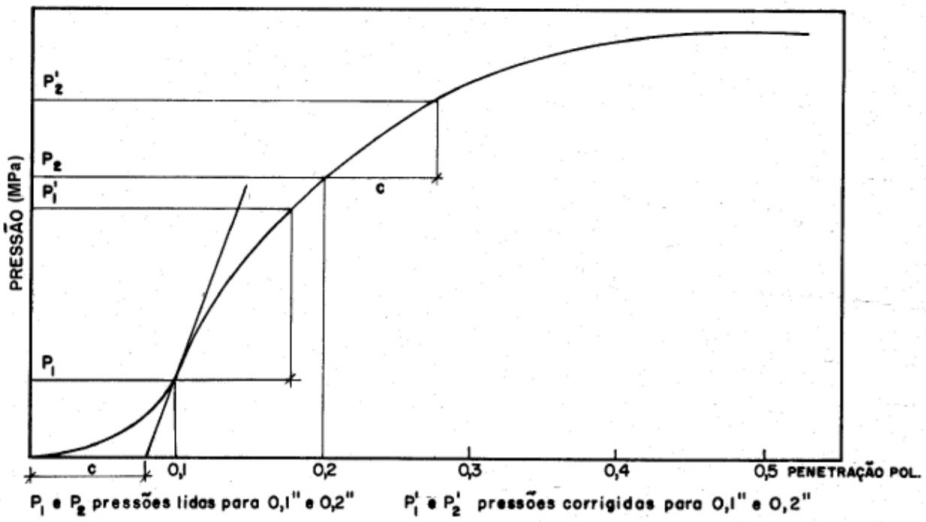
n°	a	b	c	b/a	c/b
134	15,35	11,93	7,16	0,80	0,60
135	17,62	14,81	7,94	0,80	0,50
136	13,93	11,66	8,17	0,80	0,70
137	15,83	13,49	6,45	0,90	0,50
138	15,91	15,06	8,08	0,90	0,50
139	15,64	11,46	6,47	0,70	0,60
140	13,19	12,68	5,51	1,00	0,40
141	13,77	10,76	6,86	0,80	0,60
142	12,97	12,40	4,82	1,00	0,40
143	15,24	13,07	8,25	0,90	0,60
144	15,41	13,71	7,53	0,90	0,50
145	14,21	9,06	6,95	0,60	0,80
146	15,79	13,88	6,77	0,90	0,50
147	14,36	13,28	9,08	0,90	0,70
148	15,92	11,81	7,95	0,70	0,70
149	12,46	10,11	9,13	0,80	0,90
150	13,94	12,59	6,81	0,90	0,50
151	17,41	14,50	9,46	0,80	0,70
152	14,84	13,29	8,01	0,90	0,60
153	21,93	15,02	7,85	0,70	0,50
154	14,70	14,13	7,33	1,00	0,50
155	18,07	16,28	10,38	0,90	0,60
156	18,48	13,19	8,16	0,70	0,60
157	16,59	16,31	6,22	1,00	0,40
158	16,59	14,10	6,49	0,80	0,50
159	17,06	11,55	6,94	0,70	0,60
160	15,30	11,02	6,16	0,70	0,60
161	18,91	14,37	7,23	0,80	0,50
162	17,19	16,36	7,56	1,00	0,50
163	15,47	15,25	5,44	1,00	0,40
164	15,08	12,50	5,55	0,80	0,40
165	20,16	16,93	6,13	0,80	0,40
166	13,76	13,59	6,32	1,00	0,50
167	16,13	15,26	6,59	0,90	0,40
168	17,35	11,32	5,91	0,70	0,50
169	14,93	14,57	7,22	1,00	0,50
170	21,05	15,51	6,55	0,70	0,40
171	28,56	22,32	7,04	0,80	0,30
172	28,32	12,87	7,80	0,50	0,60
173	19,78	9,91	8,19	0,50	0,80
174	24,23	14,23	6,62	0,60	0,50
175	17,42	12,36	8,17	0,70	0,70
176	20,28	12,07	8,30	0,60	0,70
177	15,97	11,98	7,42	0,80	0,60
178	16,91	13,43	4,82	0,80	0,40
179	18,80	12,17	6,78	0,60	0,60

n°	a	b	c	b/a	c/b
180	22,12	13,31	5,79	0,60	0,40
181	20,35	14,02	5,52	0,70	0,40
182	16,84	12,77	5,85	0,80	0,50
183	16,44	12,07	6,91	0,70	0,60
184	17,99	17,90	4,88	1,00	0,30
185	25,61	20,66	8,38	0,80	0,40
186	24,36	14,26	6,65	0,60	0,50
187	16,01	11,85	4,07	0,70	0,30
188	17,80	12,40	4,12	0,70	0,30
189	20,57	15,90	5,79	0,80	0,40
190	13,95	12,28	3,94	0,90	0,30
191	15,18	11,50	5,06	0,80	0,40
192	15,56	11,82	5,44	0,80	0,50
193	15,83	10,43	4,36	0,70	0,40
194	20,68	12,21	4,32	0,60	0,40
195	15,08	13,59	6,41	0,90	0,50
196	15,19	10,15	6,92	0,70	0,70
197	19,56	13,30	9,48	0,70	0,70
198	19,45	10,15	3,88	0,50	0,40
199	26,38	16,26	8,81	0,60	0,50
200	12,25	11,30	5,25	0,90	0,50

Fonte: Autor (2018).

