

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATEUS AGUIAR VIDAL

**ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA UTILIZANDO BICA CORRIDA**

São Luís – MA

2019

MATEUS AGUIAR VIDAL

**ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA UTILIZANDO BICA CORRIDA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Teresinha DE Medeiros Coelho

São Luís – MA

2019

Vidal, Mateus Aguiar.

Estabilização granulométrica de solos para pavimentação asfáltica com utilização de bica corrida / Mateus Aguiar Vidal. – São Luís, 2019.

100f

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

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

1.Solos. 2.Solo agregado. 3.Estabilização. I.Título

CDU: 625.85

MATEUS AGUIAR VIDAL

**ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA COM A UTILIZAÇÃO DE BICA CORRIDA**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Estadual do
Maranhão para o grau de bacharel em
Engenharia Civil.

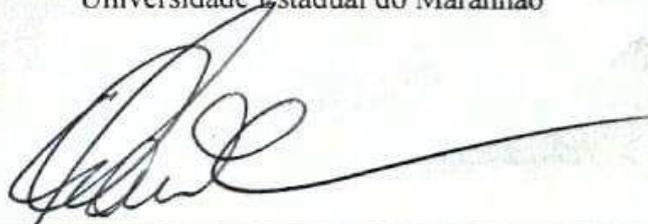
Aprovada em: 08 / 07 / 2019

BANCA EXAMINADORA

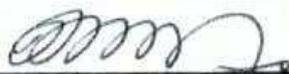


Prof. Dr. Maria Terezinha de Medeiros Coelho (Orientadora)

Doutora em Urbanismo
Universidade Estadual do Maranhão



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



Prof. Ms. Marivaldo Costa Duarte
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Dedico à minha família por ter proporcionado a oportunidade de concluir mais uma etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado o dom da vida e por me guiar até chegar em um dos momentos mais gratificantes da minha vida, que é a conclusão do curso de Engenharia Civil

Agradeço aos meus pais, Raimundo e Marcia, pelo apoio e carinho nos momentos difíceis e por todo sacrifício de manter meus estudos em uma boa escola, o que proporcionou meu ingresso na UEMA.

Agradeço ainda a minha família, pelos momentos de descontração, deixando essa caminhada mais tranquila.

Agradeço aos meus falecidos avós, Artur e Nazilde, que sempre me incentivaram todos os dias a estudar e a ser uma pessoa de caráter. Devo muito a eles pela pessoa que me tornei hoje e nada e ninguém poderá mudar isso. Que Deus possa sempre mantê-los ao Seu lado, ajudando a me guiar pelo bom caminho.

Agradeço aos grandes amigos que fiz durante essa jornada, em especial Alexandre Martins, Antônio Pereira, Ana Luiza, Carla Eugênia, Caio Augusto, Eduardo Maranhão, Gessiane Siriano, Giovanny Matos, Jasmina Barbosa, José Átila, Lucas Couto, Leonardo Silva, Neylon Gabriel, Renan Sousa, Rossini Aranha e Wanderson Moraes, com os quais compartilhei momentos marcantes e quero levá-los para o restante da vida.

Agradeço aos amigos laboratoristas pela ajuda e compreensão na realização dos trabalhos.

Agradeço a minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha, pela confiança e atenção na realização desse trabalho, com dicas e sugestões no desenvolvimento dele.

E a todos que, porventura contribuíram de alguma forma para meu crescimento, fazendo com que essa etapa se tornasse proveitosa.

RESUMO

A qualidade das camadas dos pavimentos está diretamente relacionada com os materiais que são empregados nessas estruturas, de modo que satisfaçam as solicitações impostas pelo tráfego de veículos e suportem a ação dos agentes como a chuva e as variações térmicas, garantindo ao pavimento um período mínimo para que haja simples manutenções. A partir disso, é necessário estudar diferentes materiais para conhecer seu comportamento diante dessas situações, adequando-os de acordo com as características apresentadas, a fim de reconhecer o seu devido valor para as camadas de pavimentos. Porém, existem situações em que não é viável a utilização de apenas um material, tanto pelo fator técnico quanto pelo fato econômico, fazendo-se necessário o emprego de metodologias capazes de unir propriedades, complementando as especificações para sua utilização, como é o caso da estabilização granulométrica de solos. Nesse sentido, foi realizado o estudo de estabilização de um solo arenoso fino laterítico (SAFL), disponível na região de São Luís do Maranhão, o qual é classificado como areia laterítica (LA), pela metodologia MCT. O solo em questão apresentou resultados satisfatórios quando estudado individualmente, tendo serventia para camadas de reforço de subleito e sub-base. Sendo assim, buscou-se avaliar ainda o seu comportamento com a adição de diferentes frações de bica corrida, um material pétreo utilizado na pavimentação asfáltica que não passa por um processo de seleção específico na britagem. Assim, utilizou-se especificamente 30%, 50%, 80% e 90% e 100% do agregado, definindo os parâmetros de utilização em camadas de pavimentos. Como resultados, tem-se que as misturas com 30% e 50% de agregado satisfazem as condições de uso em camadas de sub-base, enquanto as misturas com 80% e 90% de bica corrida se enquadram perfeitamente no uso em camadas de base, obedecendo os critérios estabelecidos pelas normas do DNIT para as misturas solo-agregado.

Palavras-chave: Solos. Solo-agregado. Estabilização.

ABSTRACT

The quality of the paving layers is directly related to the materials that are used in these structures, so that they satisfy the requests imposed by vehicle traffic and support the action of external relief agents such as rain and Thermal variations, guaranteeing the pavement a minimum period for simple maintenance. From this, it is necessary to study different materials to know their behavior in the face of these situations, adapting them according to the characteristics presented, in order to recognize their due value for the floor layers. However, there are situations in which it is not feasible to use only one material, both by the technical factor and by the economic fact, making it necessary to employ capable methodologies of uniting properties, complementing the specifications for their Use, as is the case of soil granulometric stabilization. In this sense, the study of stabilization of a fine laterite sandy soil (SAFL), available in the region of São Luís of Maranhão, which is classified as latertic sand (LA), by the MCT methodology. The soil in question presented satisfactory results when studied individually, having shared for layers of reinforcement of subbed and subbase. Thus, it was attempted to evaluate its behavior with the addition of different fractions of running spout, a stony material used in asphalt paving that does not undergo a specific selection process in the crushing. Thus, used specifically 30%, 50%, 80% and 90 % and 100% of aggregate, defining the usage parameters in paving layers. As a result, the mixtures with 30% and 50% of aggregate satisfy the conditions of use in reinforcement and subbase layers, while mixtures with 80% and 90% of the race spout fit perfectly in the use in base layers, obeying the criteria Established by DNIT standards for soil-aggregate mixtures.

Keywords: Soil. Aggregate soil. Estabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de formação e decomposição dos solos residuais.....	18
Figura 2 - Designação genética geral das camadas de solo, nas regiões tropicais	19
Figura 3 - Esquema simplificado do processo de laterização de solos tropicais.....	20
Figura 4 - Corte rodoviário demonstrando a camada superficial laterítica e a camada inferior saprolítica	21
Figura 5 - Classificação dos agregados usados na pavimentação asfáltica	22
Figura 6 - Amostra de agregado bica corrida	23
Figura 7 - Britador primário	24
Figura 8 - Esquema de seção transversal de um pavimento com cargas impostas pelo tráfego	25
Figura 9 - Esquema de seção transversal de um pavimento flexível.....	27
Figura 10 - Esquema de seção transversal de um pavimento rígido	27
Figura 11 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas	32
Figura 12 - Tipos de solo - agregado.....	34
Figura 13 - Localização da coleta de amostra do solo.....	36
Figura 14 - Processo de coleta de solo para ensaios laboratoriais.....	36
Figura 15 - Localização da coleta de amostra da bica corrida.....	37
Figura 16 - Amostra de solo separada pela peneira n° 10 (2 mm)	38
Figura 17 - Estados e limites de consistência	40
Figura 18 - Conjunto para ensaio de limite de liquidez.....	40
Figura 19 - Gráfico para classificação MCT	43
Figura 20 - Exemplo de conjunto de curvas do ensaio Mini-MCV.....	44
Figura 21 - Exemplo de curvas de compactação Mini-MCV	45
Figura 22 - Conjunto para ensaio de compactação Mini-Mcv	46
Figura 23 - Detalhe do ensaio de perda de massa por imersão.....	46

Figura 24 - Cápsula contendo amostra para ensaio de equivalente de areia	48
Figura 25 - Colocação de amostra na proveta para ensaio de equivalente de areia	48
Figura 26 - Inserção de solução na proveta até à marca superior	49
Figura 27 - Inserção da haste metálica para medição das alturas de areia e argila	50
Figura 28 - Conjunto de molde e soquete para ensaio de compactação	51
Figura 29 - Umedecimento e homogeneização de amostra para ensaio de compactação	52
Figura 30 - Corpo de prova sendo ensaiado pela Máquina CBR-MARSHALL	54
Figura 31 - Quarteador de amostras	55
Figura 32 - Sequência de peneiras para ensaio de granulometria.....	56
Figura 33 - Representação gráfica das graduações.....	57
Figura 34 - Amostra para ensaio de Abrasão Los Angeles	57
Figura 35 - Máquina utilizada no ensaio de abrasão "Los Angeles"	58
Figura 36 - Amostra para ensaio de absorção seca em estufa (a) e submersa em água (b).....	59
Figura 37 - Secagem da amostra de absorção.....	60
Figura 38 - Aparato para a pesagem hidrostática	61
Figura 39 - Determinação da massa específica pelo frasco Chapman	62
Figura 40 - Amostra sendo inserida na proveta para ensaio de equivalente de areia	63
Figura 41 - Amostra final para ensaio de índice de forma	65
Figura 42 - Medição dos grãos do ensaio de índice de forma	65
Figura 43 - Homogeneização de amostra solo-agregado para ensaio de compactação.....	67
Figura 44 - Compactação de amostra solo-agregado.....	68
Figura 45 - Corpos de prova de solo-agregado imersos para ensaio de ISC	69
Figura 46 – Ábaco de classificação do solo laterítico pela metodologia MCT.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas para bases estabilizadas granulometricamente.....	33
Tabela 2 - Faixas para enquadramento granulométrico da bica corrida.....	34
Tabela 3 - Parâmetros de uniformidade do solo.....	39
Tabela 4 - Parâmetros de graduação do Solo.....	39
Tabela 5 - Classificação da forma de agregados pétreos.....	Error! Bookmark not defined.
Tabela 6 - Quantidade de solo e agregado para cada mistura	67
Tabela 7 - Resumo dos limites de consistência do solo	72
Tabela 8 - Resumo de coeficientes para classificação MCT.....	72
Tabela 9 - Média das relações e classificação de forma do agregado	77
Tabela 10 - Traços estudados pelo enquadramento granulométrico da norma DNIT 141/2010	80
Tabela 11 - Enquadramento granulométrico da mistura C.....	81
Tabela 12 - Enquadramento granulométrico da mistura D	82
Tabela 13 - Resumo de MEAS _{máx} e hot	86
Tabela 14 - Quantidade de água em ml para obtenção de umidade ótima	87
Tabela 15 - Resumo de Índice de Suporte Califórnia.....	88
Tabela 16 - Relação entre misturas de bica corrida e brita com mesma proporção de agregados	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo utilizado	70
Gráfico 2 - Determinação do limite de liquidez	71
Gráfico 3 - Curva de compactação do solo virgem	74
Gráfico 4 - Relação da pressão e penetração do ensaio de ISC do solo virgem.....	75
Gráfico 5 - Curva granulométrica da bica corrida.....	75
Gráfico 6 - Enquadramento granulométrico da bica corrida na faixa A	76
Gráfico 7 - Enquadramento granulométrico da bica corrida na faixa B.....	77
Gráfico 8 - Curva de compactação da bica corrida	79
Gráfico 9 - Relação da pressão e penetração do ensaio de ISC da bica corrida.....	80
Gráfico 10 - Enquadramento granulométrico da mistura C	82
Gráfico 11 - Enquadramento granulométrico da mistura D	83
Gráfico 12 - Curva granulométrica da mistura A (30% bica e 70% solo).....	83
Gráfico 13 - Curva granulométrica da mistura B (50% bica e 50% solo).....	84
Gráfico 14 - Curva de compactação da mistura A (solo + 30% bica)	84
Gráfico 15 - Curva granulométrica na mistura B (solo + 50% bica).....	85
Gráfico 16 - Curva de compactação da mistura C (solo + 80% bica)	85
Gráfico 17 - Curva de compactação da mistura D (solo + 90% bica)	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	O Solo.....	17
2.1.1	Origem e formação dos solos	17
2.1.2	Os solos tropicais.....	19
2.2	O agregado	21
2.2.1	A bica corrida	23
2.2.1.1	Processo de britagem.....	23
2.3	Estudo do pavimento.....	24
2.3.1	Características dos pavimentos asfálticos	25
2.3.1.1	Subleito.....	25
2.3.1.2	Regularização do subleito	26
2.3.1.3	Reforço do subleito	26
2.3.1.4	Sub-base	26
2.3.1.5	Base	26
2.3.1.6	Revestimento	26
2.3.2	Tipos de pavimentos.....	26
2.3.2.1	Pavimentos flexíveis.....	27
2.3.2.2	Pavimentos semirrígidos	27
2.3.2.3	Pavimentos rígidos	27
2.4	Estabilização de solos para pavimentação	28
2.4.1	Estabilização mecânica.....	28

2.4.1.1	Método algébrico.....	29
2.4.1.2	Processo do triângulo	29
2.4.1.3	Método das tentativas.....	29
2.4.2	Estabilização física.....	30
2.4.3	Estabilização química.....	30
2.5	Bases e Sub-bases estabilizadas granulometricamente.....	31
2.6	Misturas solo laterítico-agregado.....	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Materiais.....	36
3.1.1	3.1.1 Solo.....	36
3.1.2	Bica Corrida	37
3.2	Ensaio de caracterização do solo	37
3.2.1	Análise granulométrica.....	37
3.2.2	Limites de consistência	39
3.2.2.1	Limite de liquidez.....	40
3.2.2.2	Limite de plasticidade	41
3.2.2.3	Índice de plasticidade	41
3.2.3	Classificação MCT	42
3.2.3.1	Ensaio de compactação Mini-MCV	44
3.2.3.2	Ensaio de perda de massa por imersão	46
3.2.4	Equivalente de areia	47
3.2.5	Ensaio de compactação	50
3.2.6	Índice de suporte Califórnia	53
3.3	Ensaio de caracterização do agregado.....	55
3.3.1	Análise granulométrica.....	55
3.3.2	Abrasão a Los Angeles.....	57

3.3.3	Ensaio de densidade e absorção	59
3.3.4	Equivalente de areia	62
3.3.5	Ensaio de índice de forma	64
3.4	Ensaos das misturas para estabilização	66
3.4.1	Análise granulométrica.....	66
3.4.2	Ensaos de Compactação	67
3.4.3	Ensaos de Índice de Suporte Califórnia	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Resultados dos ensaios de caracterização do solo.....	70
4.1.1	Análise granulométrica.....	70
4.1.2	Limites de consistência	71
4.1.2.1	Limite de Liquidez	71
4.1.2.2	Limite de Plasticidade	71
4.1.2.3	Índice de plasticidade	72
4.1.3	Equivalente de areia	72
4.1.4	Classificação MCT	72
4.1.5	Ensaio de Compactação.....	73
4.1.6	Índice de Suporte Califórnia.....	74
4.2	Resultados dos ensaios de caracterização do agregado	75
4.2.1	Análise granulométrica.....	75
4.2.2	Ensaio de índice de forma	77
4.2.3	Equivalente de areia	78
4.2.4	Ensaio de Densidade e Absorção	78
4.2.5	Ensaio de Abrasão Los Angeles	78
4.2.6	Ensaio de compactação	79
4.2.7	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	79

4.3	Resultado dos ensaios das misturas para estabilização	80
4.3.1	Enquadramento granulométrico das misturas para camadas de base de pavimentos.	81
4.3.2	Análise granulométrica das misturas para camadas de sub-base e reforço de pavimentos.....	83
4.3.3	Ensaio de compactação.....	84
4.3.4	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	87
4.4	Análises e comentários dos resultados obtidos	88
5	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICES	96
	APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA	97
	APÊNDICE B – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	100

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação asfáltica é um tema relevante para a Engenharia Civil, principalmente para o Brasil, país com dimensões continentais, o qual deve dispor de estradas de boa qualidade afim de melhorar a sua malha rodoviária. Sendo assim, o estudo minucioso das estruturas de pavimentação é fundamental para garantir a qualidade prevista em projeto.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), no ano de 2018, o Brasil dispôs de 213.453 km de rodovias pavimentadas, o que representa 12,4% da extensão total das rodovias do país, enquanto, no mesmo período, foram diagnosticados cerca de 1.507.248 km de rodovias não pavimentadas, representando cerca de 87,6% das rodovias disponíveis. Dados como esse apenas confirmam a necessidade de crescimento no setor rodoviário já que grande parte do transporte de passageiros e de carga é realizado pelas rodovias do país, entretanto, uma melhor qualidade da malha rodoviária proporcionaria uma diminuição dos custos com o transporte, além de ser uma oportunidade para a aplicação de novos estudos sobre pavimentação, ampliando o leque de opções no momento de solucionar os problemas da área.

Nesse sentido, é importante avaliar o grau de relevância de cada material utilizado na pavimentação, em especial o solo, já que, para Borré (2013), o mesmo é um material encontrado em grande quantidade às margens das rodovias, porém em determinadas circunstâncias não permitem o uso em camadas de pavimentos por não atenderem os requisitos mínimos estabelecidos por norma. A partir disso, surge a oportunidade de se combinar o solo com os agregados pétreos, formulando-se a estabilização granulométrica de solos.

O Brasil por ser um país de clima tropical, propicia a origem de solos com características peculiares devido a esse tipo de clima. Um grande exemplo disso é o solo laterítico, o qual foi de fundamental importância para a evolução da pavimentação brasileira. Villibor et al (2009) destaca que os solos arenosos finos lateríticos (SAFL), quando empregados na camada de base apresentam ausência de ruptura da camada, pequenas deflexões e boa resistência. Tal afirmação acaba por elucidar a importância da utilização desse tipo de solo na pavimentação brasileira.

Sendo assim, observando a relevância do uso dos SAFL, decidiu-se utilizar a técnica de estabilização granulométrica, a fim de satisfazer as condições técnicas na construção de camadas de base e sub-base ou reforço de pavimentos. O solo utilizado no estudo foi coletado nas proximidades da Via Expressa, entrada do bairro Cohafuma, em São Luís do Maranhão. A bica corrida foi fornecida pela empresa Granorte – Grande Norte de Mineração Sá,

especializada em britagem, localizada na cidade de Bacabeira – MA. Sendo assim, a pesquisa contemplou os estudos relacionados a mistura dos dois materiais, variando a porcentagem de cada um, para que fosse avaliado de forma criteriosa seus comportamentos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar o estudo da estabilização granulométrica de solos para camadas de pavimentos com a utilização de bica corrida.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar as características físicas e mecânicas do solo;
- Estudar as características físicas e mecânicas do material bica corrida;
- Comparar os estudos com outros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Solo

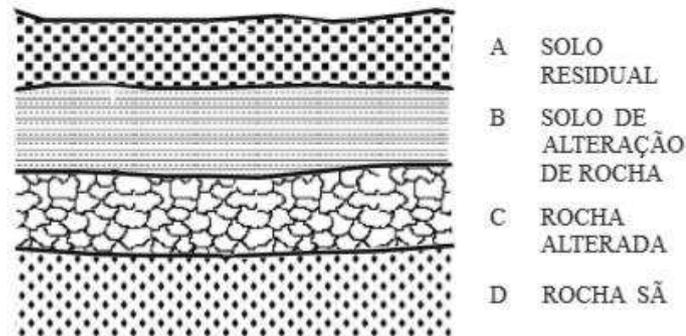
2.1.1 Origem e formação dos solos

O conhecimento da origem dos solos é de suma importância, uma vez que suas características e comportamentos geotécnicos variam com seu processo de formação, tanto pelo tipo de intemperismo sofrido quanto pelo local de origem. Segundo Das (2007), a origem e formação dos solos depende principalmente da erosão das rochas, sendo assim as propriedades físicas desses solos são determinadas primeiro pelos minerais constituintes das suas partículas e pela rocha a partir da qual o solo é derivado.

Para Das (2007) a erosão das rochas se dá por desintegração mecânica ou por decomposição química. A desintegração mecânica ocorre através dos agentes externos do relevo como a água, temperatura e vento, o que propicia a formação de partículas mais grossas como os pedregulhos e areias. A decomposição química é o processo em que há modificação química ou mineralógica da rocha de origem, em que o principal agente é a água, a qual proporciona a oxidação, hidratação e carbonatação das partículas e minerais. Tais processos ainda podem gerar partículas de tamanhos intermediários como os siltes, além de partículas com as menores dimensões, as argilas, representando o último estágio de decomposição dos solos.

De acordo com a forma em que o intemperismo das rochas de origem ocorre os solos admitem classificações distintas, visto que podem permanecer no local da rocha de origem ou podem ser levados para outros locais por ação do vento, da água ou da gravidade. Segundo Das (2007), os solos que permanecem no seu local de origem são chamados de solos residuais, esse tipo de solo possui uma importante propriedade, que é a graduação dos tamanhos de suas partículas, em que os grãos aumentam proporcionalmente com a profundidade. O processo de formação dos solos residuais pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Processo de formação e decomposição dos solos residuais



Fonte: DNIT (2006)

Como exemplo de solos residuais, tem-se o solo laterítico, o qual será de fundamental importância nesse estudo. Das (2007) ainda classifica os solos transportados de acordo com a forma de transporte e deposição dos grãos. No Quadro 1, a seguir, pode-se notar o tipo de solo transportado e a sua respectiva formação.

