



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ERIKSON CARVALHO COSTA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO BAILEY E O MÉTODO  
CONVENCIONAL PARA SELEÇÃO DE AGREGADOS PARA MISTURAS  
ASFÁLTICAS DENSAS**

SÃO LUÍS – MA  
2017



**ERIKSON CARVALHO COSTA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO BAILEY E O MÉTODO  
CONVENCIONAL PARA SELEÇÃO DE AGREGADOS PARA MISTURAS  
ASFÁLTICAS DENSAS**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade Estadual do  
Maranhão como requisito necessário  
à obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.**

**Orientadora: Profa. Dra. Maria  
Teresinha de Medeiros Coelho**

**SÃO LUÍS – MA**

**2017**

Costa, Erikson Carvalho.

Estudo comparativo entre o método Bailey e o método convencional para seleção de agregados para misturas asfálticas densas / Erikson Carvalho Costa. – São Luís, 2017.

143 f.

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

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

1. Bailey. 2. Seleção de agregados. 3. Mistura asfáltica. I. Título.

CDU 625.85

**ERIKSON CARVALHO COSTA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO BAILEY E O MÉTODO  
CONVENCIONAL PARA SELEÇÃO DE AGREGADOS PARA MISTURAS  
ASFÁLTICAS DENSAS**

Monografia apresentada ao curso de  
Engenharia Civil da Universidade Estadual  
do Maranhão, para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

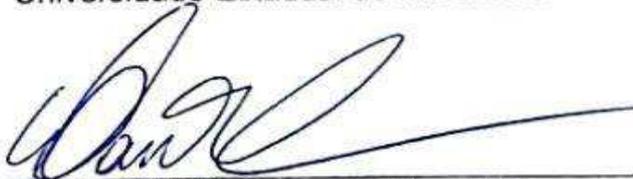
Aprovado em: 04/12/2017

**BANCA EXAMINADORA**



---

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



---

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



---

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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por tudo que já recebi nesta vida, em especial por ter me dado a possibilidade de alcançar meus objetivos de passar no vestibular, cursar Engenharia Civil na Universidade Estadual do Maranhão e, por fim, de me tornar um engenheiro civil.

À minha mãe, Cristina, por todo o amor, apoio e suporte durante todos esses anos, ainda mais nos momentos difíceis tanto da graduação quanto da minha vida. Às minhas madrinhas, Maria da Conceição e Maria José e à minha irmã Érika, pela ajuda diária e apoio em tudo que eu precisava no dia a dia, independente do horário que fosse. Ao meu pai, que mesmo distante, permaneceu perto, dando a ajuda necessária para eu me dedicar aos estudos. Aos meus avós, por tudo que já fizeram por mim ao longo da vida. A minha eterna namorada, e mulher da minha vida, Bianca Guedes, por todo tempo passado junto a mim, dando amor, suporte e sendo sempre paciente e carinhosa comigo. A todos vocês, minha eterna gratidão e todo o meu amor. O caminho teria sido mais árduo e talvez, impossível de ser trilhado, sem a ajuda de cada um.

Aos meus amigos de vida, que sempre estiveram comigo, e sei que posso contar para a vida, em especial a Erick Renato, Vitor Penha, Vitor Porto, Wellington Junior, Pedro Inácio, Luã Pestana, Gilberto Mendes e João Felipe, que foi para perto de Deus nesse meio tempo, mas estará sempre comigo no peito. Aos amigos que fiz durante a graduação, que também se tornaram irmãos, e guardarei sempre no peito, por toda a vida: André Luís, Tainam Ferreira, Victor Hugo, Gabriel Borges, Igor Brandão, Iderlan Alves, Victor Eduardo, Rennan Sales e Marco André, que me ajudou a entrar no mercado profissional da engenharia e, em especial, a Igor Vinicius, José Antonio, Thaís Letícia, Gabriel Cruz e George Augusto, por todos os momentos juntos nessa reta final no laboratório. Minha gratidão a todos vocês, amigos.

À minha orientadora, Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Teresinha de Medeiros Coelho pelo auxílio, disponibilidade e suporte na concepção deste trabalho. Ao laboratorista Sr. Teodoro, por toda ajuda nos ensaios laboratoriais.

A todos os outros que de alguma forma, contribuíram para minha formação e crescimento profissional, meu muito obrigado.