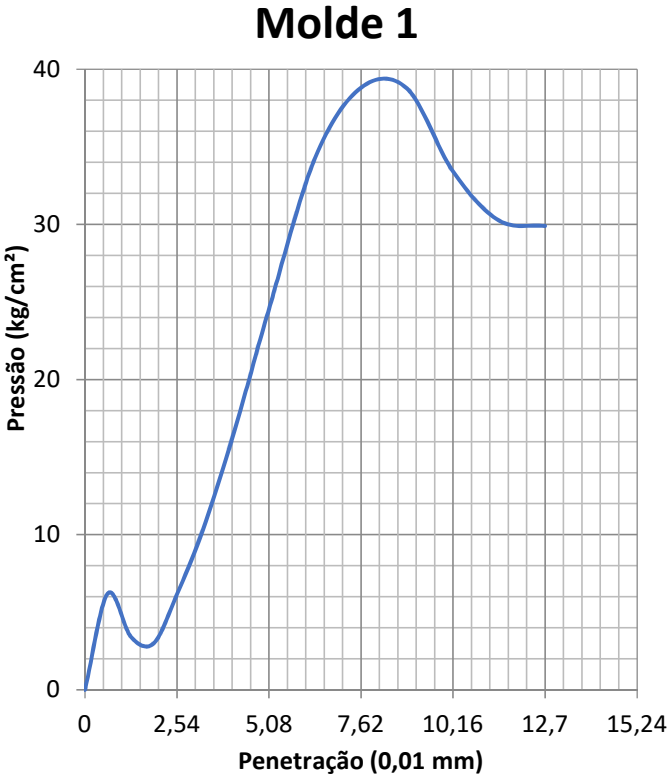
APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA COM A MISTURA S96CAL4

Gráfico 33: Modelo de Curva Pressão x Penetração



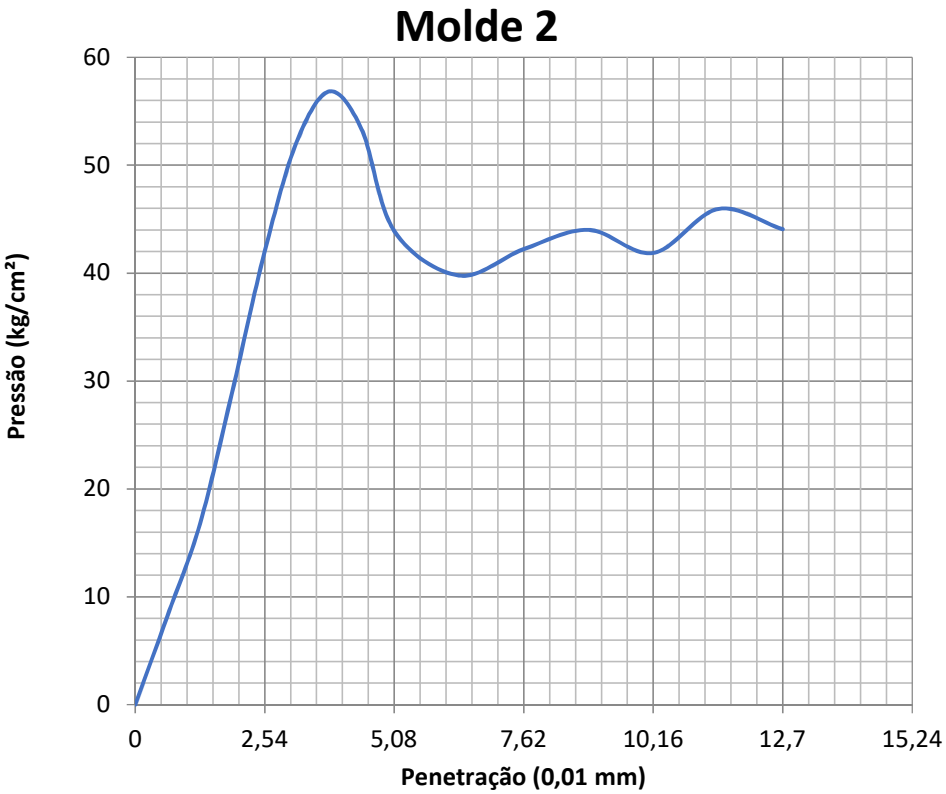
Fonte: DNER 049/94.