Quadro 1 – Formação e tipos de solos transportados

Tipo de solo	Formação
Solos glaciais	Formados por transporte e deposição de geleiras
Solos aluviais	Formados por água corrente
Solos lacustres	Formados por depósito em lagos
Solos marinhos	Formados por depósitos em mares
Solos eólicos	Formados e depositados pelo vento
Solos coluviais	Formados pela ação da gravidade

Fonte: Das (2007)

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as partículas dos solos podem ser classificadas de acordo com sua escala granulométrica:

I. Pedregulho: é a fração de solo que passa na peneira de 3" e é retida na peneira de 2 mm (n° 10);

II. Areia: é a fração do solo que passa na peneira de 2 mm (n° 10) e é retida na peneira de 0,075 mm (n° 200);

III. Areia grossa: é a fração de solo que passa na peneira de 2 mm (n° 10) e é retida na peneira de 0,42 mm (n° 40);

IV. Areia fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42 mm (n°40) e a peneira 0,075 mm (n° 200);

V. Silte: é a fração com tamanhos de grãos compreendida entre a peneira de 0,075 mm (n° 200) e a peneira de 0,005 mm;

VI. Argila: é a fração com tamanho de grão abaixo da peneira de 0,005 mm;

2.1.2 Os solos tropicais

Primeiramente, para entender de melhor forma os solos tropicais é necessário compreender a classificação geral desse tipo de solo, já que assim, são determinadas as características peculiares aos mesmos.

Segundo Villibor et al (2009):

“O solo tropical são os que apresentam peculiaridades, de propriedades e de comportamento geotécnico, resultante do processo geológico e/ou pedológico em sua formação, típico das regiões tropicais úmidas, que os diferenciam dos solos formados em outras regiões”.

Dentro da classificação de solos tropicais, existem os solos lateríticos, solos saprolíticos e os solos transportados, sendo que os dois últimos não apresentam uma grande serventia para as obras de pavimentação (Villibor et al., 2009).

Na Figura 2 apresentada a seguir, pode-se notar a clara divisão entre os tipos de solos tropicais.

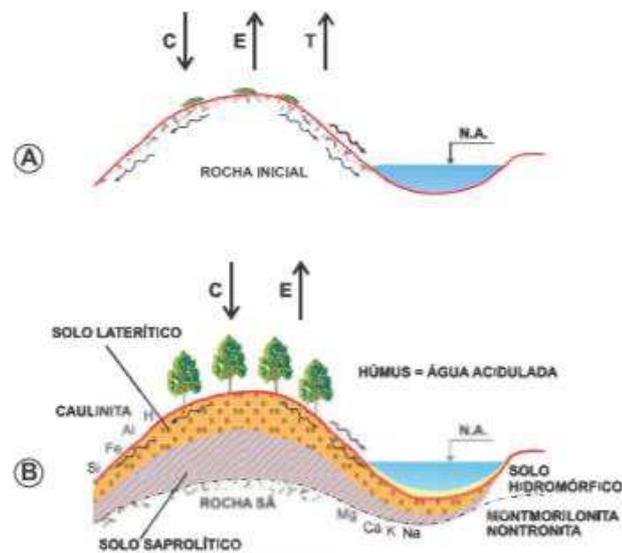
Figura 2 - Designação genética geral das camadas de solo, nas regiões tropicais



Fonte: Nogami e Villibor (1995)

É notável que os solos lateríticos constituem a camada superficial dos solos tropicais. Isso ocorre devido ao processo de laterização, exclusivo nas regiões de clima tropical úmido, com as elevadas temperaturas, altos índices pluviométricos e alta taxa de evaporação. Tais fenômenos, proporcionam o chamado intemperismo físico, processo que interfere diretamente na rocha em condições iniciais, gerando a chamada água acidulada, que penetra nessa rocha pela ação da gravidade nas pequenas fendas oriundas do intemperismo físico. A água acidulada proporciona uma quebra dos minerais constituintes da rocha, deixando os seus elementos químicos em formato de íons, geralmente o Si, Al, Fe, Mg, Ca, K e Na, dispostos sobre a massa caracterizando o intemperismo químico. Devido à alta taxa de chuvas, a água acaba por lixiviar a massa contendo os íons de Mg, Ca, K e Na, restando apenas os íons de Si, Fe e Al, caracterizando o processo de laterização. Os íons remanescentes reagem entre si, formando o argilomineral chamado caulinita, a qual tem propriedade cimentante devido aos óxidos de ferro e alumínio presentes na fração de solo. A fração grossa desse tipo de solo é formada pelos grãos de quartzo (VILLIBOR et al, 2009). Todo o processo de formação dos solos lateríticos pode ser observado na Figura 3, a seguir.

Figura 3 - Esquema simplificado do processo de laterização de solos tropicais



Fonte: Villibor et al (2009)

A camada de solo imediatamente inferior a camada de solo laterítico, é chamado de solo saprolítico, o qual ainda não sofreu o processo químico de laterização, apenas o intemperismo físico, o que garante o aspecto de desagregação e decomposição desse solo. A Figura 4 a seguir, demonstra a real diferença e separação desses dois tipos de solos tropicais.

Figura 4 - Corte rodoviário demonstrando a camada superficial laterítica e a camada inferior saprolítica



Fonte: Villibor et al (2009)

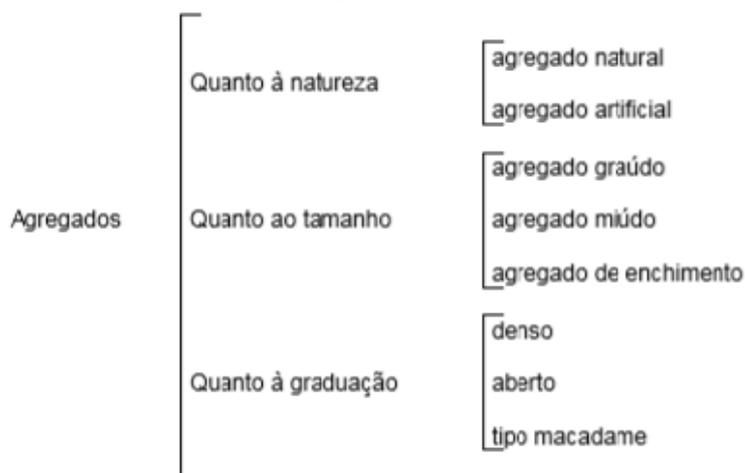
Devido a todo o seu processo de formação, os solos lateríticos acabam sendo ideais na construção de camadas de pavimentos asfálticos, uma vez que esses solos apresentam boa reação quando submetidos a compactação e baixa expansibilidade, ao contrário dos solos saprolíticos, os quais apresentam características opostas aos solos lateríticos (VILLIBOR et al, 2009).

2.2 O agregado

Para o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) os materiais pétreos utilizados na pavimentação asfáltica, denominados agregados, podem ter origem natural ou artificial, o quais podem ser encontrados em grande quantidade na natureza como os seixos rolados e pedregulhos, ao passo que os agregados artificiais necessitam do tratamento de britagem para adequar-se a determinadas granulometrias para sua utilização.

Os agregados pétreos utilizados na pavimentação asfáltica podem ser classificados de acordo com a Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Classificação dos agregados usados na pavimentação asfáltica



Fonte: DNIT (2006)

Tais classificações são definidas da seguinte maneira pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006):

- I. Os agregados naturais têm sua origem na alteração natural das rochas dado pelo intemperismo ou ainda pelos processos de britagem;
- II. Os agregados artificiais são aqueles que são gerados através dos produtos e subprodutos industriais quando sofrem algum tipo de interferência física ou química;
- III. Os agregados graúdos são os materiais pétreos retidos na peneira de nº 10, como as britas, cascalhos e seixos;
- IV. Os agregados miúdos são todos os materiais pétreos que passam na peneira de nº 10 e ficam retido na peneira de nº 200, como o pó de pedra e a areia.
- V. Os agregados de enchimento ou filer são os materiais que têm pelo menos 65% de porcentagem passante na peneira nº 200, como o cimento Portland;

Com relação a distribuição dos grãos o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define da seguinte forma:

- I. Os agregados de graduação densa apresentam curva granulométrica contínua e bem graduada, contemplando uma boa porcentagem de tamanho de grãos, apresentando material fino suficiente para preencher os espaços vazios entre os agregados de maiores dimensões;
- II. Os agregados de graduação aberta apresentam uma curva granulométrica bem graduada e contínua, porém com insuficiência de finos para preencher os vazios deixados pelas partículas de maiores dimensões;

III. Os agregados de tipo macadame são agregados que possuem partículas de tamanho único, sendo assim o agregado tem granulometria uniforme, a qual apresenta diâmetro máximo o dobro do diâmetro mínimo;

2.2.1 A bica corrida

Para Balbo (2007) a bica ou brita corrida (BC), mostrada na Figura 6, é um tipo de agregado pétreo utilizado na pavimentação asfáltica que não passou por processo de classificação, visto que, após a retirada do material do britador primário não é encaminhado para o peneiramento e separação das frações britadas, sendo estocado diretamente ou levado para a aplicação direta na obra de pavimentação.

Figura 6 - Amostra de agregado bica corrida



Fonte: O autor (2019)

Segundo a norma DER P00/41 – ET, do estado de São Paulo, a bica corrida é um material britado obtido da britagem primária da rocha sã. A obtenção da bica corrida pode ser melhor entendido pelo processo de britagem.

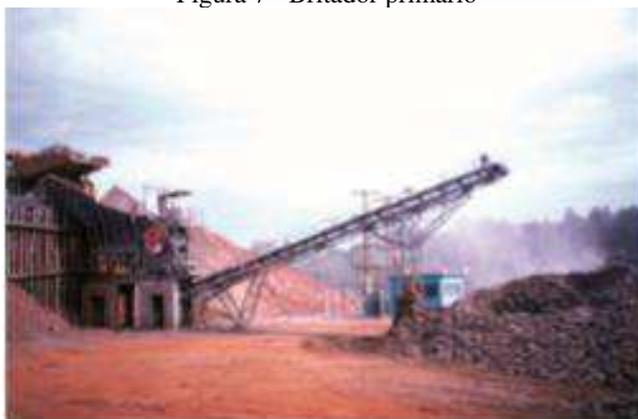
2.2.1.1 Processo de britagem

Para Bernucci et al (2006) o processo de britagem se inicia através do desmonte primário da rocha sã, com o uso de explosivos e, com uma série de britadores, o material é

reduzido até poder ser aproveitado na pavimentação, garantindo as características de tamanho e forma do agregado.

De uma maneira mais específica, Bernucci et al. (2006) detalha que a rocha após o seu processo de desmonte é transportada com o auxílio dos caminhões até os britadores primários (Figura 7), os quais reduzem o agregado de modo a serem trabalhados de uma melhor forma pelos britadores secundários. Após a britagem primária, os agregados passam por um processo de peneiramento, sendo selecionados partículas de vários tamanhos, o material que possui tamanho maior do que 25 mm sofre um novo processo de britagem, enquanto parte do material menor que 25 mm e maior 19 mm é estocado. Outra parte do material menor que 19 mm sofre um peneiramento adicional para ser estocado em pilhas três pilhas individuais: agregados entre 19 mm e 9,5 mm, agregados entre 9,5 mm e 4,8 mm e os agregados menores que 4,8 mm.

Figura 7 - Britador primário



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Como visto, a bica corrida tem característica principal de não apresentar uma granulometria bem definida, uma vez que não passa pelos processos de britagem adicionais e seleção através de peneiramento, como descrito anteriormente. A partir disso, o agregado desse tipo dispõe de partículas de tamanhos variados, garantindo uma curva granulométrica densa.

2.3 Estudo do pavimento

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir os esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BENUCCI, 2006).

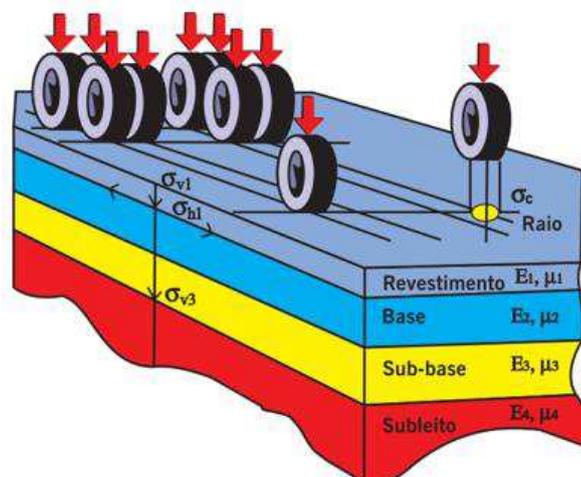
Segundo Balbo (2007), o pavimento é compreendido como uma estrutura que consiste em receber e transmitir as cargas recebidas, de maneira que as pressões exercidas por essas cargas sejam aliviadas até as camadas mais inferiores e cada camada apresenta deformação compatível com sua constituição, de forma que não ocorra processos de rupturas e danificações precoces.

2.3.1 Características dos pavimentos asfálticos

Os pavimentos asfálticos têm como característica fundamental a divisão bem definida das camadas de pavimentos, as quais são destinadas a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego, melhorar as condições de rolamento e conforto e resistir os esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento (DNIT, 2006)

A Figura 8, mostra uma representação básica das camadas de pavimentos, além do esquema de tensões impostas pelo tráfego de veículos sendo dissipadas pelas camadas.

Figura 8 - Esquema de seção transversal de um pavimento com cargas impostas pelo tráfego



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.3.1.1 Subleito

Para o DNIT (2006), o subleito corresponde ao terreno de fundação do pavimento. Essa estrutura possui a característica de absorver os esforços distribuídos, e como as pressões exercidas reduzem com o aumento da profundidade, considera-se como subleito somente as regiões mais superficiais da seção transversal (SENÇO, 2007).

2.3.1.2 Regularização do subleito

Para o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) esse não é uma camada propriamente dita, uma vez que ela é dada como uma conformação no sentido transversal e longitudinal do subleito de acordo com as especificações de projeto.

2.3.1.3 Reforço do subleito

É uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da regularização, com características geotécnicas inferiores ao do material da camada superior, porém, melhor que o material do subleito (DNIT,2006).

Segundo Balbo (2007), o emprego da camada de reforço de subleito não é considerado obrigatório, uma vez que, espessuras maiores nas camadas superiores poderiam aliviar as pressões sobre o subleito, portanto não seria uma solução técnico-economicamente viável, já que é preciso incorporar materiais de melhor qualidade nessas camadas.

2.3.1.4 Sub-base

É a camada complementar a base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for possível assentar a base diretamente sobre a regularização (DNIT,2006).

Para Balbo (2007), quando a camada de base é muito espessa pois sofre uma solicitação muito grande para desempenhar sua função e distribuir os esforços para as camadas inferiores, é preciso dividi-la em duas camadas, criando-se a sub-base, gerando menor custo.

2.3.1.5 Base

É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento (DNIT, 2006).

2.3.1.6 Revestimento

É a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento de veículos (DNIT, 2006). O revestimento deverá, entre outras funções, receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes, ou ainda, perda de compactação (BALBO, 2007).

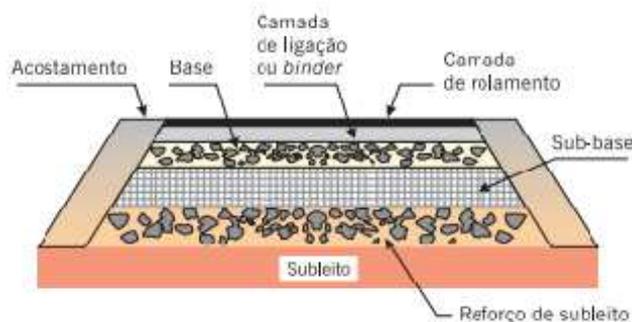
2.3.2 Tipos de pavimentos

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos podem ser classificados de três maneiras: pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos.

2.3.2.1 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis (Figura 9) são aqueles que apresentam um bom grau de deformação elástica quando submetidos a um carregamento, portanto, as cargas são distribuídas em parcelas equivalentes entre as camadas do pavimento (DNIT, 2006).

Figura 9 - Esquema de seção transversal de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2006)

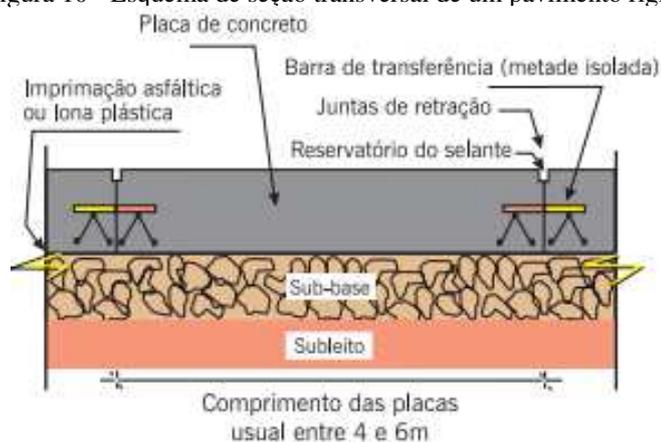
2.3.2.2 Pavimentos semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos têm a característica de possuírem uma base cimentada por materiais aglutinantes com propriedades cimentícias revestida por uma camada de material asfáltico (DNIT, 2006).

2.3.2.3 Pavimentos rígidos

Por fim, os pavimentos rígidos, como esquematizado na Figura 10, são aqueles em que o revestimento utilizado possui uma elevada rigidez em relação ao restante das camadas estruturais constituintes do pavimento, portanto, tal camada absorve uma grande parcela das tensões provenientes do tráfego (DNIT, 2006).

Figura 10 - Esquema de seção transversal de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci et al. (2006)

2.4 Estabilização de solos para pavimentação

De modo a classificar a estabilização de solos, Baptista (1979, p. 85) diz que:

“De um modo geral, a estabilização de um solo é utilizar um processo qualquer de natureza física, físico-químico, químico ou mecânico, de forma a tornar esse solo estável para limites de sua utilização e ainda fazer com que essa estabilidade permaneça sob ação de cargas”.

Garantido a estabilidade do solo, existem algumas propriedades que, do ponto de vista da engenharia, devem ser alcançadas com o processo de estabilização. Sendo assim, Medina e Motta (2004), destacam as seguintes propriedades:

- I. Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver;
- II. Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a;
- III. Compressibilidade, reduzindo-a.

Entre os principais processos de estabilização de solos para pavimentação, destacam-se: estabilização mecânica, estabilização física e estabilização química (CRISTELO, 2001; SOLIZ, 2007).

2.4.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica de um solo consiste num conjunto de operações mecânicas que conferem estabilidade a esse solo. Sendo assim, as operações mecânicas provocam uma modificação no arranjo das partículas, ou ainda da granulometria, por meio do equacionamento das frações (CRISTELO, 2001).

A estabilização mecânica pode ser entendida de duas formas: através da compactação ou pela correção da composição granulométrica. Com relação a compactação, a ação mecânica provoca no solo ou numa mistura solo-agregado a diminuição do índice de vazios, primeiramente pela perda da fração gasosa contida no solo, para uma posterior perda fração de água (CRISTELO, 2001; SOLIZ, 2007).

Segundo Cristelo (2001, p. 215):

“O comportamento de um solo está geralmente dependente do seu índice de vazios, nomeadamente no que diz respeito às características de resistência ao corte,

deformabilidade e permeabilidade. Assim, quanto menor o índice de vazios, maior a resistência e menor a deformabilidade e permeabilidade”.

Esse tipo de densificação é utilizada em todas as camadas de pavimento, sendo ou não executadas pelo processo de estabilização mecânica. Em campo esse processo é feito com o auxílio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora em alguns casos a compactação manual pode ser empregada (SOLIZ, 2007).

Segundo Silva (2018, apud VILLIBOR, 1982) na estabilização mecânica por correção granulométrica é necessário fazer uma mistura de solos em proporções adequadas para obter-se um produto com a estabilidade e resistência necessária para suportar as cargas impostas a ele. Para que isso ocorra, o tamanho e o formato dos grãos têm influência direta na transmissão dos esforços, já que à medida que os vazios deixados pelos grãos de maiores dimensões são preenchidos pelas partículas de menores dimensões, o solo ganha a estabilidade necessária. Vale ressaltar, que esse tipo de estabilização foi utilizado no presente estudo.

Para o método de estabilização mecânica por correção granulométrica, existem três formas de determinar o traço ideal para a densificação: modelo algébrico, processo do triângulo e o método de Rothfuchs

2.4.1.1 Método algébrico

Esse método consiste em um sistema de equações com porcentagens de agregados grosso e fino, de acordo com as especificações e porcentagens desejadas para a mistura, para se obter as proporções ideais de materiais que iram compor a mistura

2.4.1.2 Processo do triângulo

É um processo que consiste em colocar os pontos representativos dos solos a misturar em um triângulo equilátero e o ponto correspondente ao material que se deseja obter. A partir disso, unem-se os pontos dos materiais disponíveis e tem-se as proporções a serem tomadas.

2.4.1.3 Método das tentativas

É um método que consiste em estabelecer porcentagens base para que a mistura entre o solo e agregado atinjam a especificação necessária para o processo de estabilização. Vale ressaltar que esse método é o mais utilizado atualmente no estudo de misturas granulométricas, já que permite trabalhar diversas proporções de materiais (solos e agregados)

com o auxílio do Excel, facilitando e deixando mais dinâmico o entendimento do comportamento das misturas através de gráficos. Por esse motivo, o método das tentativas foi utilizado no presente trabalho.

2.4.2 Estabilização física

O método de estabilização física é aplicado quando não se consegue alcançar de forma mecânica os valores necessários de resistência e rigidez de um solo. A estabilização física consiste basicamente em dois métodos pouco difundidos, que são a estabilização térmica e a estabilização por eletro-osmose (CRISTELO, 2001).

A estabilização térmica ou tratamento por aquecimento se dá pelo fato de aquecer o solo até uma determinada temperatura, a qual deixa o mesmo em uma situação de dureza irreversível, mesmo quando está submetido a presença de água. É justificável o uso dessa técnica de estabilização em solos que apresentam em suas composições uma porcentagem superior a 30% de gesso. Além disso, sua utilização se torna inviável, já que é necessária uma grande quantidade de combustível para alcançar os resultados esperados (CRISTELO, 2001).

A estabilização por eletro-osmose consiste na aplicação de dois eletrodos em uma certa quantidade de solo, fazendo com que por essa quantidade de material passe uma corrente elétrica, deslocando a água até o eletrodo negativo, podendo ser descartada do solo, deixando-o consolidado (CRISTELO, 2001).