## RESUMO

O presente estudo tem por objetivo realizar a comparação volumétrica e mecânica de misturas asfálticas que tiveram seus agregados selecionados por dois métodos diferentes: uma pelo método tradicional, também chamado de método das tentativas, e a outra pelo Método Bailey, ambas concebidas na dosagem Marshall. Sabe-se da necessidade de se buscar, cada vez mais, alternativas que levem a misturas asfálticas mais resistentes. O Método Bailey é então proposto como alternativa na concepção de um revestimento asfáltico, já que busca o melhor intertravamento entre os agregados da mistura asfáltica, tornando-a mais capaz de suportar os esforços já citados. Para o início do trabalho, buscou-se levantar os conceitos e a teoria necessária para dar base ao estudo de misturas asfálticas e tudo que engloba esse tema. Em seguida, partiu-se para a realização da caracterização, através de procedimentos em laboratório, dos materiais constituintes das misturas asfálticas. Decidiu-se utilizar a faixa B do DNIT para definição da mistura pelo método das tentativas, já para a mistura Bailey, ficou decidido não enquadrar em nenhuma faixa do DNIT, a fim de resultar na mistura exata proposta pelo método. Os corpos de prova foram, então, moldados para diferentes teores de ligante, especificados de acordo com a faixa B do DNIT. Por fim, analisou-se os parâmetros volumétricos de cada mistura, para que fosse possível comparar os resultados das duas misturas e definir um teor ótimo de ligante asfáltico para cada uma. Moldados os corpos de prova para os teores ótimos encontrados, realizou-se os ensaios de Estabilidade e de Resistência à Tração por compressão diametral para comparação dos resultados nas duas misturas, ficando concluído que, apesar de ambas as misturas terem atingido o limite inferior de resistência, a mistura Bailey apresentou valores mais baixos do que a mistura tradicional, o que não era esperado.

Palavras-chave: Mistura asfáltica. Revestimento. Método Bailey. Seleção de agregados. Pavimentação. Dosagem Marshall.

## **ABSTRACT**

This research was made with the goal to compare the volumetric and mechanics parameters of hot asphalt mixes that were designed using the Bailey Method and the attempts method, both made with the Marshall dosage. It is known the necessity to seek alternatives that end on stronger hot asphalt mixes. The Bailey Method is considered an alternative on the design of pavements, because it tries to design the best aggregate package in hot mixes. In the opening of this research, the theoretical part was written, to base the following lab procedures. After that, it was time to do the lab procedures to characterize the aggregates used on this work. It was decided to use the B band of DNIT to choose the percentage of asphalt cement on the mix. In the last moment, an analyze of the volumetric and mechanical parameters was made to choose the best percentage of asphalt cement in each mix designed. According to the values obtained on the Stability and RT procedures, both mixes designed reached the low limits specified on the rules. Even so, the Bailey mix had the lower values to RT, what was not expected, as it was designed to result on a stronger hot asphalt mix.

Keywords: Paving. HMA. Hot asphalt mixes. Aggregate. Marshall. Bailey Method. Volumetrics.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Agência Nacional da Indústria de Pneumáticos
ANP	Agência Nacional de Petróleo, gás e Energia
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
cm	centímetro
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
ES	Especificação de Serviço
g	gramas
g/cm <sup>3</sup>	gramas/centímetros cúbico
Dap	Massa específica aparente da mistura
h	horas
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetros
LSP	Laboratório de Solos e Pavimentação
LUBNOR	Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste
ME	Método de Ensaio
MEE	Massa Específica Escolhida
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PCP	Peneira de Controle Primário

PCS	Peneira de Controle Secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PM	Peneira Média
RBV	Relação betume/vazios
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SHRP	Strategic Highway Research Program
SSF	Segundo Saybolt-Furol
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Com Betume
Vv	Volume de vazios