Gráfico 34: Curva Pressão x Penetração para o molde 1



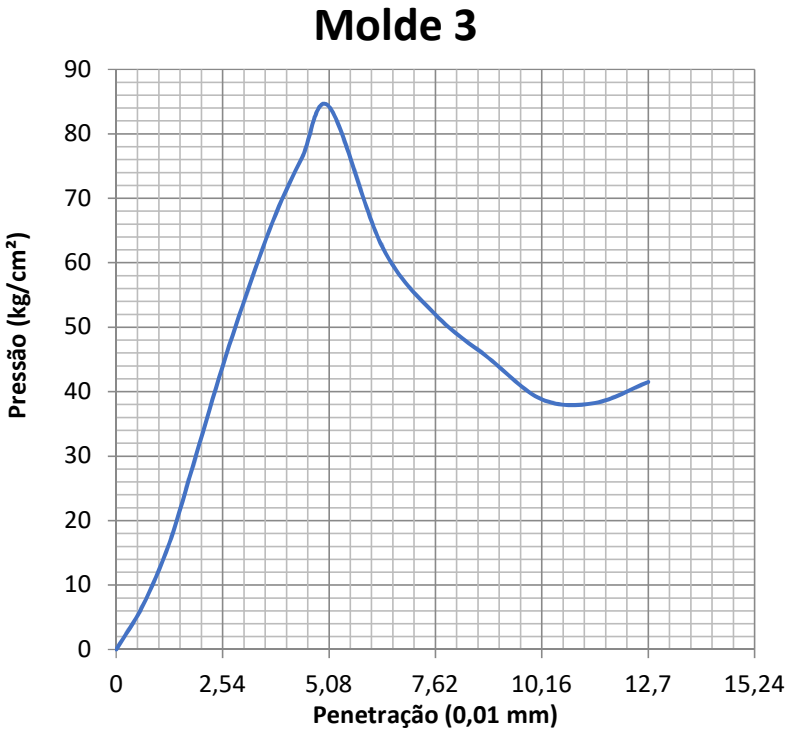
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 35: Curva Pressão x Penetração para o molde 2



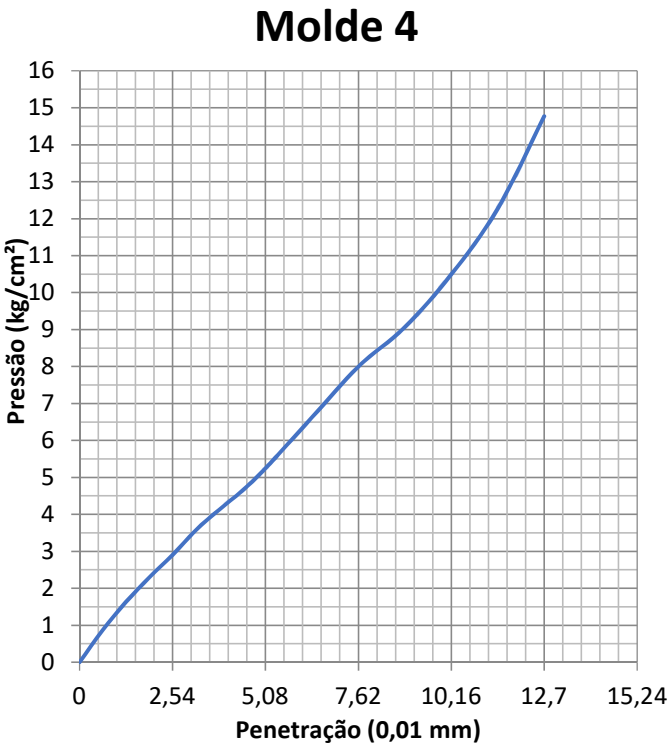
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 36: Curva Pressão x Penetração para o molde 3



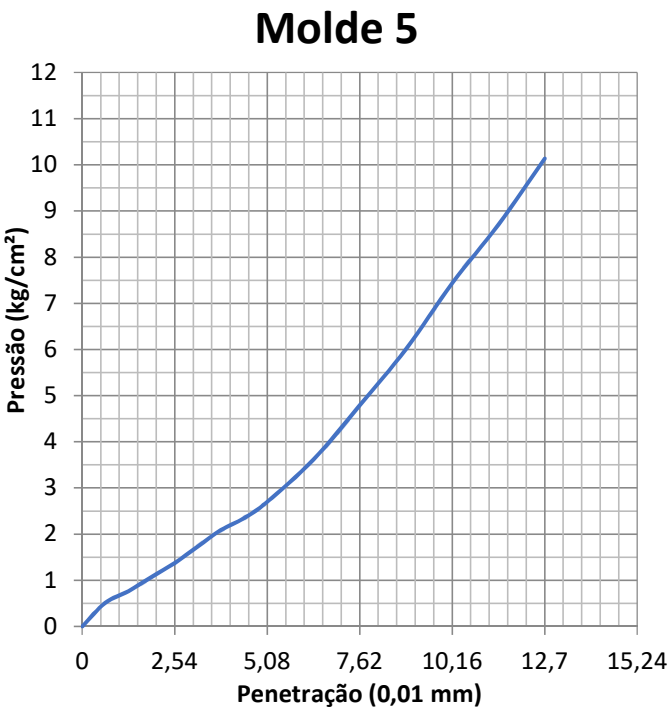
Fonte: Autor (2018).

Gráfico 37: Curva Pressão x Penetração para o molde 4



Fonte: Autor (2018).

Gráfico 38: Curva Pressão x Penetração para o molde 5



Fonte: Autor (2018).