2.4.3 Estabilização química

Para Soliz (2007, apud SANTOS et al, 1995) a estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que venham a influenciar as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se então o objetivo de estabilizá-lo. Como estabilizantes químicos, pode-se citar: cimento Portland, cal, betumes, pozolanas, resinas etc.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006), traz algumas misturas de materiais, os quais foram citados acima, proporcionando a estabilização química para bases e sub-bases de pavimentos. Dentre essas misturas, pode-se destacar:

I. Solo-cimento: é uma mistura que, quando devidamente compactada com solo, cimento Portland e água, deve atender aos requisitos mínimos de densidade durabilidade e resistência. O teor ótimo de cimento usado nessa mistura é de 6% a 10%;

II. Solo melhorado com cimento: diferentemente da mistura solo-cimento, esse é um método de estabilização química que consistiu na adição de pequenas proporções de cimento, cerca de 2% a 4%, visando principalmente melhoras com relação a plasticidade e sensibilidade à água;

III. Solo-cal: é uma mistura de solo, cal e água, e esporadicamente cinzas volantes. O teor ótimo de cal utilizado é cerca de 5% a 6%, garantindo melhorias com relação a plastificação e sensibilidade à água;

IV. Solo Betume: é uma mistura de solo, água e material betuminoso, tratando-se então de uma mistura flexível.

2.5 Bases e Sub-bases estabilizadas granulometricamente

A norma DER/PR ES-P 07/05 (2005, p. 2) trata as camadas estabilizadas da seguinte maneira:

Camadas estabilizadas granulometricamente compreendem os reforços do subleito, sub-bases ou bases, constituídas por solos naturais, rochas alteradas, misturas de solos, misturas de diferentes tipos de agregados (brita, areia, etc.) ou ainda quaisquer combinações de materiais granulares que apresentem estabilidade e durabilidade adequadas, para resistir as cargas previstas e à ação dos agentes climáticos, quando convenientemente compactadas.

O estudo de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente é de grande influência para a evolução da pavimentação asfáltica, em especial quando são utilizados materiais alternativos, neste caso a bica corrida, aumentando o leque de opções para compor as soluções de problemas em pavimentação, devendo-se adequar as especificações de granulometria exigidas já que a estabilização se dá por meio da interação das partículas que se adequam de uma melhor forma quando os vazios deixados pelas partículas de maiores dimensões são preenchidos pelas partículas de menores dimensões. Assim, a fim de unificar os estudos de bases e sub-bases, foram criadas as normas DNIT 139/2010 – ES e DNIT 141/2010 – ES, as quais tratam da estabilização granulométrica dessas camadas de pavimento.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas podem ser classificadas de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006)

As camadas de base e sub-base granulares geralmente são formadas por solos, britas de rochas, escórias de alto forno ou ainda pela mistura dos elementos anteriormente citados, sendo estabilizadas granulometricamente pela compactação de um ou mais desses materiais, com granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos. Quando se usa essencialmente produtos de britagem, obtém-se bases e sub-bases e brita graduada ou de brita corrida (DNIT,2006).

Afim de garantir os índices geotécnicos, a norma DNIT 139/2010 – ES (Sub-Bases estabilizadas granulometricamente) especifica que os materiais devem apresentar índice de grupo IG igual a zero, bem como, na análise granulométrica, a fração retida na peneira nº 10 deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras impurezas. Com relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, a norma especifica um valor maior ou igual a 20%, apresentando uma expansão menor ou igual a 1% para os corpos de prova submetidos ao ensaio de compactação na energia intermediária ou maior que essa.

A norma DNIT 141/2010 – ES (Bases estabilizadas granulometricamente) exige que o material da estabilização se encaixe em uma das faixas mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixas granulométricas para bases estabilizadas granulometricamente

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerância da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	100	100	100	100	± 7
1"	100	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	60-100	100	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	15-30	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT (2010)

Além das faixas para enquadramento granulométrico a norma DNIT 141/2010 define que a fração retida na peneira nº40 deve apresentar limite de liquidez, determinado pela norma DNER 122/94, igual ou inferior a 25% e índice de plasticidade inferior a 6%. Caso esses limites não forem respeitados, o equivalente de areia deve ser superior a 30%. Vale ressaltar que a porcentagem de material que passa na peneira nº200 não poderá ultrapassar 2/3 da porcentagem passante na peneira nº40. Para o Índice de Suporte Califórnia a norma estabelece uma porcentagem de 60% ou mais para tráfego leve ($N \leq 5 \times 10^6$) e 80% ou mais para tráfego pesado ($N > 5 \times 10^6$), com uma taxa de expansão menor ou igual a 0,5%. Assim como a DNIT 139/2010, a norma DNIT 141/2010 exige que a fração retida na peneira nº10 deve ser constituída de partículas firmes, isentas de partículas moles material orgânico e outros elementos prejudiciais.

Para que haja uma correta estabilização de bases e sub-bases, acatando-se os índices geotécnicos citados, o agregado bica corrida deve seguir alguns aspectos para sua utilização. Tais aspectos são relacionados na norma DER P00/041 – ET, do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo. Tal norma define que, o agregado bica corrida, deve apresentar índice de Abrasão Los Angeles inferior a 50%, equivalente de areia do agregado miúdo superior a 55%, índice de forma inferior a 0,5 com porcentagem de partículas lamelares inferiores a 10%. Com relação a granulometria do agregado, a curva granulométrica deve enquadrar-se em uma das faixas apresentadas na Tabela 2. Por fim, quando submetido ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia, o agregado deve apresentar índice superior a 100% com uma expansão igual ou inferior a 0,5%.

Tabela 2 - Faixas para enquadramento granulométrico da bica corrida

Peneiras de malha quadrada		% em massa passando		Tolerância
ASTM	mm	A	B	
3"	76	100	100	
2.1/2"	63,5	90-100	-	± 7
2"	50	-	90-100	± 7
1"	25	65-90	70-100	± 7
4	4,8	35-70	-	± 5
10	2	-	25-55	± 5
200	0,075	0-20	0-10	± 2

Fonte: DER SP (2010)

2.6 Misturas solo laterítico-agregado

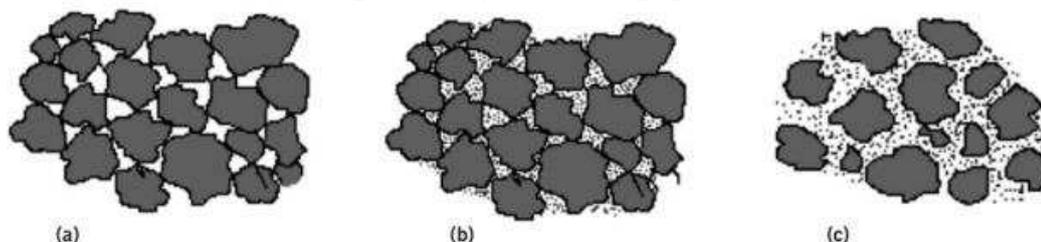
As misturas solo laterítico-agregado são de grande importância na pavimentação quando é necessário atingir as propriedades para o bom funcionamento das camadas estruturais de pavimento.

Segundo Balbo (2007, p. 162):

“[...] Muitos são os solos que podem ser modificados com o emprego desta técnica de estabilização: desde solos de comportamento não laterítico, quando não se tem opção nenhuma, como no caso de solos argilosos do tipo NG’, ou ainda, com emprego de solos de comportamento laterítico, em especial os solos LA’ e LG’”.

Para melhor entender o comportamento dos solos-agregado Yoder e Witckaz (1995) *apud* BERNUCCI et al. (2006) classificam as misturas, dependendo da relação entre partículas graúdas e parte fina (Figura 12), da seguinte maneira:

Figura 12 - Tipos de solo - agregado



Fonte: Bernucci et al. (2006)

a) Contato grão-grão com baixa densidade, sendo permeáveis e de difícil compactação.

b) Contato grão-grão, com preenchimento de vazios pelo material fino e compactação moderada e alta densidade.

c) Não ocorre o contato grão-grão pelo excesso de partículas finas, por esse motivo a mistura é facilmente afetada pela variação de umidade, sendo de fácil compactação e com densidade inferior ao tipo (b).

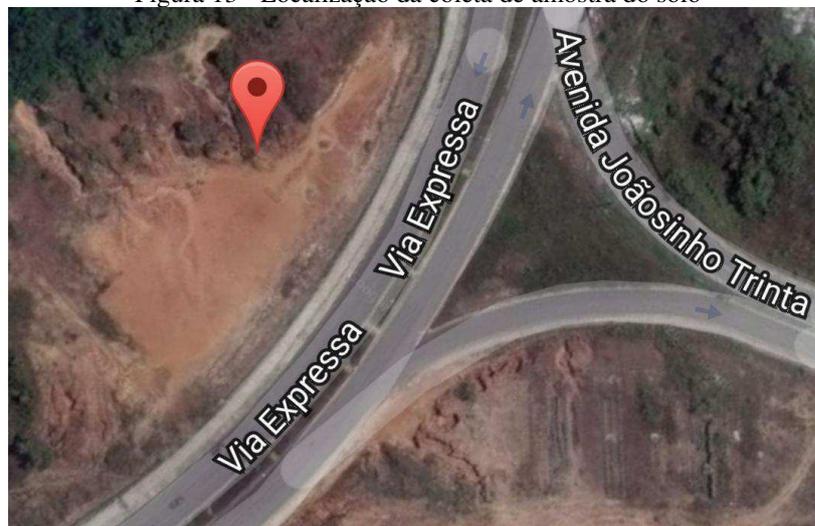
3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

3.1.1 3.1.1 Solo

O solo utilizado no estudo em questão foi coletado na região da Via Expressa, nas proximidades com a Avenida Joãozinho Trinta (Figura 13), local escolhido pela facilidade de acesso ao solo e pela qualidade previamente certificada pela orientadora do estudo. Para auxiliar a coleta do material foram utilizados sacos, enxada e pá, retirando-se cerca de 200 kg de solo.

Figura 13 - Localização da coleta de amostra do solo



Fonte: O autor (2019)

O processo de coleta de solo pode ser visto na Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Processo de coleta de solo para ensaios laboratoriais

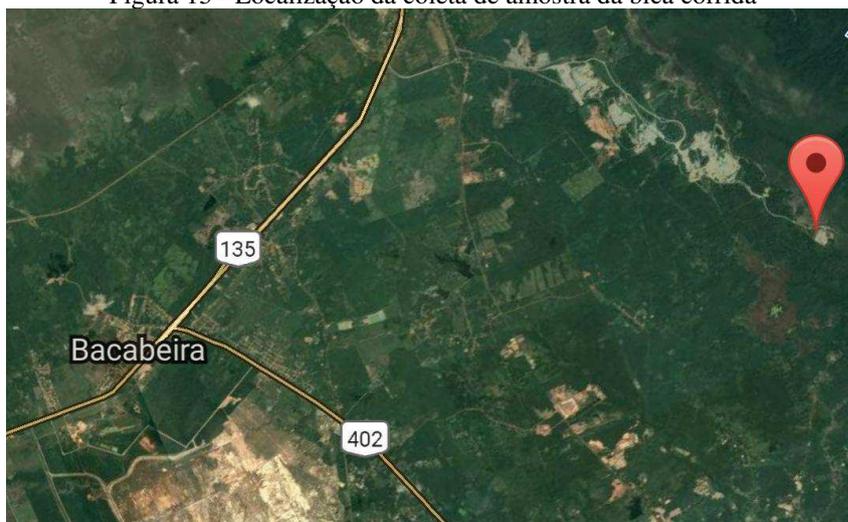


Fonte: O autor (2019)

3.1.2 Bica Corrida

A bica corrida utilizado no estudo foi retirada e fornecida pela Granorte – Grande Norte de Mineração Sá, empresa especializada em britagem, localizada (Figura 15) na cidade de Bacabeira, km 43 da Br 135. Foram coletados cerca de 200 kg de material para a realização do estudo.

Figura 15 - Localização da coleta de amostra da bica corrida



Fonte: Google Maps (2019)

3.2 Ensaios de caracterização do solo

3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo é a determinação da faixa de tamanho das partículas presentes no solo, expressa como uma porcentagem do peso total seco (DAS, 2007). Para isso é realizado o método do peneiramento seguindo os critérios da norma DNER ME 080/98. Segundo a norma é necessária uma amostragem de 2000 g de solo arenoso seco ao ar. Primeiramente, o solo é destorroado com o auxílio da bacia de porcelana e mão de gral, para que o mesmo possa ser passado na peneira nº 10 (2 mm), separando assim o material grosso e o material fino, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Amostra de solo separada pela peneira n° 10 (2 mm)



Fonte: O autor (2019)

Após a separação das amostras individuais para o peneiramento fino e peneiramento grosso, tais amostras são lavadas nas peneiras n°200 e n°10 respectivamente, a fim de retirar as impurezas. Além disso, são retiradas três amostras para a obtenção da umidade do solo, a qual será utilizada no cálculo para a determinação da curva granulométrica.

Com as amostras lavadas e devidamente secas até constância em massa, é realizado o peneiramento do material na sequência de peneiras contida na norma regulamentadora do ensaio, a fim de coletar a massa retida individual de cada peneira.

Para a determinação da curva granulométrica do solo, faz-se os cálculos de porcentagens retidas e acumulados, para finalmente, encontram os valores da porcentagem passante em cada peneira.

A partir da determinação da curva granulométrica do solo são calculados alguns coeficientes que classificam esse material de acordo com sua uniformidade e graduação. Das (2007), determina essas classificações da seguinte maneira:

I. Diâmetro efetivo (D_{10}): Esse parâmetro é o diâmetro na curva de distribuição do tamanho das partículas correspondentes a 10% mais fino. O diâmetro efetivo de um solo granular é uma boa medida para se estimar a condutividade hidráulica e a drenagem através do solo.

II. Coeficiente de Uniformidade (C_u): determina se o solo é uniforme ou não-uniforme, através da razão entre D_{60} (Diâmetro correspondente a 60% mais fino) e D_{10} (Tabela 3)

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Tabela 3 - Parâmetros de uniformidade do solo.

Cu - Coeficiente de Uniformidade	
Cu < 5	Solo Uniforme
5 < Cu < 15	Solo Uniformemente Médio
Cu > 15	Solo Desuniforme

Fonte: Adaptado de Das (2007)

III. Coeficiente de Curvatura (Cc): é o parâmetro que indica a graduação do solo (Tabela 4).

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2)$$

Tabela 4 - Parâmetros de graduação do Solo.

Cc Coeficiente de Curvatura	
1 < Cc < 3	Solo Bem Graduado
Fora de intervalo	Solo Mal Graduado

Fonte: Adaptado de Das (2007)

3.2.2 Limites de consistência

Os limites de consistência (Figura 17), ou limites de Atterberg, são os teores de umidade que garantem aos solos comportamentos semelhantes aos solos finos. Para Das (2007), um teor de umidade muito baixo no solo faz com que ele se comporte como um sólido, porém, quando esse teor de umidade é relativamente alto, o solo e a água podem fluir como um líquido. Sendo assim, dependendo desse teor de umidade o comportamento do solo pode ser dividido em quatro estados básicos: sólido, semissólido, plástico e líquido.

Figura 17 - Estados e limites de consistência



Fonte: Adaptado de Caputo (1988)

O teor de umidade, em porcentagem, no qual a transição do estado sólido para o semissólido ocorre é definido como limite de contração. O teor de umidade, no qual a transição do estado semissólido para o estado plástico ocorre é definido como limite de plasticidade e do estado plástico para o estado líquido é o limite de liquidez.

Os resultados dos ensaios dos limites de consistência foram retirados do estudo do comportamento de solos lateríticos finos, feito por Soares (2018).

3.2.2.1 Limite de liquidez

O limite de liquidez (LL) do solo é determinado pelo método de ensaio apresentado na norma DNER ME 122/94, que consiste em obter o teor de umidade necessário para fechar a ranhura padrão feita pelo cinzel após 25 golpes no aparelho de Casagrande. O conjunto de materiais para a realização do ensaio pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Conjunto para ensaio de limite de liquidez



Fonte: O autor (2019)

Para a realização do ensaio, é necessário separar uma pequena amostra de solo, cerca de 70 g, a qual é umedecida e homogeneizada com o auxílio da espátula e colocada na concha do aparelho de Casagrande preenchendo cerca de $2/3$ da sua totalidade, com o mínimo

de passadas de espátula possíveis, evitando-se assim a entrada de bolhas de ar na massa de solo. Usando o cinzel, abre-se a ranhura na parte central da amostra com cerca de 1 cm. Após o preparo, são aplicados os golpes, acionando-se a manivela contida no aparelho até que as duas bordas inferiores da ranhura se unam. Feito isso, uma pequena amostra é retirada de ambos os lados da ranhura para a determinação do teor de umidade (DNER,1994).

O processo é repetido pelo menos mais cinco vezes com teores de umidade crescentes, a fim de plotar-se a curva de fluidez, que relaciona os teores de umidade retirados do ensaio com o número de golpes apresentados. Com auxílio de ferramentas gráficas, é retirado o teor de umidade para 25 golpes, o qual representa o limite de liquidez.

3.2.2.2 Limite de plasticidade

Para Senço (2007, p. 96) “o limite de plasticidade [...] é o menor teor de umidade que um cilindro de solo de cerca de 10 cm de comprimento é rolado, rompendo-se ao atingir 3 mm de diâmetro”.

O ensaio de limite de plasticidade (LP) é determinado pela norma DNER ME 082/94 e, para realizá-lo é necessário tomar uma amostra com cerca de 50 g de solo, a qual é umedecida gradativamente até formar uma massa plástica para ser trabalhada. Feito isso, separa-se uma pequena quantidade para ser modelada com o auxílio dos dedos até formar o cilindro uniforme. Quando diâmetro do cilindro de solo atingir 3mm, quebra-se o mesmo em seis a oito pedaços, que são amassados até obter uma massa elipsoidal. O procedimento de rolagem é novamente realizado, até que o solo desagregue e não consiga mais formar um novo cilindro. Quando ocorrer o rompimento, os pedaços são transferidos para uma cápsula onde são pesados para a obtenção do teor de umidade (DNER, 1994).

A média de três teores de umidade em três operações distintas é considerado o limite de plasticidade do solo.

3.2.2.3 Índice de plasticidade

Com a realização dos ensaios de LL e LP, é possível obter o índice de plasticidade do solo, através da equação (3):

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Em que:

IP – Índice de plasticidade, em %;

LL = Limite de liquidez, em %;

LP = Limite de plasticidade, em %.

Vale ressaltar que, quando o limite de plasticidade não pode ser determinado, devido à natureza do material utilizado no ensaio, o resultado é dado como não plástico (NP). Já, quando o limite de plasticidade for igual ou superior ao limite de liquidez o índice de plasticidade é designado também por NP (SENÇO, 2007).

Senço (2007, p. 99) ainda afirma que:

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

3.2.3 Classificação MCT

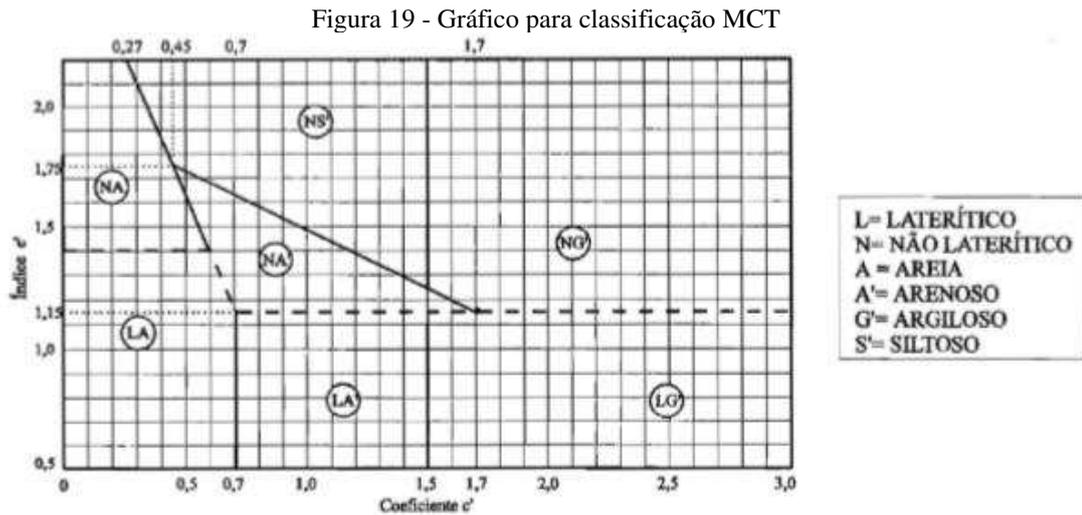
A sistemática MCT (Miniatura Compactado Tropical) é caracterizada pela utilização de corpos de prova (CP) cilíndricos, com dimensões reduzidas, comparados aos corpos de prova tradicionais, com diâmetro de 50 mm e de altura aproximadamente igual ao diâmetro. Por esses motivos são chamados de miniaturas. Os principais ensaios utilizados nesse trabalho para a classificação são: Ensaio de compactação Mini-MCV, Ensaio de perda de massa por imersão e Classificação geotécnica MCT (Villibor et al. 2009).

Para a classificação geotécnica, o ensaio de compactação Mini-MCV, que é realizado pela norma DNER ME 258/94, e o ensaio de perda de massa por imersão, que é realizado pela norma DNER ME 256/94, são de suma importância, já que determinam os coeficientes c' e e' , classificando o solo graficamente (VILLIBOR et al., 2009).

A sistemática MCT classifica os solos em dois grandes grupos: os solos de comportamento laterítico (L) e os solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em areia laterítica (LA), solo arenoso laterítico (LA') e solo argiloso laterítico (LG'). Os solos de comportamento não laterítico, são

subdivididos em areia não laterítica (NA), solo arenoso não laterítico (NA'), solo siltoso não laterítico (NS') e solo argiloso não laterítico (NG').

A partir da determinação dos coeficientes c' e e' , o solo em estudo pode ser enquadrado em uma das classificações acima citadas. O processo de classificação geotécnica é mostrado na Figura 19 a seguir.



Segundo Nogami e Villibor (1995) o coeficiente c' (coeficiente de deformabilidade) é o coeficiente angular da reta assimilável à curva Mini-MCV, correspondente ao Mini-MCV igual a 10. O coeficiente e' , chamado de índice de laterização, é calculado numericamente pela fórmula (4):

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (4)$$

Em que:

Pi – valor da perda de massa por imersão, que corresponde ao Mini-MCV igual a 10 para solos de baixa massa específica aparente (MEA), e ao Mini-MCV igual a 15 para solos de alta massa específica aparente;

d' – é a inclinação do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, correspondente a 12 golpes.