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Via Ostiense, uma das mais antigas do mundo, de Roma a Ostia, na Itália .....	15
Figura 2 - Defeitos comuns em pavimentos do Brasil: deformação permanente e trincas por fissura .....	18
Figura 3- Seção transversal típica de um pavimento flexível .....	23
Figura 4- Vista transversal de um pavimento asfáltico .....	24
Figura 5- Divisão de revestimentos .....	27
Figura 6- Classificação dos agregados .....	35
Figura 7- Características dos agregados para pavimentação .....	36
Figura 8- Ilustração do peneiramento de agregados.....	37
Figura 9- Curvas granulométricas convencionais.....	39
Figura 10 - Leituras do ensaio equivalente de areia.....	46
Figura 11 - Granulometria de CAUQ e SMA .....	50
Figura 12 - Princípios do Método Bailey na curva de graduação .....	53
Figura 13 - Divisão de agregado graúdo e miúdo pela PCP para um TMN de 9,5mm .....	55
Figura 14 - Determinação da massa específica solta.....	56
Figura 15 - Determinação da massa específica compactada.....	57
Figura 16 - Escolha da Massa Específica Escolhida para agregados graúdos .....	58
Figura 17 - Determinação da massa específica compactada do agregado miúdo ....	60
Figura 18 - Porções de agregados no Método Bailey .....	62
Figura 19 - Amostras de agregados no laboratório .....	66
Figura 20 - Série de peneiras utilizadas no ensaio.....	68
Figura 21- Amostras mínimas dos agregados.....	69
Figura 22 - Agregado com superfície saturada seca.....	70
Figura 23 - Conjunto para medição da densidade do agregado.....	70
Figura 24 – Máquina de abrasão "Los Angeles" e agregado após ensaio .....	73
Figura 25 - Faixas granulométricas DNER.....	74
Figura 26 – Análise do agregado graúdo envolvido com ligante asfáltico .....	75
Figura 27 - Realização do ensaio com o paquímetro .....	77
Figura 28 - Extração do ligante asfáltico do CAUQ no extrator de betume “Rotarex” .....	79

Figura 29 - Provetas utilizadas no ensaio, evidenciando o traço de referência.....	80
Figura 30 - Ensaio de densidade real do agregado miúdo .....	82
Figura 31 - Determinação da massa específica do (a) pó de brita e (b) da areia.....	84
Figura 32 - Ensaio de densidade do material de enchimento (filer) .....	85
Figura 33 - Viscosímetro Saybolt-Furol durante ensaio .....	88
Figura 34 - Compactador Marshall e mistura asfáltica no molde.....	92
Figura 35 - Prensa Marshall e realização do ensaio de estabilidade no corpo de prova .....	96
Figura 36 - Friso para ensaio de RT (a) e medição das dimensões do CP (b).....	97
Figura 37 - Recipiente utilizado no ensaio .....	99
Figura 38 - Execução do ensaio para brita 1 (a) e brita 0 (b) .....	99
Figura 39 - Compactação de uma das camadas de agregado.....	101
Figura 40 - Curvas granulométricas dos agregado e filer.....	103
Figura 41 - Determinação das temperaturas de trabalho da mistura asfáltica .....	109
Figura 42 - Curva granulométrica da mistura tradicional.....	111
Figura 43 - Curva granulométrica da mistura Bailey na Faixa B DNIT .....	114
Figura 44 - Curva granulométrica da mistura Bailey na faixa A DNIT .....	115
Figura 45 - Curva granulométrica da mistura Bailey na faixa C DNIT .....	115
Figura 46 – DMT das duas misturas .....	117
Figura 47 - Dap das duas misturas .....	118
Figura 48 - Volume de vazios das duas misturas.....	118
Figura 49 - VAM das duas misturas .....	119
Figura 50 - RBV das duas misturas.....	119
Figura 51 - Estabilidade da mistura tradicional.....	121
Figura 52 - Estabilidade da mistura Bailey .....	121
Figura 53 - Estabilidade das duas misturas .....	122
Figura 54 - Determinação do teor ótimo da mistura tradicional .....	123
Figura 55 - Determinação do teor ótimo da mistura Bailey .....	123
Figura 56 - Resultado da Resistência à Tração .....	124
Figura 57 - Viscosidade Saybolt-Furol do ligante .....	138

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das peneiras para granulometria.....	38
Tabela 2 - Faixas de proporções recomendadas .....	65
Tabela 3 - Peneiras de controle dos agregados na mistura .....	65
Tabela 4 - Fração de agregados por tamanho dos grãos .....	78
Tabela 5 - Limites para características da mistura asfáltica.....	93
Tabela 6 - Composição Granulométrica dos materiais.....	102
Tabela 7 - Resultados de massa específica real, aparente e absorção dos materiais para mistura asfáltica .....	104
Tabela 8 - Resultados da Abrasão "Los Angeles" do agregado graúdo.....	104
Tabela 9 - Índice de forma da brita 1 .....	105
Tabela 10 - Resultado do EA para areia .....	107
Tabela 11 - Resultado do EA para pó de brita .....	107
Tabela 12 - Massa específica solta e compactada dos agregados .....	108
Tabela 13 - Parâmetros obtidos para o CAP .....	108
Tabela 14 - Enquadramento da mistura tradicional na Faixa B.....	111
Tabela 15 - Granulometria da mistura Bailey comparada aos limites do DNIT .....	114
Tabela 16 - Parâmetros volumétricos para mistura tradicional.....	116
Tabela 17 - Parâmetros volumétricos para mistura Bailey .....	116
Tabela 18 - Resultado de Estabilidade e Fluência das misturas .....	120