3.2.3.1 Ensaio de compactação Mini-MCV

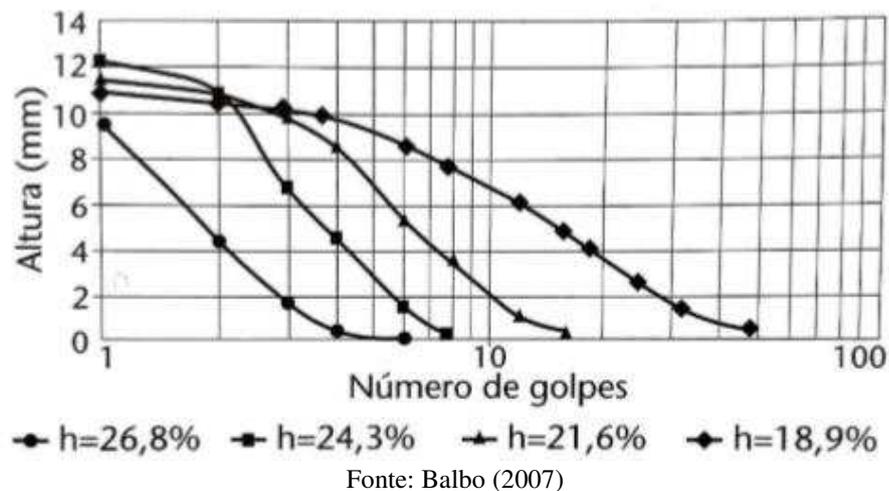
Para Balbo (2007, p. 84) “o ensaio de compactação Mini-MCV é capaz de fornecer dados como o desvio de umidade em relação a umidade ótima de compactação e também o grau de compactação do solo”.

O ensaio consiste em verificar a altura de um corpo de prova em função do número crescente de golpes, relacionando-se então o peso específico do solo em estudo em função do logaritmo do número de golpes. Sendo assim, pode-se atribuir diferentes teores de umidade ao solo, a fim de determinar um conjunto de curvas, relacionando os diferentes pesos específicos seco do solo com o número de golpes aplicados (BALBO, 2007). O valor do Mini-MCV em função do número de golpes (B_i) é dado pela equação (5):

$$\text{Mini - MCV} = 10 \times \log_{10} B_i \quad (5)$$

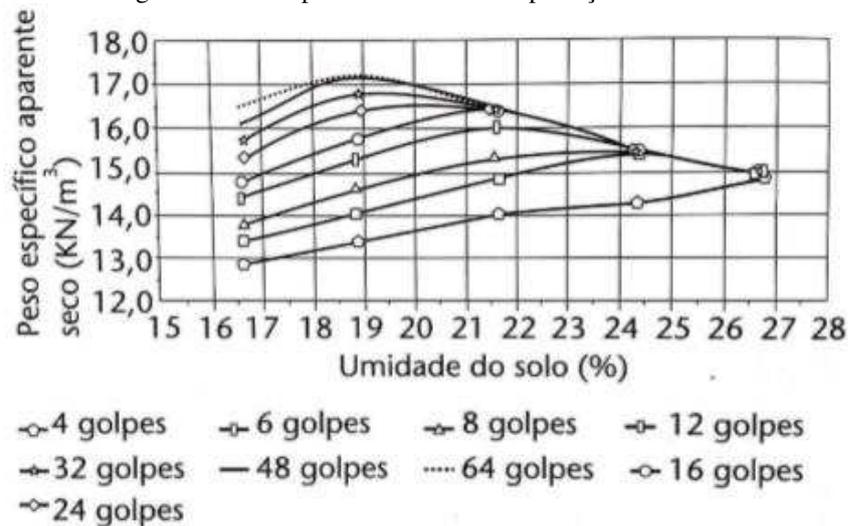
A seguir, pode-se observar na Figura 20, o conjunto de curvas para a determinação do Mini-MCV.

Figura 20 - Exemplo de conjunto de curvas do ensaio Mini-MCV



De posse das umidades de compactação, é possível montar o segundo conjunto de curvas, relacionando o peso específico aparente seco e as umidades acima citadas. Esse conjunto de curvas é fundamental para a determinação do coeficiente d' , apresentado anteriormente. A Figura 21, mostra um exemplo de conjunto de curvas estudado anteriormente.

Figura 21 - Exemplo de curvas de compactação Mini-MCV



Fonte: Balbo (2007)

De maneira prática, a norma DNER ME 258/97, determina que para a realização do ensaio são necessárias 5 amostras de aproximadamente 500 g cada, sendo que, deve-se adicionar cerca de 2% de água em cada amostra, acondicionando-a por 24 horas para então serem realizados os golpes.

Antes da aplicação dos golpes a aparelhagem é aferida, obtendo-se a constante K_a do conjunto compactador-soquete (Figura 22), a qual é fundamental na obtenção da altura do corpo de prova. Com o conjunto aferido, prepara-se os moldes, aplicando vaselina nos mesmos. Após isso, coloca-se os espaçadores envolvendo o pistão compactador, colocando o pistão sobre os mesmos de maneira que fique parcialmente dentro do molde. Assim, retira-se da amostra preparada cerca de 200 g para ser adicionada ao molde com auxílio do funil e uma pequena parte para a determinação do teor de umidade. Com tudo, a compactação é realizada, anotando-se a altura do corpo de prova para os golpes padronizados na série: 2, 3, 4, 5, 12, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256 (DNER, 1994).

Figura 22 - Conjunto para ensaio de compactação Mini-Mcv



Fonte: O autor (2019)

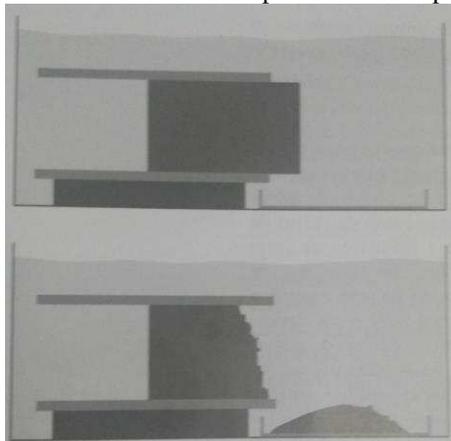
3.2.3.2 Ensaio de perda de massa por imersão

Segundo Balbo (2007, p. 85)

“No ensaio de perda de massa por imersão, a amostra de solo compactada no molde é parcialmente extraída até que se obtenha uma saliência de 10 mm do corpo de prova cilíndrico. Nessas condições (parcialmente no molde), o corpo de prova é colocado em repouso, imerso em água, em posição horizontal, por um período de vinte e quatro horas, sendo uma cápsula colocada abaixo da área exposta da amostra para que, com a erosão da parte exposta da amostra (ou ainda mais), o solo caia dentro da cápsula, a fim de ser medida tal massa desprendida do corpo de prova”.

A seguir, é possível visualizar de uma melhor forma o ensaio de perda de massa por imersão, através da Figura 23.

Figura 23 - Detalhe do ensaio de perda de massa por imersão



Fonte: Balbo (2007)

Balbo (2007, p. 85-86) ainda acrescenta que “tal ensaio tem especial interesse na verificação do potencial erosivo de solos sujeitos a longos períodos de saturação, além de colaborar para a determinação de um parâmetro para classificação”.

A norma DNER ME 256/94, que regulamenta o ensaio de perda de massa por imersão, retrata o resultado de ensaio pela fórmula (6) a seguir:

$$P_i = \frac{M_d \times 100}{M_o} \quad (6)$$

Em que:

P_i = perda de massa por imersão, em porcentagem;

M_d = massa de solo seco da porção desprendida do corpo de prova, em gramas;

M_o = massa de solo, correspondente da 10 mm do corpo de prova, logo após a compactação do mesmo, em gramas.

A norma DNER ME 256/94 também especifica que quando a massa de solo que se desprende tem formato de um único cilindro, deve-se multiplicar a massa seca em estufa pelo fator 0,5.

Assim como nos ensaios dos limites de consistência, os resultados da classificação MCT do solo utilizado no presente trabalho foram fornecidos pela pesquisa realizada por Soares (2018).

3.2.4 Equivalente de areia

A medida de equivalente de areia é a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou agregado miúdo (DNER, 1997). Esse ensaio é regulamentado pela norma DNER 054/97. A amostragem corresponde a uma cápsula padrão (Figura 24) contida no conjunto do ensaio, chegando a 110 g de material, passante na peneira de 4,75 mm (n° 4).

Figura 24 - Cápsula contendo amostra para ensaio de equivalente de areia



Fonte: O autor (2019)

Primeiramente deve ser inserida a solução, previamente preparada, com o auxílio do bico vertedor até a marca de 10 cm, em uma proveta destinada somente ao ensaio. Em seguida, a amostra é inserida na proveta (Figura 25) através de um funil para que não haja perda de material. Após a inserção, são aplicados alguns golpes com a palma da mão no fundo da proveta, afim de retirar as bolhas de ar contidas no conjunto, o qual é deixado em repouso por um período de dez minutos (DNER, 1997).

Figura 25 - Colocação de amostra na proveta para ensaio de equivalente de areia



Fonte: O autor (2019)

Após o período de repouso, a proveta é tapada com uma rolha para que possa ser submetida a 90 ciclos de agitação durante um período de 30 segundos. Posteriormente a agitação, a rolha e proveta são lavadas com o auxílio do bico vertedor, completando-se com

solução de trabalho até a marca de 38 cm acima da base da proveta, como mostrado na Figura 26. O conjunto é deixado novamente em repouso, por um período de 20 minutos, para que haja a correta separação da parte de argila e da parte de areia (DNER, 1997).

Figura 26 - Inserção de solução na proveta até à marca superior



Fonte: O autor (2019)

Terminado o período de repouso, um pistão metálico é inserido cuidadosamente (Figura 27) na proveta até ser assentado completamente sobre a camada de areia. Vale ressaltar, que qualquer força aplicada para baixo pode introduzir ainda mais o pistão na camada de areia, garantindo um falso resultado para o ensaio. Assentando-se o pistão, é feita a leitura das alturas de areia e argila com a régua (DNER, 1997).

Figura 27 - Inserção da haste metálica para medição das alturas de areia e argila



Fonte: O autor (2019)

O equivalente de areia é dado pela seguinte expressão:

$$EA = \frac{h1}{h2} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

$h1$ = Leitura no topo da argila, em centímetros;

$h2$ = Leitura no topo da areia, em centímetros;

3.2.5 Ensaio de compactação

Em geral, a compactação é a densificação do solo por meio da remoção do ar, o que requer aplicação de energia mecânica (DAS, 2007). O ensaio de compactação Proctor, é realizado pela norma DNER ME 162/94, pela qual são utilizadas amostras trabalhadas, sendo utilizado o mesmo cilindro de compactação para moldar o corpo de prova nas umidades gradativamente crescentes, até a queda em massa do material sob compactação.

Em um primeiro momento são retiradas as medidas (altura e diâmetro) do molde e disco espaçador, como o auxílio do paquímetro digital, a fim de calcular o volume útil do corpo de prova que será compactado, além do peso do molde cilíndrico.

Após as aferições, o conjunto de compactação é colocado na base à espera do início do ensaio, como visto na Figura 28.

Figura 28 - Conjunto de molde e soquete para ensaio de compactação



Fonte: O autor (2019)

A amostra do ensaio de compactação deve estar seca ao ar, para que possa ser destorroada e homogeneizada na bacia de porcelana pela mão de gral, garantindo uma amostragem total de 7000 g

Primeiramente, a amostra é umedecida e homogeneizado, como mostrado na Figura 29, até que o material tenha coesão ao ser pressionado com as mãos. O processo de compactação se dá por meios da adição de cinco camadas de solo, que serão submetidas a 26 golpes entre camadas, correspondente a energia intermediária de compactação, contida no método B da norma DNER ME 162/94.

Figura 29 - Umedecimento e homogeneização de amostra para ensaio de compactação



Fonte: O autor (2019)

Finalizando o ensaio, o cilindro complementar é retirado para que seja feito o rasamento do excesso de material, deixando-o na altura exata do cilindro, para que possa ser feita a pesagem do conjunto. Vale ressaltar que, após a pesagem, retorna-se o material compactado a bandeja na qual será aumentado em 2% o teor de umidade para a nova compactação, posteriormente à retirada de duas cápsulas de solo para a definição do teor umidade.

Para o cálculo da curva de compactação, é importante avaliar a umidade de cada teor adicionado, para que possa ser aplicado na determinação da massa específica do solo seco, através da fórmula (8):

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (8)$$

Em que:

γ_s = massa específica aparente do solo seco, em g/cm^3 ;

γ_h = massa específica aparente do solo úmido, em g/cm^3 ;

h = teor de umidade do solo compactado, em porcentagem.

A massa específica aparente do solo úmido é calculada pela seguinte fórmula (9):

$$\gamma h = \frac{P'h}{V} \quad (9)$$

Em que:

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

V = volume do solo compactado, em m^3 ;

Plotando-se o gráfico, o teor de umidade é representado no eixo das abscissas e a massa específica aparente do solo seco é representado no eixo das ordenadas. O teor de umidade para o ponto de maior massa específica aparente seca contida no gráfico é dado como o teor de umidade ótimo de compactação, bem como o maior valor das ordenadas é dito como massa específica aparente máxima do solo seco ($MEAS_{máx}$). Tais valores são importantes para o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, que é realizado logo após a compactação.

3.2.6 Índice de suporte Califórnia

O ensaio de ISC ou CBR (Califórnia Bearing Ratio), para Senço (2007, p. 219) “é, sem dúvidas, uma das características mais aceitas para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de pavimento, quer como componentes das camadas desse pavimento”.

Segundo Bernucci et al. (2006):

“A resistência no ensaio de ISC é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O ISC é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo ou material granular e a mesma pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial”.

A norma que regulamenta o ensaio de ISC é a DNER ME 172/2016, e para sua execução, deve-se utilizar o mesmo modelo de compactação para moldar o corpo de prova que será ensaiado no ISC, lembrando que o teor de umidade utilizado é o teor de umidade ótimo extraído do ensaio de compactação do solo.

Após a moldagem do corpo de prova, o mesmo é invertido, retirando-se o disco espaçador, a fim de ser colocado a haste de expansão, a qual suportará os pesos anelares que irão simular o peso do pavimento, para o ensaio de expansão, o qual é realizado em conjunto com o ISC. Após esse procedimento, o corpo de prova é imerso no tanque para que possa ser adicionado o extensômetro, que será responsável por coletar a medida de expansão de 24 horas em 24 horas, durante quatro dias corridos. Terminado o período de imersão, o corpo de prova

é retirado do tanque, deixando-se escoar a água durante 15 minutos, para então ser realizado a penetração do pistão (DNER, 2016).

Finalizado o período de repouso, o corpo de prova é levado até a máquina de CBR-MARSHALL (Figura 30), na qual é assentado o pistão sobre o topo do corpo de prova, bem centralizado, o qual será aplicado uma carga de aproximadamente 4,5 kg a uma velocidade de 1,27 mm/min. Com isso, deve-se anotar as cargas atuantes em cada profundidade de penetração (DNER, 1994).

Figura 30 - Corpo de prova sendo ensaiado pela Máquina CBR-MARSHALL



Fonte: O autor (2019)

O valor do CBR é expresso em porcentagem através da fórmula 10, em que a pressão calculada ou corrigida é dada pelo ensaio de penetração e a pressão padrão corresponde a 70,31 kgf/cm² na penetração de 0,1 polegadas e 105,46 kgf/cm² na penetração de 0,2 polegadas. O valor final do CBR é dado pelo maior dos valores obtidos nas duas penetrações.

$$ISC = \frac{\textit{Pressão calculada ou corrigida}}{\textit{Pressão padrão}} \times 100 \quad (10)$$

3.3 Ensaios de caracterização do agregado

3.3.1 Análise granulométrica

Para a análise granulométrica do agregado bica corrida foi utilizado a norma DNER ME 083/98. Primeiramente, as amostras foram coletadas seguindo-se a norma DNER PRO 120/97 e reduzidas de acordo com a norma DNER PRO 199/96. Para a redução de amostras foi utilizado o quarteador (Figura 31), coletando-se então duas porções M1 e M2, sendo M1 com massa de 7.000,8 g e M2 com 7.000,4 g, respeitando a quantidade mínima de agregado para o seu tamanho máximo, estabelecido em norma.

Figura 31 - Quarteador de amostras



Fonte: O autor (2019)

Separadas as amostras, as mesmas são colocadas na estufa com temperatura de 110°C, até constância em massa, para a realização do peneiramento, de acordo com a série de peneiras (Figura 32) disposta na norma DNER ME 035/95. Feito o peneiramento, de forma manual, são anotadas as quantidades de agregado retido em cada peneira.

Figura 32 - Sequência de peneiras para ensaio de granulometria



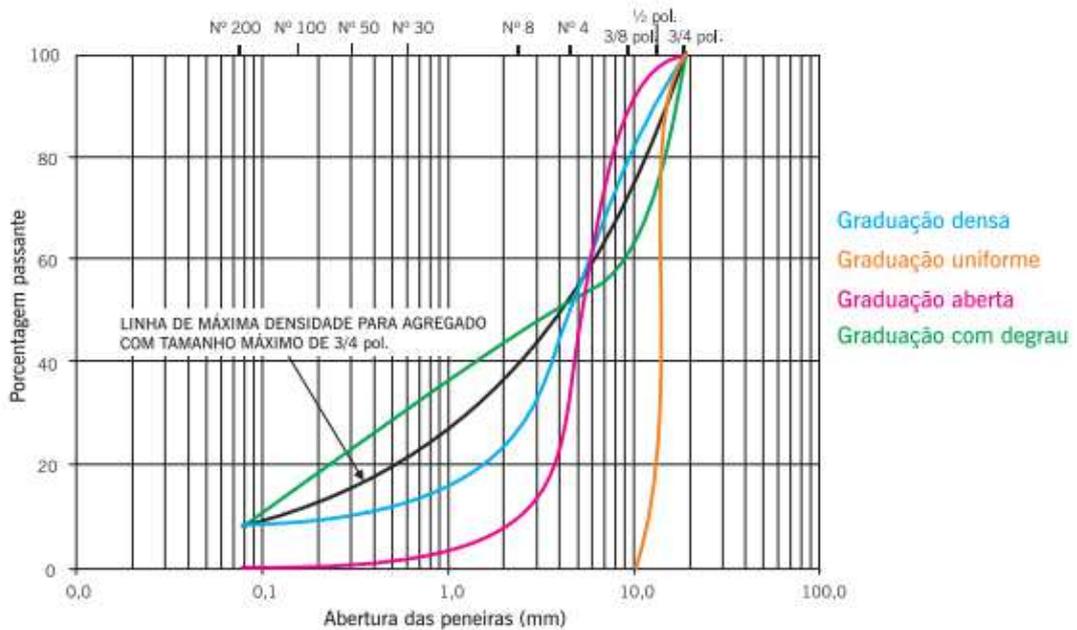
Fonte: O autor (2019)

A partir dos cálculos de porcentagem passante em cada malha, que influencia diretamente na composição da curva granulométrica, existem algumas classificações para determinar as características do agregado. Bernucci et al. (2006), denomina essas classificações como:

- I. Agregado de graduação densa ou bem graduado: possui uma distribuição granulométrica contínua.
- II. Agregado de graduação aberta: possui uma distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de finos.
- III. Agregado de graduação uniforme: apresenta a maioria de suas partículas em uma faixa muito estreita, portando sua curva granulométrica é bastante íngreme.
- IV. Agregado com graduação descontínua: apresenta na sua porção intermediária, um patamar na curva granulométrica.

A Figura 33, demonstra de forma gráfica, as classificações definidas anteriormente:

Figura 33 - Representação gráfica das graduações

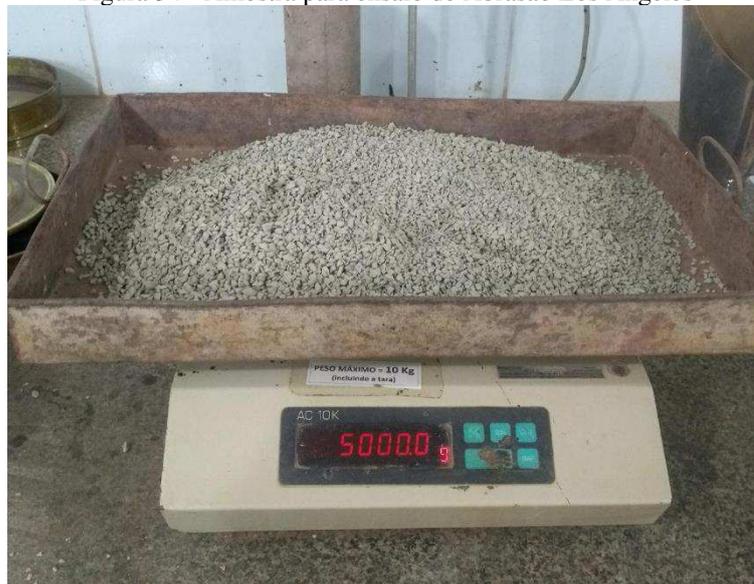


Fonte: Bernucci et al. (2006)

3.3.2 Abrasão a Los Angeles

Para o ensaio de Abrasão Los Angeles foi utilizado a norma DNER ME 035/98. Para a seleção da faixa de amostragem foi utilizado a análise granulométrica da bica corrida, assim foi escolhido a faixa D, recorrendo-se para o material passante na peneira de nº4, com 2500 g, e retido na peneira nº 8, com 2500 g, totalizando uma massa de amostra de 5000 g, a qual pode ser vista na Figura 34.

Figura 34 - Amostra para ensaio de Abrasão Los Angeles



Fonte: O autor (2019)

Após a separação da amostra, a mesma foi lavada afim de retirar todo o material pulverulento e levada para a estufa até constância em massa do material. Logo após a secagem, a amostra é colocada na máquina Los Angeles (Figura 35) juntamente com a carga abrasiva que, para a faixa D, são 6 esferas metálicas, totalizando 2500 g de carga, girando em 500 rotações. Para finalizar o ensaio, a amostra é retirada da máquina para ser novamente lavada e seca até constância em massa, determinando assim a porcentagem abrasiva.

Figura 35 - Máquina utilizada no ensaio de abrasão "Los Angeles"



Fonte: O autor (2019)

O cálculo da porcentagem abrasiva é calculado pela fórmula (11):

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (11)$$

Em que:

A_n = abrasão "Los Angeles" da graduação n, em porcentagem;

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

m_n = massa total da amostra seca colocada na máquina, em gramas;

m'_n = massa da amostra lavada seca pós ensaio, em gramas.

3.3.3 Ensaio de densidade e absorção

O ensaio de densidade e absorção é realizado através da norma DNER ME 081/98. Para a realização desse ensaio, é necessária uma amostragem mínima de 3000 g de material, o qual é selecionado através da peneira nº 4, descartando-se totalmente a massa passante na referida peneira, a menos que a massa passante tenha 2% da massa total usada na amostra de ensaio. Sendo assim é necessário fazer o ensaio complementar DNER ME 194/98.

Posteriormente à separação da amostra, é necessário lavá-la e acondicioná-la em estufa em temperatura de 105°C – 110°C até constância em massa. Após um período de vinte e quatro horas a amostra é retirada e resfriada em temperatura ambiente por no mínimo uma hora, para então ser submergida em água, como mostrado na Figura 36, a fim de determinar a absorção do material em questão (DNER, 1998).

Figura 36 - Amostra para ensaio de absorção seca em estufa (a) e submersa em água (b)



Fonte: O autor (2019)

O ensaio de absorção consiste basicamente na leitura de massa da amostra seca em estufa e leitura de massa da amostra pós imersão, a qual deve ser seca com o auxílio de um pano, retirando apenas a película de água superficial aos grãos do agregado, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Secagem da amostra de absorção



Fonte: O autor (2019)

O cálculo da absorção é dado pela fórmula (12):

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (12)$$

Em que:

a = absorção do agregado, dado em porcentagem;

M_h = massa da amostra na condição saturada, dado em gramas;

M_s = massa do agregado seco, dado em gramas.

O ensaio de densidade aparente é realizado através do princípio de Arquimedes, o qual consiste em utilizar o mesmo material do ensaio de absorção, com o auxílio de um recipiente capaz de sustentar uma cesta metálica que irá suportar o agregado, suspensa por um fio acoplado a uma haste metálica, como mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Aparato para a pesagem hidrostática



Fonte: O autor (2019)

Para se obter a leitura da massa de amostra é necessário tarar todo o conjunto submerso sem a presença do agregado contido na cesta metálica, para que possa ser inserido posteriormente, garantindo a pesagem hidrostática.

O cálculo da densidade aparente do material pelo princípio de Arquimedes é dado pela expressão (13):

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (13)$$

Em que:

D_{ap} = densidade aparente;

M_s = massa seca do agregado, dado em gramas;

M_h = massa do agregado na condição saturada seca, dado em gramas;

L = leitura da balança correspondente ao agregado submerso, dado em gramas.

Visto que o material passante na peneira de n° 4 representa mais de 2% da amostra total usada no ensaio de densidade, é necessário realizar o ensaio complementar de massa específica para agregados miúdos pelo método Chapman, seguindo a norma DNER ME 194/98.

Para a realização do ensaio, é necessário tomar cerca de 500 g do material seco passante na peneira n°4, para que possa ser introduzido posteriormente à adição de 200 cm³ de água no frasco Chapman, como mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Determinação da massa específica pelo frasco Chapman



Fonte: O autor (2019)

Feita a inserção da amostra, é necessário agitar cuidadosamente o conjunto afim de retirar as bolhas de ar contidas entre as partículas de agregado, garantindo maior precisão do resultado. Após a aferição é realizada a leitura da marca de água no frasco e a massa específica da amostra é dada pela fórmula (14):

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (14)$$

Em que:

L = leitura no frasco Chapman.

3.3.4 Equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia da bica corrida foi realizado pela norma DNER ME 054/97. A amostra do ensaio corresponde a uma cápsula padrão contida no conjunto de materiais para o equivalente de areia, pesando em torno de 110 g de agregado miúdo, ou seja, de material passante na peneira de 4,75 mm (n° 4).

Vale ressaltar que o ensaio de equivalente de areia foi realizado nos mesmos moldes do mesmo ensaio para o solo estudado. Sendo assim, primeiramente foi inserida a solução de trabalho na proveta, até a marca de 10 cm, juntamente com a amostra de agregado, como mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Amostra sendo inserida na proveta para ensaio de equivalente de areia



Fonte: O autor (2019)

Após a colocação da amostra, o conjunto é deixado em repouso por 10 minutos, para a posterior agitação da proveta em 90 ciclos durante 30 segundos. Logo após a operação a rolha é retirada e lavada com auxílio do bico vertedor, assim como as paredes da proveta, completando-se com solução de trabalho até a marca de 38 cm, na parte superior da proveta. O conjunto é deixado novamente em repouso por 20 minutos para que possam ser efetuadas as medidas, determinando-se o equivalente de areia do agregado. Assim como no solo, o equivalente de areia do agregado é dado pela fórmula (15):

$$EA = \frac{h1}{h2} \times 100 \quad (15)$$

Em que:

$h1$ = Leitura no topo da argila, em centímetros;

$h2$ = Leitura no topo da areia, em centímetros;

3.3.5 Ensaio de índice de forma

Para o ensaio de índice de forma foi utilizado a NBR 7809, a qual estabelece uma média entre as medidas dos grãos de agregados afim de estabelecer seus formatos. Dessa forma, para iniciar o ensaio é necessário separar uma amostra de acordo com a norma DNER PRO 199/98, de aproximadamente 8000 g. Assim é realizado a granulometria do material baseada na norma DNER 083/98, descartando todo material passante na peneira #9,5 mm, além das porcentagens retidas individuais iguais ou inferiores a 5% da massa seca da amostra utilizada no ensaio.

A fim de determinar a quantidade de grãos por fração retida, é utilizado a expressão (16):

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_i \dots + F_n} * F_i \quad (16)$$

Em que:

200 = número de grãos necessários para o ensaio;

N_i = número de grãos para medição, da fração i ;

F_i = porcentagem em massa retida individual correspondente a fração i ;

$F_1 + F_2 + \dots + F_i \dots + F_n$ = soma das porcentagens retidas individuais das frações obtidas.

A partir dos cálculos a amostra é separada (Figura 40) para a posterior medição dos grãos em suas três dimensões (comprimento, largura e espessura) com o auxílio do paquímetro (Figura 41).

Figura 41 - Amostra final para ensaio de índice de forma



Fonte: O autor (2019)

Figura 42 - Medição dos grãos do ensaio de índice de forma



Fonte: O autor (2019)

Para classificar as partículas do agregado toma-se como base a NBR 6954 – Determinação da forma do material. Assim, de acordo com a média das razões entre as dimensões dos grãos obtém-se o formato dos mesmos. Os grãos podem ser classificados de acordo com a Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Classificação da forma de agregados pétreos

Média das relações b/a e c/b	Classificação da forma
b/a maior que 0,5 e c/b maior que 0,5	Cúbica
b/a menor que 0,5 e c/b maior que 0,5	Alongada
b/a maior que 0,5 e c/b menor que 0,5	Lamelar
b/a menor que 0,5 e c/b menor que 0,5	Alongada - Lamelar

Fonte: NBR 6954 – Lastro padrão – Determinação da forma do material

3.4 Ensaios das misturas para estabilização

Para trabalhar as misturas de solo – bica em camadas de base é necessário enquadrar granulometricamente nas faixas específicas citadas na norma DNIT 141/2020, já que é necessário ter a porcentagem correta de solo-agregado, contemplando os mais diversos tamanhos de grãos. Sendo assim, a fim de determinar a porcentagem adequada de solo e agregado, foi utilizado o método numérico de estabilização por tentativas, chegando-se aos seguintes traços:

- a) Mistura A – 30% bica corrida e 70% solo (sub-base ou reforço);
- b) Mistura B – 50% bica corrida e 50% solo (sub-base ou reforço);
- c) Mistura C – 80% bica corrida e 20% solo (base);
- d) Mistura D – 90% bica corrida e 10% solo (base).

3.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica das misturas foi determinada através do método computacional pelo software Excel, em que foram estabelecidas as porcentagens do agregado e de solo, as quais foram multiplicadas pelas porcentagens passantes individuais, gerando a nova porcentagem passante da mistura.

A análise granulométrica das misturas é essencial na determinação dos traços para se obter uma boa compactação e um bom ensaio de CBR. Sendo assim, pelo método computacional gráfico é possível observar o comportamento da curva granulométrica de acordo com as variações das porcentagens de solo e agregado.

3.4.2 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação das misturas foi realizado no mesmo modelo do ensaio de compactação do solo virgem, utilizando-se a norma DNER ME 162/94 para amostras trabalhadas, regulamentando o ensaio.

A preparação da amostra consistiu na mistura dos pesos em massa, secos ao ar, devidamente peneirados usando a peneira de 19,0 mm (3/4”), sempre substituindo em igual peso o material retido na referida peneira pelo material passante na mesma. A seguir, tem-se a Tabela 6, a qual relaciona a porcentagem da mistura e a massa de cada material.

Tabela 6 - Quantidade de solo e agregado para cada mistura

Misturas	Quantidade de solo (g)	Quantidade de agregado (g)
Mistura A (30% bica)	4900	2100
Mistura B (50% bica)	3500	3500
Mistura C (80% bica)	1400	5600
Mistura D (90% bica)	700	6300

Fonte: O autor (2019)

Na figura 42 a seguir, pode-se observar o processo de homogeneização com a adição dos teores de umidade. Vale ressaltar que, para todas as misturas, sempre foi adicionado 2% de água destilada em relação ao peso total da amostra, girando em torno de 140 ml de água.

Figura 43 - Homogeneização de amostra solo-agregado para ensaio de compactação



Fonte: O autor (2019)

Após a compactação (Figura 43), foram retiradas as pequenas amostras do corpo de prova para a determinação do teor de umidade, a fim de gerar a curva de compactação.

Figura 44 - Compactação de amostra solo-agregado



Fonte: O autor (2019)

3.4.3 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios de ISC foram realizados nos mesmos moldes do ensaio de ISC do solo virgem, em que as misturas foram devidamente compactadas no teor de umidade ótimo determinado através do ensaio de compactação previamente realizado.

Na Figura 44 a seguir, pode-se ver os corpos de prova submersos para a determinação da expansão para, posteriormente, serem levados a máquina CBR-MARSHALL para a penetração do pistão.

Figura 45 - Corpos de prova de solo-agregado imersos para ensaio de ISC



Fonte: O autor (2019)

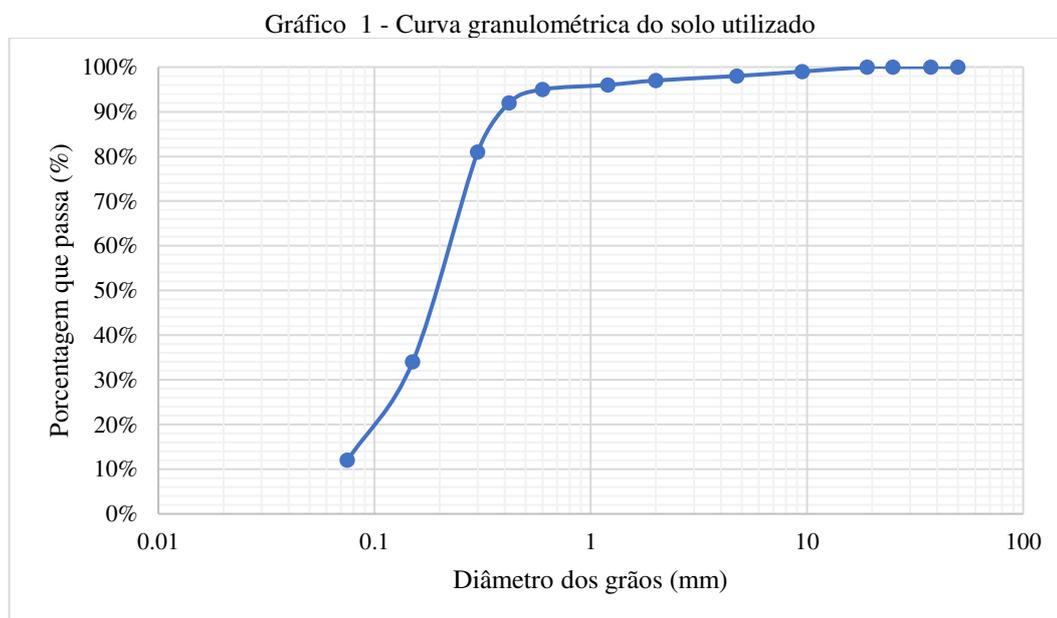
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões avaliam as características dos materiais utilizados no estudo, além de verificar sua capacidade de suporte para o posterior emprego nas camadas de pavimentos de base e sub-base. Assim, tais resultados foram analisados dentro das respectivas normas regulamentadoras e expostos de forma clara e objetiva.

4.1 Resultados dos ensaios de caracterização do solo

4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo, realizada através da norma DNER 080/98, gerou uma curva granulometria, a qual está apresentada no Gráfico 1 a seguir.



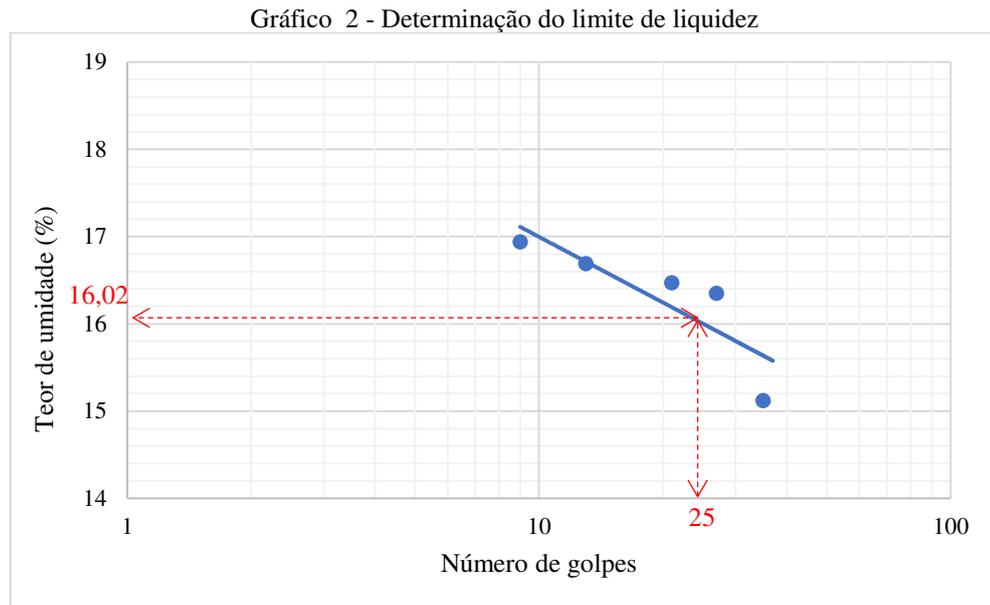
Fonte: O autor (2019)

A partir do gráfico apresentado acima, pode-se notar que o diâmetro efetivo (D_{10}) e o diâmetro D_{60} , correspondem a 0,066 mm e 0,22 mm respectivamente, gerando um coeficiente de uniformidade igual a 0,3, caracterizando o solo como uniforme. É possível notar também que o diâmetro D_{30} corresponde a 0,15 e, efetuando os cálculos, obtém-se um coeficiente de curvatura igual a 0,075, caracterizando o solo como mal graduado, o que é perceptível, já que nem todos os diâmetros são contemplados na análise granulométrica.

4.1.2 Limites de consistência

4.1.2.1 Limite de Liquidez

O solo passado na peneira de nº 40, foi analisado através do ensaio DNER ME 122/94, gerando a seguinte curva de fluidez apresentada no Gráfico 2, relacionando os teores de umidade obtidos no ensaio com o número de golpes aplicados no aparelho Casagrande.



Fonte: O autor (2019)

Sendo assim, para auxiliar na obtenção do resultado, foi utilizado a ferramenta de linha de tendência logarítmica do programa Excel, a qual gera a equação (16), pela qual pode-se substituir o número de golpes igual a 25, determinando-se o teor de umidade correspondente.

$$y = -1,086 \ln(x) + 19,496 \quad (16)$$

Visto que a norma DNIT 141/2010 exige que o limite de liquidez do solo seja menor ou igual a 25%, o material analisado atende a essa especificação, já que o teor de umidade obtido é de 16,02%.

4.1.2.2 Limite de Plasticidade

Como o solo utilizado no estudo possui característica arenosa, não foi possível realizar o ensaio de limite de plasticidade, já que o material se desagregava ao ser manipulado

antes de tomar a forma do cilindro com 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, estabelecidos pela norma DNER 082/94. Logo, o solo é definido como não plástico (NP).

4.1.2.3 Índice de plasticidade

A norma DNER 082/94 retrata que, quando não for possível determinar o limite de liquidez ou o limite de plasticidade de um solo, o índice de plasticidade é considerado como não plástico (NP), como é o caso do solo em estudo.

Sendo assim, a Tabela 7 a seguir mostra o resumo de resultados para a determinação dos limites de consistência do solo.

Tabela 7 - Resumo dos limites de consistência do solo

Material	LL (%)	LP (%)	IP
SAFL	16,02	NP	NP

Fonte: O autor (2019)

4.1.3 Equivalente de areia

Para o ensaio de equivalente de areia, realizado com auxílio da norma DNER 054/97, foi obtido um valor de 21,6 cm para a altura do topo de argila e, para o topo de areia, após a inserção da haste metálica, foi obtido uma leitura de 5,6 cm. Com isso, realizando-se os cálculos, obtém-se um EA igual a 25,92%.

4.1.4 Classificação MCT

Na Tabela 8, pode-se encontrar os valores correspondentes ao coeficiente angular c' , determinado no ensaio de compactação Mini-MCV, o coeficiente de inclinação d' , determinado também pelo ensaio de compactação Mini-MCV, o coeficiente e' , determinado através da perda de massa por imersão, a qual também consta na tabela.

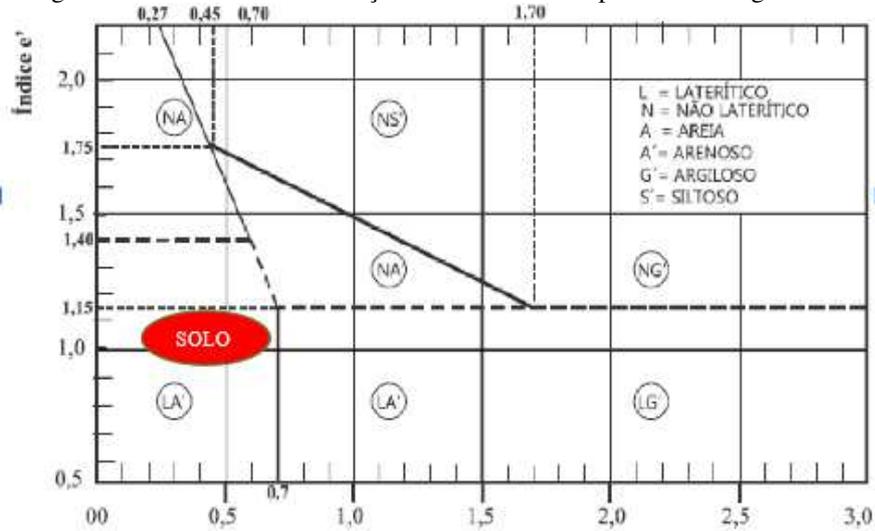
Tabela 8 - Resumo de coeficientes para classificação MCT

Material	Coeficiente c'	Coeficiente d'	Coeficiente e'	Pi (%)	Classificação MCT
Solo virgem	0,21	251,17	1,34	231,44	LA

Fonte: O autor (2019)

Com a obtenção dos valores dos coeficientes, pode-se utilizar o ábaco da classificação MCT, determinando o tipo de solo estudado, como mostrado na Figura 45.

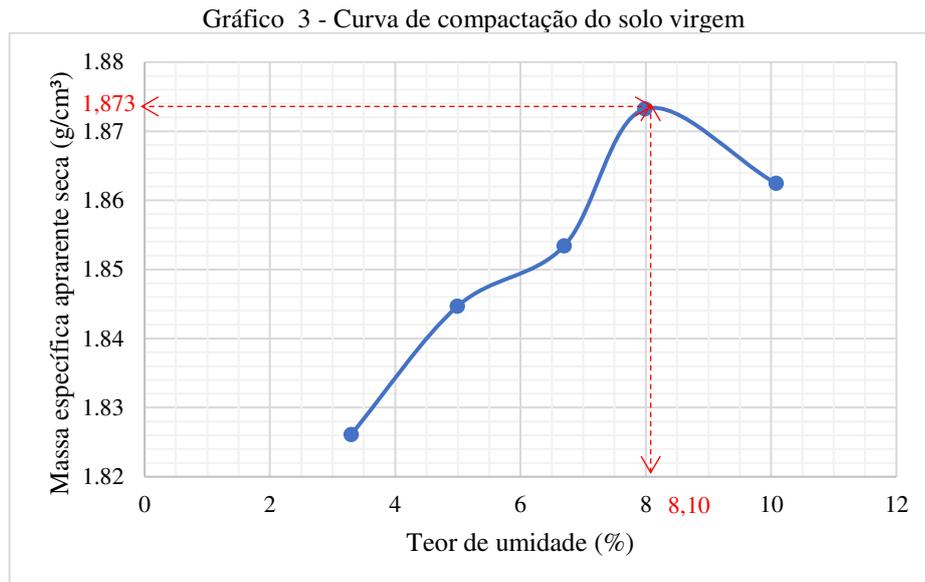
Figura 46 – Ábaco de classificação do solo laterítico pela metodologia MCT



Como visto, o solo determinado através do ábaco foi o LA (areia laterítica), o qual é bastante maduro e estável nas condições tropicais, sendo pouco ou não expansível e de grande utilidade na pavimentação, por essas propriedades, podendo ser utilizado em camadas de subleito, reforço e até em sub-bases e bases, dependendo do projeto (BALBO, 2007).

4.1.5 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação do solo virgem, utilizando amostras trabalhadas (DNER ME 162/94) com energia de compactação intermediária, totalizando 26 golpes entre camadas, gerou a curva de compactação representada pelo Gráfico 3, contendo a $MEAS_{máx}$ e o teor de umidade ótimo, os quais são os pontos de máximo da curva.