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultado do IDML.....	106
Quadro 2 - Resultado do IDM.....	106
Quadro 3 – Granulometria da brita 0.....	132
Quadro 4 – Granulometria da brita 1 (amostra 1) .....	132
Quadro 5 – Granulometria da brita 1 (amostra 2) .....	132
Quadro 6 – Granulometria da areia.....	133
Quadro 7 – Granulometria do pó de brita.....	133
Quadro 8 – Granulometria do filer.....	133
Quadro 10 – Densidade aparente da brita 0.....	134
Quadro 11 – Densidade aparente do pó de brita.....	134
Quadro 12 – Densidade aparente da areia.....	134
Quadro 13 – Densidade real do filer.....	134
Quadro 14 – Absorção dos agregados.....	135
Quadro 15 – Massa específica solta e compactada.....	135
Quadro 16 – Densidade real dos agregados miúdos.....	135
Quadro 17 – Dimensão dos grãos para o índice de forma.....	136
Quadro 18 – Granulometria para índice de forma.....	137
Quadro 19 – Penetração do CAP.....	138
Quadro 20 – Ponto de amolecimento.....	138
Quadro 21 – Dimensões dos corpos de prova.....	139
Quadro 22 – Características médias dos corpos de prova .....	139
Quadro 23 – Dimensões e Dap do CP 4,5%.....	140
Quadro 24 – Dimensões e Dap do CP 5%.....	140
Quadro 25 – Dimensões e Dap do CP 5,5%.....	141
Quadro 26 – Dimensões e Dap do CP 6%.....	141
Quadro 27 – Dimensões e Dap do CP 4%.....	141
Quadro 28 – Porcentagens passantes nas peneiras de controle.....	142
Quadro 29 – Proporções de agregados.....	142
Quadro 30 – Cálculos para definição do traço Bailey.....	142

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>19</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Sequência de atividades</b> .....	<b>20</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Pavimentos Asfálticos</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 Camadas do pavimento asfáltico .....	24
3.1.2 Ligantes asfálticos .....	28
3.1.3 Agregados .....	34
3.1.4 Características dos agregados para pavimentação .....	42
3.1.5 Misturas asfálticas .....	47
<b>3.2 Método Bailey</b> .....	<b>51</b>
3.2.1 Princípios do Método Bailey .....	52
3.2.2 Arranjo de agregados .....	53
3.2.3 Agregado graúdo e miúdo no Método Bailey .....	54
3.2.4 Combinação volumétrica dos agregados .....	55
3.2.5 Propriedades de compactação .....	56
3.2.6 Seleção da granulometria utilizada .....	60
3.2.7 Análise de misturas de projeto .....	61
3.2.8 Parâmetros do Método Bailey .....	63
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>66</b>
<b>4.1 Agregados</b> .....	<b>66</b>
4.1.1 Análise Granulométrica .....	67
4.1.2 Determinação da Densidade Aparente e Absorção do Agregado Graúdo .....	69
4.1.3 Abrasão Los Angeles do agregado graúdo .....	71
4.1.4 Adesividade do agregado graúdo.....	75
4.1.5 Índice de forma do agregado graúdo .....	76
4.1.6 Índice de degradação do agregado após compactação Marshall, ID <sub>ML</sub> e ID <sub>M</sub> ..	77
4.1.7 Equivalente de areia do agregado miúdo .....	80
4.1.8 Densidade Real do agregado miúdo .....	81