Como visto, o solo apresentou uma $MEAS_{m\acute{a}x}$ igual a $1,873 \text{ g/cm}^3$ para uma umidade ótima de $8,10\%$.

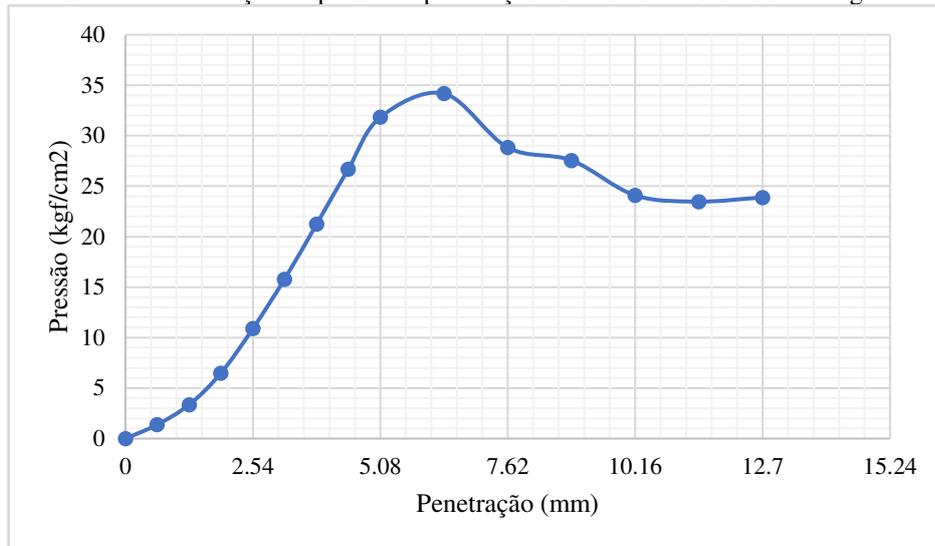
4.1.6 Índice de Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia do solo virgem, determinado com auxílio da norma DNER ME 049/94, apresentou uma porcentagem de 30% , utilizando-se a energia intermediária (26 golpes por camada) no teor de umidade ótimo de $8,10\%$.

A partir desse dado do ensaio de ISC, pode-se verificar que, é viável a utilização do solo virgem em camadas de reforço e sub-base de pavimentos, já que estas camadas exigem um ISC mínimo de 20% .

O Gráfico 4 a seguir mostra a relação entre a pressão exercida sobre o corpo de prova ensaiado e a penetração do pistão no mesmo corpo de prova.

Gráfico 4 - Relação da pressão e penetração do ensaio de ISC do solo virgem



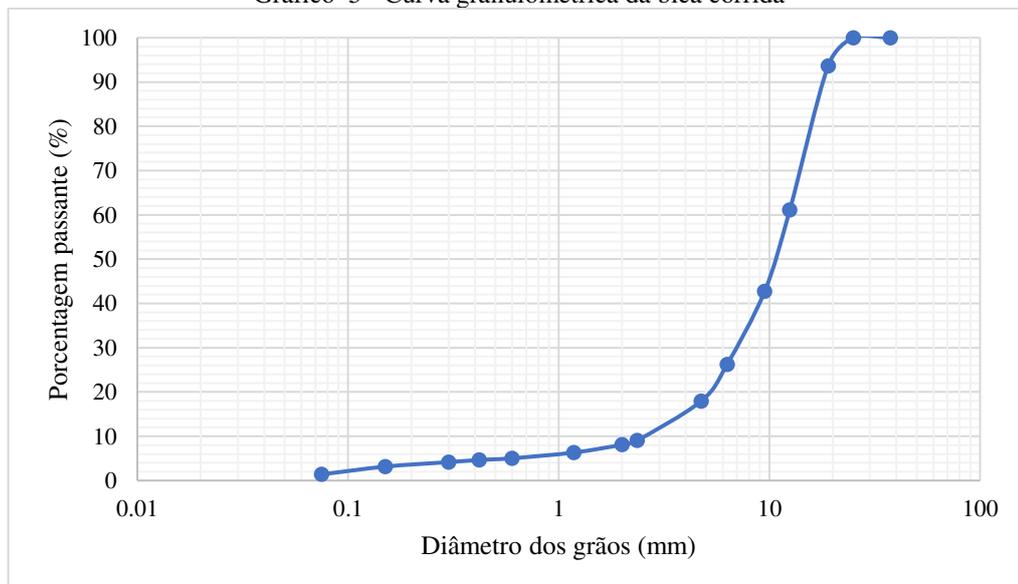
Fonte: O autor (2019)

4.2 Resultados dos ensaios de caracterização do agregado

4.2.1 Análise granulométrica

A partir da análise granulométrica da bica corrida, realizada pela norma DNER 083/98, foi possível obter a curva granulométrica demonstrada no Gráfico 5 a seguir.

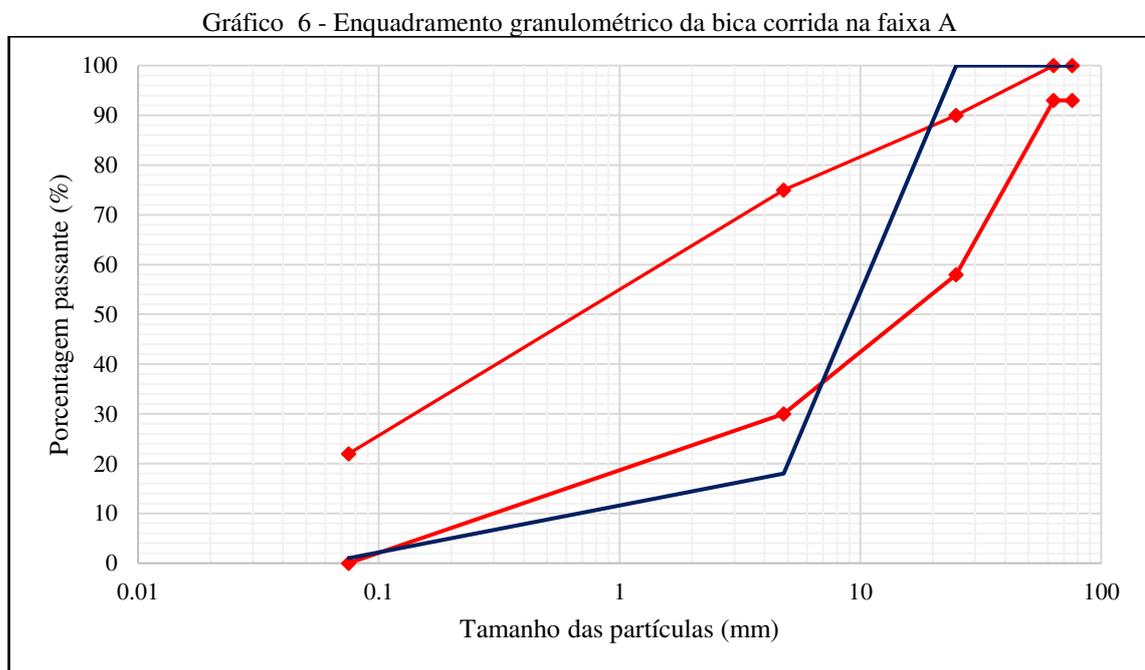
Gráfico 5 - Curva granulométrica da bica corrida



Fonte: O autor (2019)

Pode-se notar que a curva granulométrica da bica corrida se aproxima de uma curva de graduação aberta, apresentando-se então uma distribuição contínua de grãos com insuficiência de finos.

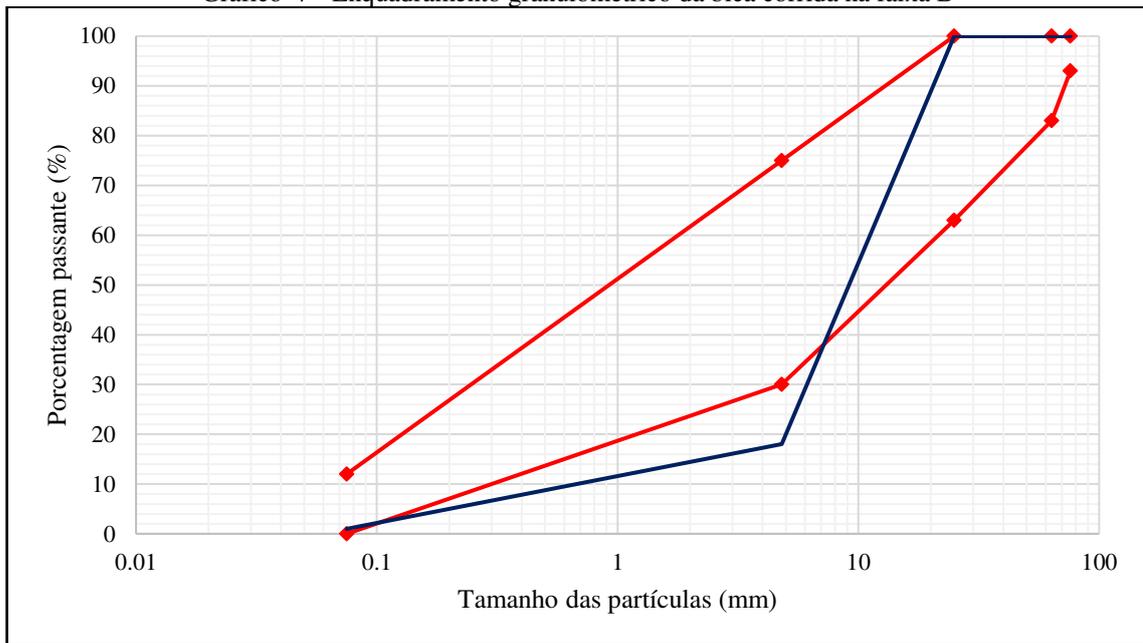
Com os dados da granulometria do agregado, é necessário fazer o enquadramento granulométrico junto a norma DER SP P00/041 – ET, pois é necessário saber se a amostra de bica corrida pode ser utilizada sem a adição do solo laterítico. Sendo assim, o Gráfico 6 a seguir demonstra o enquadramento granulométrico da bica corrida baseado na faixa A da norma.



Fonte: O autor (2019)

O Gráfico 7 a seguir, demonstra o enquadramento granulométrico da bica corrida na faixa B da norma DER P00/041 – ET.

Gráfico 7 - Enquadramento granulométrico da bica corrida na faixa B



Fonte: O autor (2019)

Os gráficos acima apresentados mostram que o agregado necessita de uma certa quantidade de material fino para que possa ser compactado individualmente. Porém, foram realizados os ensaios de compactação e CBR para a bica corrida, para conhecer a viabilidade do uso individual desse material. Apesar disso, o agregado possui todas as condições para ser trabalhado nas misturas granulométricas.

4.2.2 Ensaio de índice de forma

Para o ensaio de índice de forma, determinou-se o formato das partículas de agregado calculando-se a média das respectivas razões b/a e c/b , gerando os parâmetros para serem analisados pela norma regulamentadora do ensaio. Sendo assim, a Tabela 9 mostra esses valores e a classificação obtida para a bica corrida

Tabela 9 - Média das relações e classificação de forma do agregado

Média b/a	0,67	Cúbica
Média c/b	0,57	

Fonte: O autor (2019)

Como a média, tanto da porção b/a quanto da porção c/b , foram maiores que 0,5, a norma classifica o agregado com a forma cúbica.

4.2.3 Equivalente de areia

Para o ensaio de equivalente do agregado, realizado com auxílio da norma DNER 054/97, foi obtido um valor de 11,31 cm para a altura do topo de argila e, para o topo de areia, após a inserção da haste metálica, foi obtido uma leitura de 18,35 cm. Com isso, realizando-se os cálculos, obtém-se um EA igual a 61,63%, o que está de acordo com a norma DER SP P 00/041, a qual especifica uma porcentagem mínima de 55% para o ensaio.

4.2.4 Ensaio de Densidade e Absorção

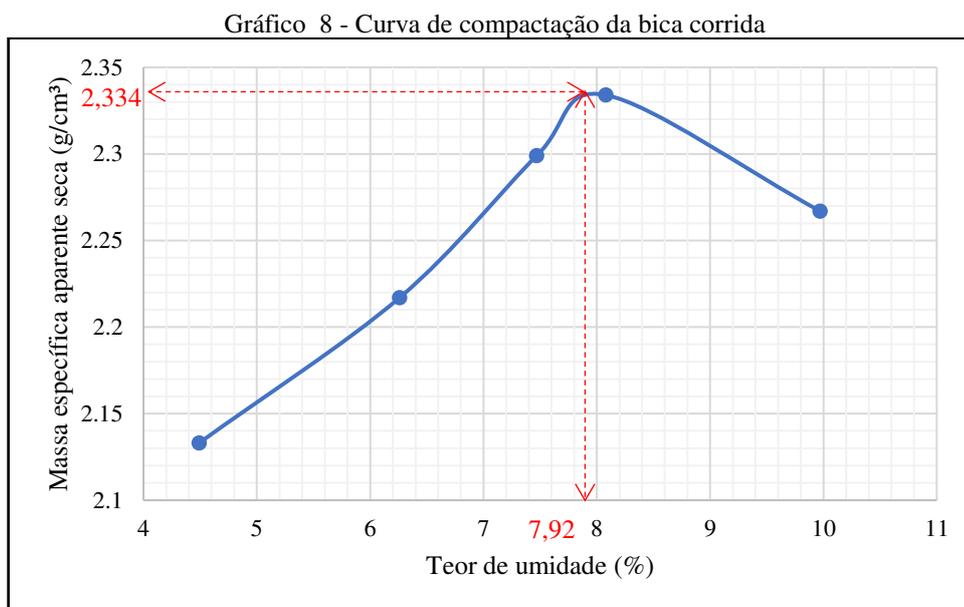
Com a realização do ensaio de densidade e absorção foi possível saber o comportamento do agregado em relação a presença de água. Com essas medidas, é possível saber o quanto de água o material absorve, para assim dosar de uma melhor forma a umidade para uma possível compactação, garantindo as características mecânicas previstas em projeto. Então, verificou-se que a absorção da bica corrida corresponde a 0,62%, valor considerado baixo e ideal para o agregado pétreo, já que a norma DNER ME 081/98 especifica um limite de absorção de 2%. Com relação a densidade aparente, realizado pelo método da balança hidrostática, determinou-se o valor de 1,54. Como o agregado apresentou mais que 2% de material passante na peneira de nº 4, foi necessário a aplicação do ensaio de densidade pelo frasco Chapman, o qual determinou uma massa específica de 2,778 g/cm³.

4.2.5 Ensaio de Abrasão Los Angeles

No ensaio de abrasão, foi possível determinar o percentual abrasivo do agregado quando submetido a sobrecarga referente a faixa granulométrica de trabalho. A bica corrida, quando submetida a 500 rotações do tambor da máquina de abrasão, juntamente com 6 esferas representando a carga, possui índice abrasivo de 29,11%, valor considerado satisfatório, uma vez que a norma DNER ME 035/94 exige um percentual de no máximo 55%.

4.2.6 Ensaio de compactação

A bica corrida compactada, quando ensaiada na energia intermediária, apresenta a curva de compactação apresentada no Gráfico 8, pela qual é possível observar a $MEAS_{máx}$ e a h_{ot} .



Fonte: O autor (2019)

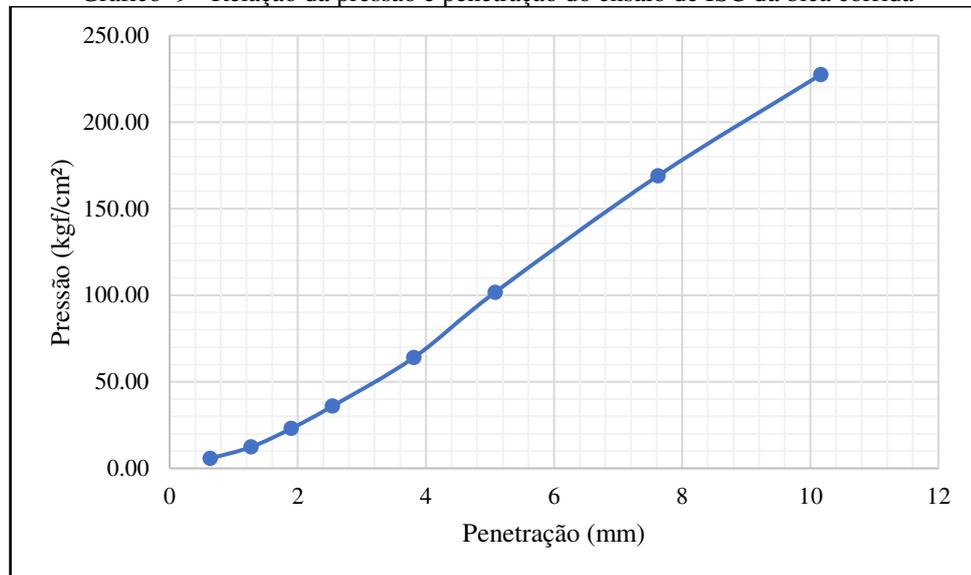
O agregado apresentou alta $MEAS_{máx}$ comparada com a do solo, já que a forma cúbica dos grãos proporciona o intertravamento dos mesmos e, os vazios quando são preenchidos pelas partículas finas, mesmo em déficit, formam uma estrutura sólida.

4.2.7 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

A bica corrida quando submetida ao referido ensaio, apresentou uma boa taxa de ISC, apesar do material não passar no enquadramento granulométrico. A seguir, é possível ver no Gráfico 9 a relação entre as penetrações em mm e as pressões correspondentes a essas penetrações.

Após os cálculos foi possível obter um ISC de 96,39%, o que é suficiente para utilizar o agregado sem a adição de solo em camadas de base de pavimentos, tanto para tráfego leve quanto para tráfego pesado. Com relação à expansão, o agregado sofreu uma taxa de 0,02%, o que é considerado bem baixo pela norma DER P00/041 – ET.

Gráfico 9 - Relação da pressão e penetração do ensaio de ISC da bica corrida



Fonte: O autor (2019)

4.3 Resultado dos ensaios das misturas para estabilização

Para o estudo das misturas granulométricas foram analisados diversos tipos proporções entre bica corrida e solo de modo a escolher duas misturas para base e duas misturas para sub-base. Através da Tabela 10 é possível observar todos os traços analisados pelo enquadramento proposto pela norma DNIT 141/2010.

Tabela 10 - Traços estudados pelo enquadramento granulométrico da norma DNIT 141/2010

Traços				
Mistura	Bica Corrida (%)	Solo (%)	Faixas	Camada
-	20	80	-	Sub-base
A	30	70	-	Sub-base
-	40	60	-	Sub-base
B	50	50	-	Sub-base
-	60	40	-	Sub-base
-	70	30	C	Base
C	80	20	C	Base
-	85	15	AC	Base
D	90	10	A	Base
-	95	5	-	Sub-base

Fonte: O autor (2019)

4.3.1 Enquadramento granulométrico das misturas para camadas de base de pavimentos

Antes de realizar os ensaios de compactação e CBR, e de posse das análises granulométricas do solo e agregado, foi necessário realizar o enquadramento granulométrico, exigido pela norma DNIT 141/2010, das misturas para camadas de base, correspondente as misturas C e D, como classificados no tópico 3.4.

As misturas solo-agregado destinadas a sub-base e reforço, A e B, não necessitam de um enquadramento granulométrico específico exigidos pelas normas DNIT 139/2010 e DER/PR ES – P 07/05, respectivamente. Porém, as referidas normas exigem que as camadas de sub-base e reforço com essas misturas apresentem CBR mínimo de 20% ou 30%.

O resultado do enquadramento granulométrico da mistura C para camadas de base é dado pela Tabela 11 a seguir.

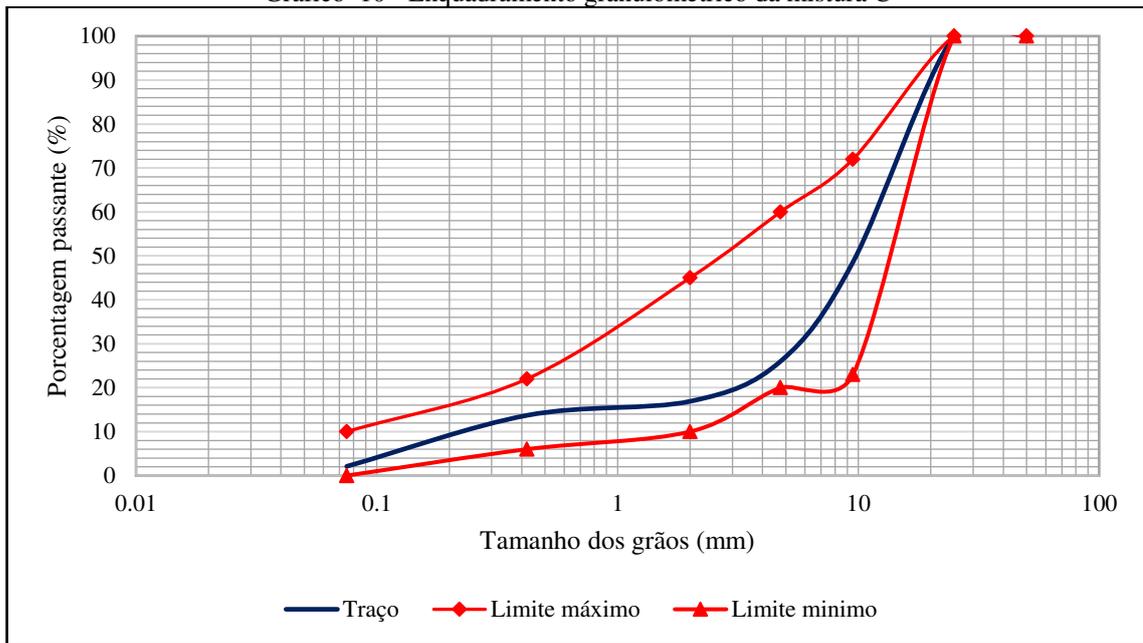
Tabela 11 - Enquadramento granulométrico da mistura C

Peneiras	% Passante do solo	% Passante da bica	Porcentagem de solo (20%)	Porcentagem de bica (80%)	% Passante da mistura	Especificação	Tolerância
50	100	100	20	80	100	100	± 7
25	100	100	20	80	100	100	± 7
9,5	99	43	19,8	34,4	54,2	50-85	± 7
4,75	98	18	19,6	14,4	34	35-65	± 5
2	97	8	19,4	6,4	25,8	25-50	± 5
0,42	92	5	18,4	4	22,4	15-30	± 2
0,075	12	1	2,4	0,8	3,2	5-15	± 2

Fonte: O autor (2019)

De uma forma mais clara, o enquadramento granulométrico da mistura C pode ser compreendido no Gráfico 10 a seguir:

Gráfico 10 - Enquadramento granulométrico da mistura C



Fonte: O autor (2019)

O cálculo do enquadramento da mistura D, também para camada de base, pode ser compreendido na Tabela 12.

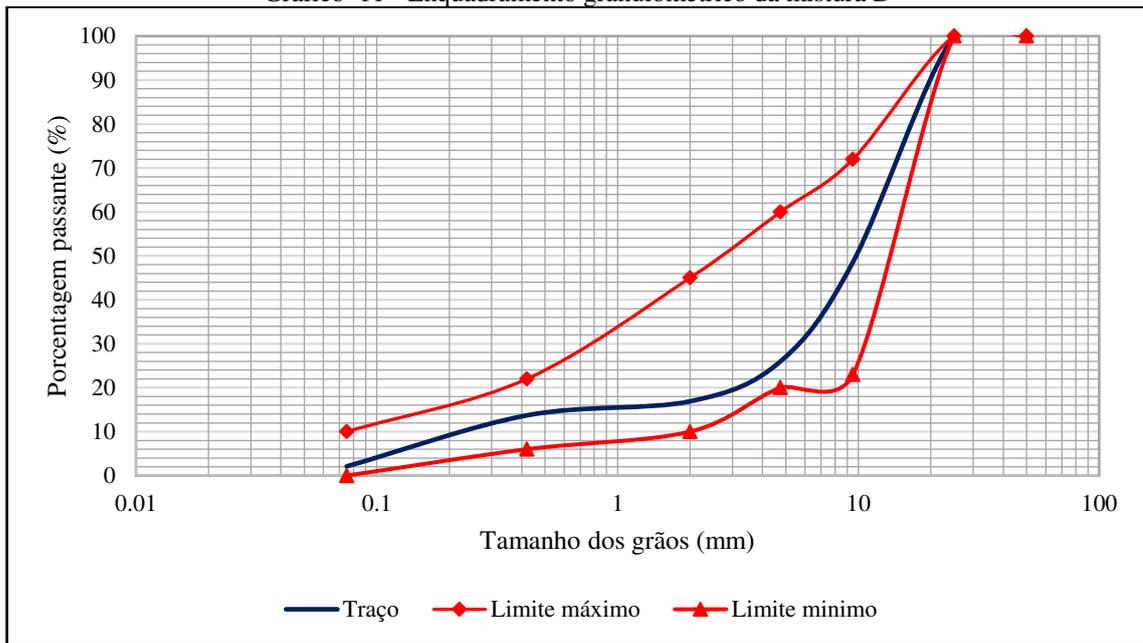
Tabela 12 - Enquadramento granulométrico da mistura D

Peneiras	% Passante do solo	% Passante da bica	Porcentagem de solo (20%)	Porcentagem de bica (80%)	% Passante da mistura	Especificação	Tolerância
50	100	100	10	90	100	100	± 7
25	100	100	10	90	100	100	± 7
9,5	99	43	9,9	38,7	48,6	50-85	± 7
4,75	98	18	9,8	16,2	26	35-65	± 5
2	97	8	9,7	7,2	16,9	25-50	± 5
0,42	92	5	9,2	4,5	13,7	15-30	± 2
0,075	12	1	1,2	0,9	2,1	5-15	± 2

Fonte: O autor (2019)

Assim como na mistura C, pode-se visualizar de uma melhor maneira o enquadramento granulométrico da mistura D através do Gráfico 11.

Gráfico 11 - Enquadramento granulométrico da mistura D

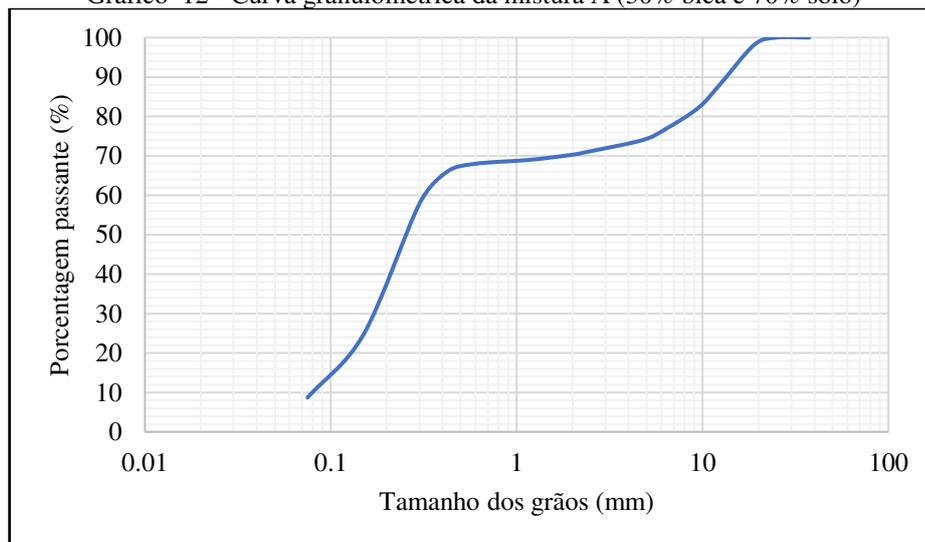


Fonte: O autor (2019)

4.3.2 Análise granulométrica das misturas para camadas de sub-base e reforço de pavimentos

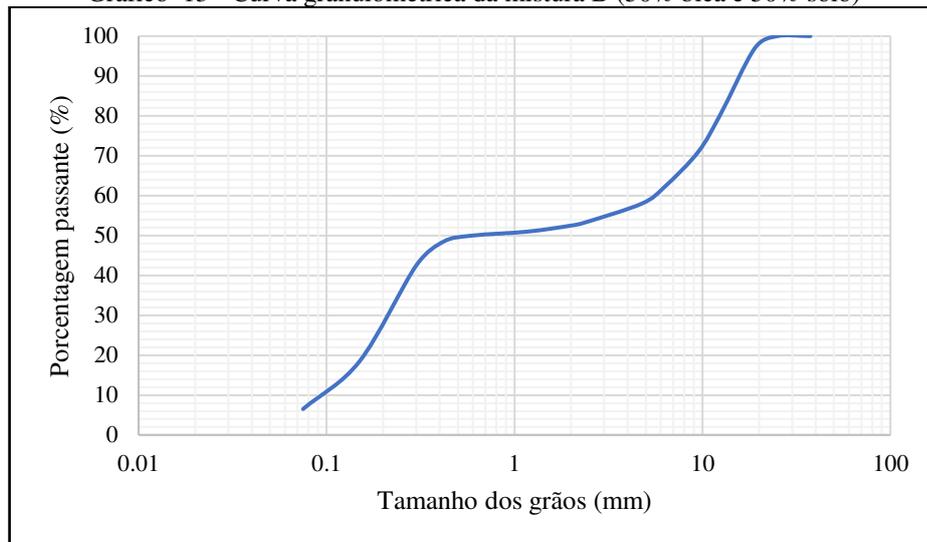
As granulometrias das misturas para camadas de reforço de subleito e sub-base podem ser vistas nos Gráficos 12 e 13.

Gráfico 12 - Curva granulométrica da mistura A (30% bica e 70% solo)



Fonte: O autor (2019)

Gráfico 13 - Curva granulométrica da mistura B (50% bica e 50% solo)



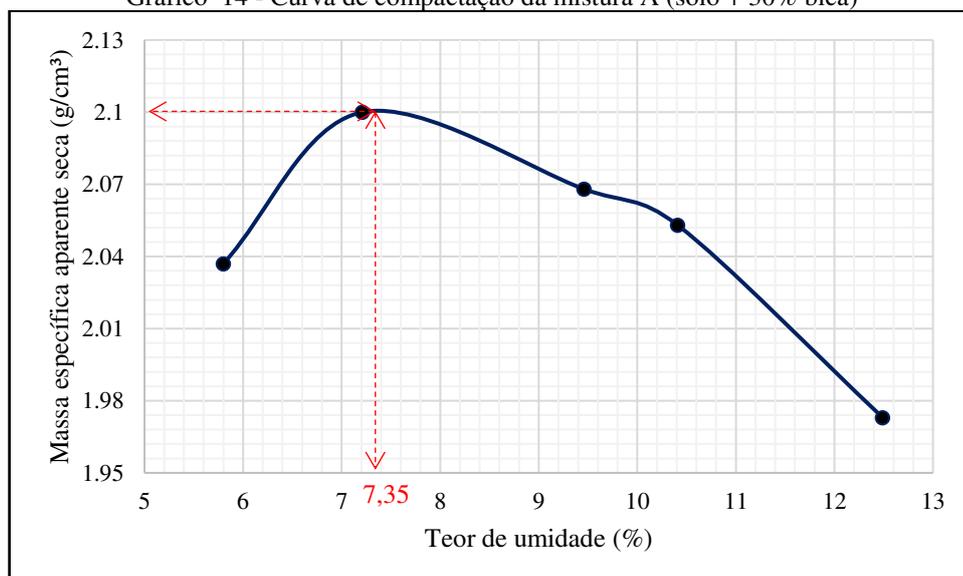
Fonte: O autor (2019)

É possível notar que as curvas granulométricas das misturas A e B são de graduação descontínua, já que apresentam um patamar devido a elevada quantidade de solo na mistura.

4.3.3 Ensaios de compactação

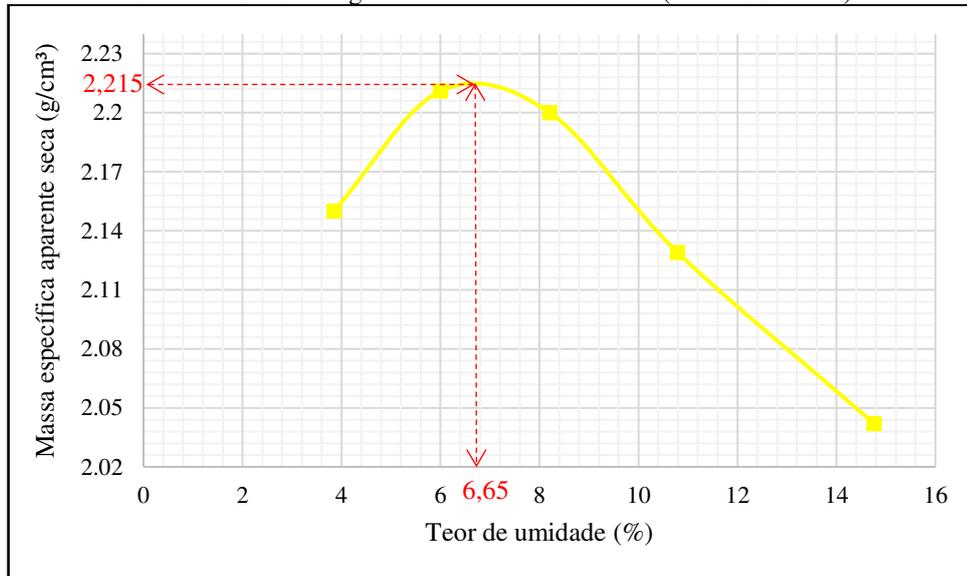
Através do ensaio de compactação, com o qual foi possível obter as seguintes curvas das misturas granulométricas A, B, C e D, que demonstram as $MEAS_{máx}$ e as umidades ótimas, na sequência de Gráficos de 14 a 17.

Gráfico 14 - Curva de compactação da mistura A (solo + 30% bica)



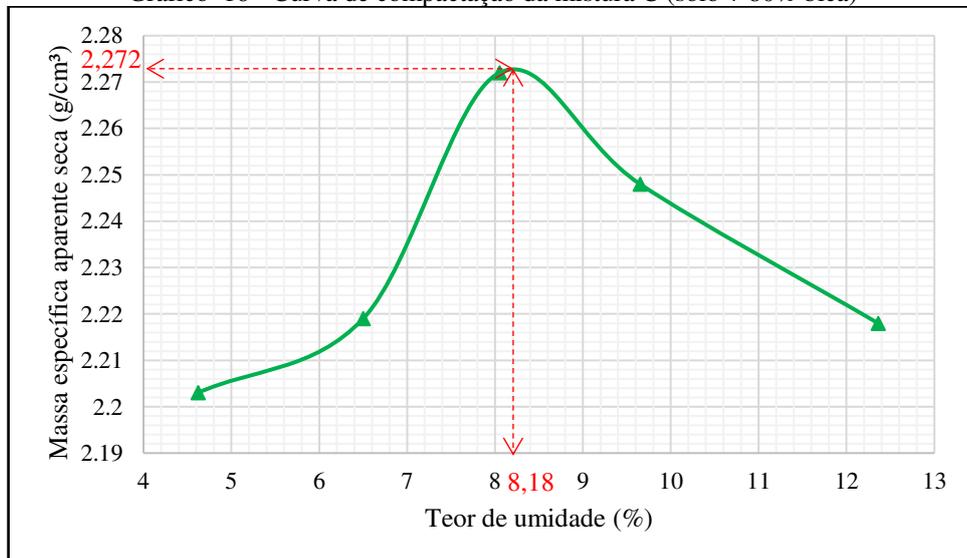
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 15 - Curva granulométrica na mistura B (solo + 50% bica)



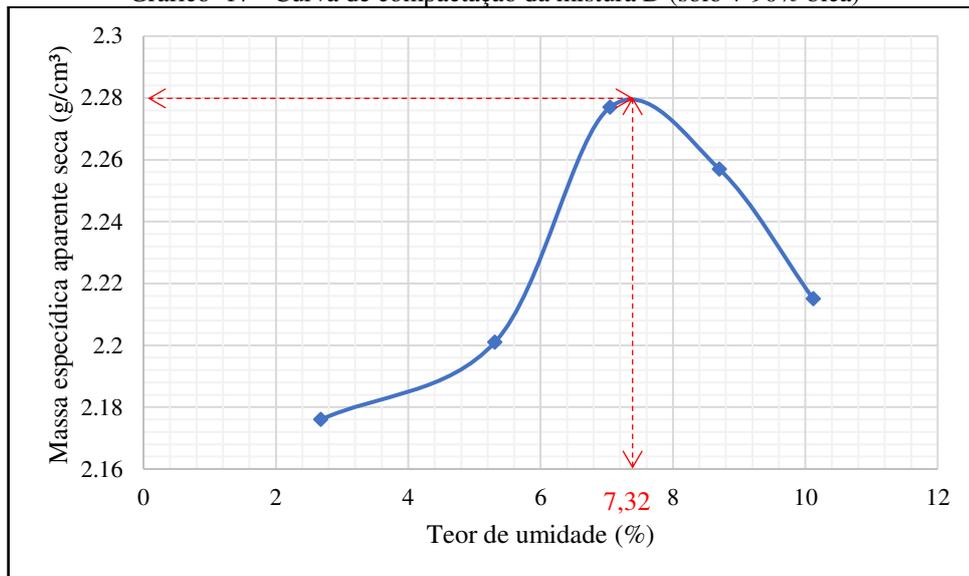
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 16 - Curva de compactação da mistura C (solo + 80% bica)



Fonte: O autor (2019)

Gráfico 17 - Curva de compactação da mistura D (solo + 90% bica)



Fonte: O autor (2019)

A seguir, é apresentado na Tabela 13, a relação de umidades ótimas e massas específicas aparentes secas máximas das misturas.

Tabela 13 - Resumo de $MEAS_{máx}$ e h_{ot}

	$MEAS_{máx}$ (g/cm³)	h_{ot} (%)
Mistura A (30% bica)	2,100	7,35
Mistura B (50% bica)	2,215	6,63
Mistura C (80% bica)	2,272	8,18
Mistura D (90% bica)	2,280	7,32

Fonte: O autor (2019)

É possível notar que, quanto maior a porcentagem de agregados na mistura maior é a $MEAS_{máx}$, uma vez que a porcentagem de finos vai se enquadrando de melhor forma. A mistura A, por exemplo, apresenta maior quantidade de solo em relação ao agregado e se enquadra no caso (c) dos tipos de solo-agregado apresentado no item 2.6 e, por esse motivo, apresenta menor densidade, comparado a mistura D, a qual se enquadra no tipo (b) de solo-agregado, e possui a maior densidade das misturas, já que possui a maior quantidade de agregado misturado com a quantidade de finos correta.

A mistura B ainda se enquadra no tipo (c) dos tipos de solo agregado, porém apresentam maior densidade em relação a mistura A pelo fato de ter 20% a mais de agregado em relação à mistura citada. Por fim, a mistura C por ter passado pelo enquadramento granulométrico pode ser considerada como do tipo (b) de solo-agregado.

4.3.4 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia das misturas para estabilização foram determinados pela norma DNER ME 049/98, assim como os ensaios de ISC do solo virgem e da bica corrida, deixando os corpos de prova submersos por 4 dias consecutivos para determinação da expansão para a posterior aplicação de carga do pistão na máquina CBR-MARSHALL.

Para a determinação precisa da quantidade de água para atingir a umidade ótima do ensaio de compactação, foi utilizado o método computacional através do Excel, traçando-se um gráfico relacionando as umidades e a quantidade de água para cada ponto de compactação. Assim, foi aplicada uma linha de tendência, a qual fornece uma equação pela qual se obtém a quantidade de água para o ensaio de ISC. A Tabela 14 a seguir, mostra as misturas usadas na estabilização e as respectivas quantidades de água necessárias para atingir o teor ótimo de umidade.

Tabela 14 - Quantidade de água em ml para obtenção de umidade ótima

Misturas	Quantidade de água (ml)
Mistura A (30% bica)	276
Mistura B (50% bica)	313
Mistura C (80% bica)	402
Mistura D (90% bica)	462

Fonte: O autor (2019)

Com o ensaio de CBR foi possível obter os seguintes percentuais de ISC para as misturas de estabilização, os quais são vistos na Tabela 15, juntamente com os ISC do solo e agregado a fim de compará-los.

Tabela 15 - Resumo de Índice de Suporte Califórnia

	ISC (%)
Solo	30
Mistura A (30% bica)	27,34
Mistura B (50% bica)	38,3
Mistura C (80% bica)	106,92
Mistura D (90% bica)	74,61
Bica corrida	96,39

Fonte: O autor (2019)

4.4 Análises e comentários dos resultados obtidos

De forma a complementar a pesquisa, foi necessário comparar os resultados obtidos a partir da estabilização de solos com a utilização de bica corrida. Sendo assim, por falta de disponibilidade de estudos de estabilização granulométrica com o mesmo tipo de agregado, foi necessário comparar com um estudo de estabilização nos mesmos moldes da presente pesquisa, mas com a utilização de brita de Silva (2018).

A pesquisa de Silva (2018) contemplou os estudos do mesmo tipo de solo estudado neste trabalho, sendo assim, o SAFL em questão apresentou propriedades semelhantes quanto a granulometria, limites de Atterberg, classificação MCT, compactação e ISC.

Com relação a comparação das características dos agregados, mas especificamente a análise granulométrica a brita 1, utilizada no estudo comparativo, apresenta uma curva granulométrica semelhante a graduação uniforme, possuindo grãos que contemplam uma pequena faixa de tamanhos, enquanto a curva granulométrica da bica corrida se aproxima da graduação aberta, a qual possui uma distribuição granulométrica contínua, porém com insuficiência de finos, como visto no item 3.3.1. A diferença entre as curvas granulométricas desses dois agregados se dá pelo simples fato de que a brita passa pelo processo de seleção por peneiramento durante a britagem, enquanto a bica corrida é apenas estocada sem o critério do peneiramento.

A respeito do índice de abrasão determinado pelo ensaio de abrasão Los Angeles, a bica corrida apresentou uma porcentagem um pouco maior comparado a brita 1, com 29,11% de porcentagem abrasiva, enquanto a brita apresentou uma taxa de 14,23%. Apesar da diferença

dos dois atendem as especificações da norma regulamentadora DNER ME 035/98. Com relação a densidade e absorção os dois agregados se comportam de maneira parecida, sendo que a brita 1 apresenta uma densidade aparente de 1,547, enquanto a bica corrida possui densidade aparente de 1,540, diferindo um pouco somente na absorção uma vez que a brita 1 possui uma porcentagem de 0,40% de absorção de água e a bica corrida 0,62%.

Com relação a forma dos agregados, ambos possuem a forma cúbica, a qual é fundamental para pavimentação. A principal diferença entre os dois materiais pétreos é a composição granulométrica, a qual propicia à bica corrida materiais finos suficientes, mesmo que não enquadrando na norma DER P00/041 – ET, para ser compactada sem a adição de solo.

Com relação as misturas granulométricas, Silva (2018) estudou três proporções diferentes para estabilização sendo uma mistura A (70% solo e 30% brita), uma mistura B (50% solo e 50% brita) e uma mistura C (30% solo e 70% brita). A título de comparação com a presente pesquisa, só é possível realizar a checagem em relação as misturas A e B, correspondentes as mesmas proporções de solo e agregado. A Tabela 16, mostra as misturas e as referidas características obtidas através dos ensaios de compactação e ISC.

Tabela 16 - Relação entre misturas de bica corrida e brita com mesma proporção de agregados

	Mistura A (30% brita)	Mistura A (30% bica)	Mistura B (50% brita)	Mistura B (50% bica)
MEAS _{máx} (g/cm ³)	2,066	2,100	2,206	2,215
h _{ot} (%)	8,50	7,35	5,50	6,63
ISC (%)	84,0	27,4	103,0	38,3

Fonte: O autor (2019)

Com os dados da Tabela 16, é possível notar que as misturas com bica corrida se apresentam ligeiramente mais densas que as misturas com brita, pelo fato de o agregado possuir uma melhor distribuição do tamanho dos grãos em relação a brita. Com relação ao ISC as misturas solo-brita apresentaram índices superiores aos das misturas solo-bica. Sendo assim, as misturas A e B de solo-brita podem ser utilizadas em camadas de base, enquanto as misturas A e B de solo-bica servem somente para camadas de sub-base e reforço de subleito.

5 CONCLUSÕES

Com a realização da pesquisa foi possível estudar as características do solo arenoso fino laterítico (SAFL) coletado na região da Via Expressa, em São Luís do Maranhão, averiguando que esse material pode ser empregado em camadas de reforço de subleito e sub-base de camadas de pavimentos, por apresentar baixa expansibilidade, quando submetidos a saturação, e Índice de Suporte Califórnia satisfatório.

Foi possível também estudar e definir o comportamento do agregado bica corrida, fornecido pela empresa Granorte, chegando-se à conclusão que é um material que pode ser trabalhado tanto em misturas, quando individualmente, em camadas de pavimentos, principalmente em camadas de base para tráfego leve ou pesado, uma vez que seu CBR de 96,39% sugere sua utilização, tornando-se uma alternativa de substituição do solo laterítico.

Aproveitando as boas características individuais dos materiais e levando em consideração o custo do agregado, aplicou-se a metodologia de estabilização granulométrica mecânica por compactação e fazendo-se as devidas correções granulométricas, estudou-se as misturas A (30% de bica), B (50% de bica), C (80% de bica) e D (90% de bica). A mistura A, apesar de contemplar o CBR mínimo de 20% para camadas de sub-base e reforço de subleito, se torna inviável economicamente para aplicação em campo, já que o solo estudado apresenta suporte 2,66% maior, não havendo a necessidade da utilização do agregado. Por outro lado, a mistura B apresentou vantagem de suporte de 8,38% em relação ao solo puramente estudado, o que torna a mistura totalmente aplicável em camadas de sub-base ou reforço, dependendo da solicitação.

A mistura C, por sua vez, apresentou o maior desempenho com relação a capacidade de suporte, com um CBR de 106,92%, satisfazendo com folga os limites estabelecidos pela norma DNIT 141/2010 para tráfego pesado em camadas de base. A mistura D, assim como a mistura C, satisfaz as condições da referida norma, para tráfego leve.

Sendo assim, como sugestões para trabalhos futuros e um melhor entendimento do comportamento das misturas granulométricas com a utilização de bica corrida, é necessário que haja estudos com diferentes tipos de solo da região de São Luís do Maranhão, a fim de conhecer e classificar as misturas de acordo com as normas vigentes, estabelecendo parâmetros entre as novas misturas para ofertar melhores opções de materiais para pavimentação. Além disso é importante realizar novos ensaios como o de Modulo de Resiliência para as misturas, o qual proporciona simular as condições reais de carregamento impostas pelo tráfego de veículos e de

índice de degradação, para conhecer o comportamento do agregado quando submetido ao impacto proporcionado pela compactação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **Agregado graúdo-Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6954: **Lastro padrão – Determinação da forma do material**. 1989.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAPTISTA, C. F. N. **Pavimentação**. Porto Alegre, Globo, 1979.

BERNUCCI, L. B et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BORRÉ, Gracielli. **Estudo de Misturas de Solo-Agregado para Uso em Bases e Sub-bases de Pavimentos Econômicos**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí – RS, 2013.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial – Brasília**: CNT: SEST: SENAT, 2017. 403p.

CRISTELO, N.M.C., **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/150>>. Acesso em 29 mai. 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução de AllTasks. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER/PR ES-P 07/05: **Pavimentação: Camadas estabilizadas granulometricamente – Especificação de serviço**. Curitiba, Paraná, 2005. 16p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. DER/SP P00/41 – ET: **Sub-base ou base de bica corrida – Especificação técnica**. São Paulo, 2005. 19p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1998, 8p.

_____. DNER-ME 041/94: **Solos – preparação de amostras para ensaio de caracterização – Método de ensaio**. 1994, 4p.

_____. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia – Método de ensaio**. 1997, 10p.

_____. DNER-ME 080/94: **Solos – análise granulométrica por peneiramento – Método de ensaio**. 1994, 4p.

_____. DNER-ME 081/98: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

_____. DNER-ME 082/94: **Solos – determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio**. 1994, 3p.

_____. DNER-ME 083/98: **Agregados – análise granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1998, 5p.

_____. DNER-PRO 120/97: **Coleta de amostras de agregados**. [S.l.], 1997, 5 p.

_____. DNER-ME 122/94: **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito – Método de ensaio**. 1994, 7p.

_____. DNER-ME 194/98: **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – Método de ensaio**. 1998, 4p.

_____. DNER-PRO 199/96: **Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório – Procedimento**. 1996, 5p.

_____. DNER-ME 256/94: **Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão – Método de ensaio.** 1994, 7p.

_____. DNER-ME 258/94: **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV – Método de ensaio.** 1994, 16p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 139/2010 - ES: **Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro: IPR, 2010. 7p.

_____. DNIT 141/2010 - ES: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro: IPR, 2010. 9p.

_____. DNIT 162/1007 - ME: **Solos – Compactação utilizando amostras trabalhadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: IPR, 1997. 7p.

_____. DNIT 172/2016 - ME: **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: IPR, 2016. 17p.

MEDINA, J.; MOTTA. L.M.G. **Mecânica dos pavimentos.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 240p.

VILLIBOR, D. F; et al. **A importância dos solos lateríticos em pavimentação.** In: 7ª Reunião de Pavimentação Urbana. São Paulo, SP, 1996.

SENÇO, Wlastermiler de. 1929. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1.** 2ª ed. ampliada. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, A.K.G. **Estudo de estabilização de solo com brita para uso na pavimentação.** Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018.

SOARES, W. M. **Relatório Parcial: estudo de solos lateríticos fino para uso em pavimentação, a partir da metodologia MCT.** Programa de bolsas de iniciação científica FAPEMA. Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, MA. 2018.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A – ÍNDICE DE FORMA

Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
1	28,70	14,83	10,08	0,52	0,68	51	27,13	16,69	11,80	0,62	0,71
2	32,55	25,04	6,04	0,77	0,24	52	25,87	18,47	9,43	0,71	0,51
3	37,16	11,76	9,90	0,32	0,84	53	26,45	13,56	12,86	0,51	0,95
4	28,83	16,06	14,21	0,56	0,88	54	25,98	20,91	17,75	0,80	0,85
5	33,71	20,47	17,30	0,61	0,85	55	29,97	21,15	4,89	0,71	0,23
6	26,31	19,12	8,22	0,73	0,43	56	22,14	18,80	14,23	0,85	0,76
7	36,29	22,48	7,97	0,62	0,35	57	25,57	20,77	9,44	0,81	0,45
8	296,48	21,93	8,40	0,07	0,38	58	26,31	19,99	10,02	0,76	0,50
9	28,17	15,91	10,95	0,56	0,69	59	26,21	21,37	9,56	0,82	0,45
10	27,15	16,80	14,64	0,62	0,87	60	28,90	18,07	12,27	0,63	0,68
11	37,44	20,47	15,99	0,55	0,78	61	31,12	24,44	7,88	0,79	0,32
12	39,61	20,27	8,57	0,51	0,42	62	24,04	19,04	8,34	0,79	0,44
13	33,10	21,79	13,59	0,66	0,62	63	21,71	18,20	8,22	0,84	0,45
14	27,37	21,63	12,88	0,79	0,60	64	25,90	14,78	13,02	0,57	0,88
15	22,75	21,04	14,09	0,92	0,67	65	28,17	22,69	5,36	0,81	0,24
16	26,36	15,68	12,61	0,59	0,80	66	20,30	12,77	10,68	0,63	0,84
17	40,10	14,37	9,17	0,36	0,64	67	21,83	14,58	10,87	0,67	0,75
18	30,09	19,25	10,61	0,64	0,55	68	26,06	19,63	9,56	0,75	0,49
19	26,61	19,32	13,31	0,73	0,69	69	21,50	19,83	7,81	0,92	0,39
20	37,81	14,65	10,54	0,39	0,72	70	26,02	16,27	4,80	0,63	0,30
21	36,36	20,05	12,94	0,55	0,65	71	25,42	13,78	5,57	0,54	0,40
22	32,96	17,89	10,68	0,54	0,60	72	33,05	12,38	7,99	0,37	0,65
23	30,86	15,72	5,80	0,51	0,37	73	24,73	10,60	8,71	0,43	0,82
24	28,38	15,91	10,60	0,56	0,67	74	22,13	13,72	4,13	0,62	0,30
25	26,03	15,89	13,69	0,61	0,86	75	27,03	15,77	5,14	0,58	0,33
26	23,66	18,02	8,33	0,76	0,46	76	17,29	12,50	5,95	0,72	0,48
27	24,55	17,60	13,15	0,72	0,75	77	19,23	14,05	5,99	0,73	0,43
28	34,87	19,16	8,02	0,55	0,42	78	16,68	15,41	7,13	0,92	0,46
29	31,76	19,91	12,01	0,63	0,60	79	16,61	13,87	12,41	0,84	0,89
30	24,29	23,82	8,05	0,98	0,34	80	15,27	11,76	7,39	0,77	0,63
31	25,70	22,75	9,14	0,89	0,40	81	20,29	13,96	5,77	0,69	0,41
32	23,91	18,27	10,43	0,76	0,57	82	17,41	13,70	5,89	0,79	0,43
33	27,41	13,55	11,87	0,49	0,88	83	27,42	13,23	7,76	0,48	0,59
34	24,52	15,61	12,39	0,64	0,79	84	21,20	13,29	6,04	0,63	0,45
35	30,51	18,68	6,01	0,61	0,32	85	18,60	13,32	5,68	0,72	0,43
36	32,28	19,94	16,12	0,62	0,81	86	19,34	13,73	4,75	0,71	0,35
37	32,12	12,58	9,33	0,39	0,74	87	17,22	13,54	6,09	0,79	0,45
38	23,55	15,65	14,60	0,66	0,93	88	21,62	16,17	5,43	0,75	0,34
39	25,66	17,91	13,23	0,70	0,74	89	17,43	13,06	5,99	0,75	0,46
40	26,78	20,30	11,58	0,76	0,57	90	18,07	13,59	7,19	0,75	0,53

41	28,14	21,58	8,40	0,77	0,39	91	23,81	12,90	8,14	0,54	0,63
Nº	a	b	c	b/a	c/b	Nº	a	b	c	b/a	c/b
42	19,84	17,64	10,05	0,89	0,57	92	16,98	14,97	3,28	0,88	0,22
43	37,12	16,33	12,31	0,44	0,75	93	21,31	12,52	5,04	0,59	0,40
44	46,11	17,83	6,34	0,39	0,36	94	21,97	11,81	9,22	0,54	0,78
45	33,15	21,20	7,20	0,64	0,34	95	21,75	9,41	8,68	0,43	0,92
46	32,14	19,20	13,80	0,60	0,72	96	17,03	12,10	5,76	0,71	0,48
47	31,01	17,16	11,24	0,55	0,66	97	15,83	11,78	10,07	0,74	0,85
48	28,12	19,68	12,67	0,70	0,64	98	23,42	13,81	6,15	0,59	0,45
49	26,99	24,26	9,84	0,90	0,41	99	16,23	12,42	7,16	0,77	0,58
50	29,41	16,87	10,26	0,57	0,61	100	16,13	11,66	11,20	0,72	0,96
101	12,54	10,53	6,68	0,84	0,63	151	19,66	12,60	7,44	0,64	0,59
102	15,36	13,22	10,75	0,86	0,81	152	23,27	16,24	5,34	0,70	0,33
103	20,84	13,99	4,58	0,67	0,33	153	17,80	10,73	7,85	0,60	0,73
104	23,14	12,82	6,52	0,55	0,51	154	22,45	13,92	8,48	0,62	0,61
105	20,82	14,90	4,34	0,72	0,29	155	14,11	11,24	9,01	0,80	0,80
106	27,65	13,24	6,45	0,48	0,49	156	20,62	12,61	9,85	0,61	0,78
107	18,60	15,37	4,88	0,83	0,32	157	23,91	12,29	5,88	0,51	0,48
108	19,24	12,84	5,98	0,67	0,47	158	19,55	13,48	10,81	0,69	0,80
109	18,86	13,38	5,35	0,71	0,40	159	27,43	13,76	6,93	0,50	0,50
110	19,95	14,74	5,66	0,74	0,38	160	21,27	13,77	5,62	0,65	0,41
111	17,67	12,54	5,66	0,71	0,45	161	19,52	11,71	11,45	0,60	0,98
112	18,09	12,95	8,01	0,72	0,62	162	20,64	12,69	7,99	0,61	0,63
113	21,39	11,50	8,25	0,54	0,72	163	21,63	13,88	3,90	0,64	0,28
114	22,21	12,93	4,98	0,58	0,39	164	20,02	12,59	8,48	0,63	0,67
115	14,80	11,11	5,04	0,75	0,45	165	17,25	15,99	4,28	0,93	0,27
116	23,21	15,76	6,12	0,68	0,39	166	18,41	13,23	4,55	0,72	0,34
117	18,41	11,97	9,20	0,65	0,77	167	20,60	10,92	5,74	0,53	0,53
118	16,16	15,14	6,31	0,94	0,42	168	22,75	10,15	6,39	0,45	0,63
119	16,29	12,77	6,21	0,78	0,49	169	17,03	12,58	6,18	0,74	0,49
120	19,74	11,53	4,98	0,58	0,43	170	14,85	12,61	5,73	0,85	0,45
121	23,24	10,78	4,78	0,46	0,44	171	20,87	13,09	7,40	0,63	0,57
122	16,21	10,80	9,96	0,67	0,92	172	18,27	14,71	8,23	0,81	0,56
123	19,37	13,38	6,58	0,69	0,49	173	17,07	12,28	6,60	0,72	0,54
124	20,34	12,74	11,37	0,63	0,89	174	18,87	17,36	7,42	0,92	0,43
125	19,16	11,99	10,34	0,63	0,86	175	17,89	11,10	10,38	0,62	0,94
126	26,14	11,28	10,73	0,43	0,95	176	17,40	12,78	4,32	0,73	0,34
127	19,37	13,44	4,62	0,69	0,34	177	19,47	13,02	7,17	0,67	0,55
128	17,78	12,09	6,03	0,68	0,50	178	18,19	13,46	5,63	0,74	0,42
129	19,07	13,36	5,08	0,70	0,38	179	21,73	16,41	5,48	0,76	0,33
130	17,68	14,37	4,34	0,81	0,30	180	18,74	12,80	10,47	0,68	0,82
131	19,15	16,94	4,05	0,88	0,24	181	17,24	12,07	6,49	0,70	0,54
132	18,78	14,60	4,13	0,78	0,28	182	18,98	15,52	8,23	0,82	0,53
133	15,86	11,20	6,25	0,71	0,56	183	18,42	14,62	2,68	0,79	0,18
134	22,12	10,27	8,30	0,46	0,81	184	18,01	14,42	4,01	0,80	0,28
135	21,36	12,20	11,52	0,57	0,94	185	17,79	14,17	6,49	0,80	0,46

136	17,13	10,60	10,30	0,62	0,97	186	18,21	16,55	4,37	0,91	0,26
N°	a	b	c	b/a	c/b	N°	a	b	c	b/a	c/b
137	19,54	14,35	5,32	0,73	0,37	187	17,91	13,67	10,00	0,76	0,73
138	16,24	10,82	7,87	0,67	0,73	188	17,50	14,51	6,89	0,83	0,47
139	16,64	13,02	7,66	0,78	0,59	189	16,34	15,45	4,57	0,95	0,30
140	20,34	11,71	9,01	0,58	0,77	190	16,09	12,30	7,21	0,76	0,59
141	23,31	11,75	9,06	0,50	0,77	191	15,20	11,57	9,40	0,76	0,81
142	20,69	11,82	3,31	0,57	0,28	192	16,20	11,23	6,40	0,69	0,57
143	14,94	11,80	6,50	0,79	0,55	193	18,54	12,99	8,25	0,70	0,64
144	17,72	12,60	6,71	0,71	0,53	194	15,07	13,67	7,07	0,91	0,52
145	28,75	11,90	8,60	0,41	0,72	195	15,74	10,71	6,78	0,68	0,63
146	22,86	11,92	6,10	0,52	0,51	196	13,71	11,88	10,38	0,87	0,87
147	19,71	13,65	6,85	0,69	0,50	197	15,55	12,88	5,38	0,83	0,42
148	20,63	11,25	8,62	0,55	0,77	198	15,55	12,00	4,25	0,77	0,35
149	24,79	11,74	11,45	0,47	0,98	199	16,36	12,79	6,03	0,78	0,47
150	22,59	14,00	7,01	0,62	0,50	200	15,22	11,82	8,06	0,78	0,68

APÊNDICE B – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Amostra: Bica corrida										
Proctor: Intermediário 26 golpes										
Peso da amostra (g): 7000										
Dados da Compactação										
Volume do Molde (cm ³)	2026,67		2026,67		2026,67		2026,67		2026,67	
Peso do Molde (g)	4277,2		4277,2		4277,2		4277,2		4277,2	
Peso do Molde + Solo (g)	8794,2		9051,5		9285,5		9391,2		9329,9	
Nº da Cápsula	08	10	25	39	41	43	44	45	42	81
Peso da Cápsula (g)	16,81	18,65	16,76	17,36	17,33	17,12	15,90	18,12	17,32	14,04
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	38,06	35,57	39,54	40,27	41,49	44,25	44,30	44,67	53,12	57,09
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	37,63	34,87	38,25	38,87	39,78	42,40	42,12	42,74	50,41	53,20
Umidade (%)	4,66	4,32	6,00	6,51	7,62	7,32	8,31	7,84	10,00	9,93
Umidade média (%)	4,49		6,26		7,47		8,08		9,97	
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,23		2,36		2,47		2,52		2,49	
Peso Esp. Aparente Sec. (g/cm ³)	2,133		2,217		2,299		2,334		2,267	

Amostra: Solo + 30% bica										
Proctor: Intermediário 26 golpes										
Peso da amostra (g): 7000										
Dados da Compactação										
Volume do Molde (cm ³)	2007,37		2007,37		2007,37		2007,37		2007,37	
Peso do Molde (g)	4272,1		4272,1		4272,1		4272,1		4272,1	
Peso do Molde + Solo (g)	8597,8		8791,6		8817,4		8823,5		8728,0	
Nº da Cápsula	34	41	43	45	47	57	122	279	03	25
Peso da Cápsula (g)	18,12	18,77	18,51	17,39	17,13	18,09	17,55	16,28	13,85	12,42
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	41,45	43,57	40,09	42,12	42,96	44,80	44,80	49,16	53,39	54,59
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	40,21	42,27	38,62	40,49	40,70	42,52	42,53	45,72	47,90	50,14
Umidade (%)	6,07	5,53	7,31	7,10	9,59	9,33	9,13	11,68	13,19	11,80
Umidade média (%)	5,80		7,21		9,46		10,41		12,49	
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,155		2,251		2,264		2,267		2,220	
Peso Esp. Aparente Sec. (g/cm ³)	2,037		2,100		2,068		2,053		1,973	

Amostra: Solo + 50% bica
Proctor: Intermediário 26 golpes
Peso da amostra (g): 7000

Dados da Compactação										
Volume do Molde (cm ³)	2007,37		2007,37		2007,37		2007,37		2007,37	
Peso do Molde (g)	4272,1		4272,1		4272,1		4272,1		4272,1	
Peso do Molde + Solo (g)	8754,2		8977,1		9051,2		9007,0		8977,3	
Nº da Cápsula	09	10	34	41	43	45	47	57	122	129
Peso da Cápsula (g)	18,12	18,77	18,51	17,39	17,13	18,09	17,55	16,28	13,85	12,42
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	37,40	38,79	42,89	41,29	43,60	44,35	48,61	47,33	57,15	53,89
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	36,55	38,19	41,46	39,98	41,64	42,31	45,52	44,37	51,64	48,50
Umidade (%)	4,61	3,09	6,21	5,80	8,00	8,42	11,05	10,54	14,58	14,94
Umidade média (%)	3,85		6,00		8,21		10,79		14,76	
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,233		2,344		2,381		2,359		2,344	
Peso Esp. Aparente Sec. (g/cm ³)	2,150		2,211		2,200		2,129		2,042	

Amostra: Solo + 80% bica
Proctor: Intermediário 26 golpes
Peso da amostra (g): 7000

Dados da Compactação										
Volume do Molde (cm ³)	2026,67		2026,67		2026,67		2026,67		2026,67	
Peso do Molde (g)	4280,0		4280,0		4280,0		4280,0		4280,0	
Peso do Molde + Solo (g)	8951,8		9069,1		9255,4		9276,7		9329,6	
Nº da Cápsula	03	08	09	10	12	41	42	47	44	81
Peso da Cápsula (g)	14,45	16,84	18,12	18,76	17,31	17,36	17,30	17,46	15,93	14,04
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	43,92	42,16	41,72	46,52	49,25	48,15	54,07	53,18	59,28	53,18
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	42,48	41,16	40,26	44,85	46,91	45,82	50,89	49,98	54,89	48,54
Umidade (%)	5,14	4,11	6,59	6,40	7,91	8,19	9,47	9,84	11,27	13,45
Umidade média (%)	4,62		6,50		8,05		9,65		12,36	
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,305		2,363		2,455		2,465		2,492	
Peso Esp. Aparente Sec. (g/cm ³)	2,203		2,219		2,272		2,248		2,218	

Amostra: Solo + 90% bica
Proctor: Intermediário 26 golpes
Peso da amostra (g): 7000

Dados da Compactação										
Volume do Molde (cm ³)	2026,67		2026,67		2026,67		2026,67		2026,67	
Peso do Molde (g)	4280,0		4280,0		4280,0		4280,0		4280,0	
Peso do Molde + Solo (g)	8808,4		8977,1		9218,4		9251,1		9222,2	
Nº da Cápsula	03	08	09	10	12	41	42	47	44	81
Peso da Cápsula (g)	14,45	16,84	18,12	18,76	17,31	17,36	17,30	17,46	15,93	14,04
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g)	48,15	48,58	44,70	38,96	37,33	37,05	44,74	43,34	48,32	42,32
Peso da Cápsula + Solo Seco (g)	47,20	47,82	43,27	38,01	35,74	36,03	42,49	41,32	45,38	39,69
Umidade (%)	2,90	2,45	5,69	4,92	8,63	5,46	8,93	8,47	9,98	10,25
Umidade média (%)	2,68		5,31		7,05		8,70		10,12	
Peso Específico Aparente (g/cm ³)	2,234		2,318		2,437		2,453		2,439	
Peso Esp. Aparente Sec. (g/cm ³)	2,176		2,201		2,277		2,257		2,215	