4.1.9 Determinação da massa específica dos agregado miúdos pelo frasco Chapman .....	83
<b>4.2 Material de enchimento – Filer .....</b>	<b>84</b>
4.2.1 Determinação da massa específica do filer pelo frasco Le Chatelier .....	85
<b>4.3 Ligante Asfáltico - CAP .....</b>	<b>86</b>
4.3.1 Determinação da penetração no ligante asfáltico.....	86
4.3.2 Determinação da viscosidade Saybolt-Furol .....	87
4.3.3 Determinação do ponto de amolecimento do ligante .....	88
<b>4.4 Mistura asfáltica .....</b>	<b>89</b>
4.4.1 Dosagem Marshall .....	89
4.4.2 Estabilidade Marshall .....	95
4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	96
<b>4.5 Método Bailey .....</b>	<b>98</b>
4.5.1 Massa específica solta e compactada.....	98
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>102</b>
<b>5.1 Considerações Iniciais.....</b>	<b>102</b>
<b>5.2 Análise granulométrica.....</b>	<b>102</b>
<b>5.3 Massa específica e absorção dos agregados.....</b>	<b>103</b>
<b>5.4 Abrasão Los Angeles.....</b>	<b>104</b>
<b>5.5 Índice de forma.....</b>	<b>105</b>
<b>5.6 Adesividade do agregado ao ligante .....</b>	<b>105</b>
<b>5.7 Índice de degradação por compactação Marshall.....</b>	<b>106</b>
<b>5.8 Equivalente de areia.....</b>	<b>107</b>
<b>5.9 Massa Específica Solta e Compactada dos agregados .....</b>	<b>108</b>
<b>5.10 Concreto Asfáltico de Petróleo .....</b>	<b>108</b>
<b>5.11 Dosagem Marshall.....</b>	<b>110</b>
5.11.1 Definição do traço de agregados.....	110
5.11.2 Parâmetros volumétricos .....	116
5.11.3 Propriedades Mecânicas .....	120
5.11.4 Teor de ligante ótimo.....	122
5.11.5 Resistência à Tração por compressão diametral .....	124
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>128</b>
<b>APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS .....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE B – DENSIDADE REAL, DENSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO..</b>	<b>134</b>

<b>APÊNDICE C – ÍNDICE DE FORMA .....</b>	<b>136</b>
<b>APÊNDICE D – ENSAIOS PARA O LIGANTE ASFÁLTICO .....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA DA MISTURA TRADICIONAL .....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE F – CORPOS DE PROVA DA MISTURA BAILEY .....</b>	<b>140</b>
<b>APÊNDICE G – PARÂMETROS E CÁLCULOS DA MISTURA BAILEY .....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci *et al.* (2008), fazer um apanhado histórico da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, visto que a mais de 2000 (dois mil) anos o homem já fazia uso de estruturas de pavimento na vida cotidiana, para diversos fins como povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento.

Diversos são os exemplos que demonstram a importância e uso de pavimentação nas mais diversas localidades do mundo ao longo da história. Deve-se destacar o papel do Império Romano no que diz respeito à construção de sistemas de estradas e desenvolvimento da pavimentação. A Figura 1 mostra uma das vias criadas durante o Império Romano.

Figura 1- Via Ostiense, uma das mais antigas do mundo, de Roma a Ostia, na Itália



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Dito isso, pode-se definir o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas, cada uma com espessura definida, construída sobre a superfície de terraplenagem (subleito), que tem como objetivo resistir e distribuir os esforços verticais vindo do tráfego de veículos, melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais, com uma

superfície de rolamento mais durável (SENÇO, 2001).

De forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos. Os flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, havendo distribuição da carga em parcelas para cada camada. Os pavimentos rígidos são os que apresentam revestimento com rigidez maior do que as outras camadas, e assim, absorve praticamente todas as tensões vindas do carregamento. Por último, os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por apresentarem uma base cimentada por algum aglutinante, revestida por camada asfáltica (DNIT, 2006).

Neste trabalho, será estudado apenas o pavimento do tipo flexível, mais comum e utilizado no país. Uma das camadas desse tipo de pavimento é o revestimento asfáltico, definido como a camada superior, formada por uma mistura entre agregados e ligantes asfálticos, e que está em contato direto com as ações do tráfego. Sua função é a de transmitir as cargas, de forma atenuada, às camadas inferiores, além de impermeabilizar o pavimento e dar boas condições de rolamento (BERNUCCI et al., 2008).

Uma das questões consideradas na dosagem de misturas asfálticas é a escolha certa da composição dos diferentes tipos de agregados, feita comumente por método de tentativas (convencional). Tal realidade pode atrasar, consideravelmente, o processo de dosagem, além de não garantir características (mecânicas, volumétricas, etc.) desejadas e um bom desempenho da mistura final (MENDES, 2011).

Segundo Gouveia (2006), o desempenho de uma camada de revestimento asfáltico está relacionado diretamente à resposta da mistura à ação de cargas que nela atuem. E considerando o agregado como responsável pela formação do esqueleto estrutural da mistura, conclui-se que as propriedades dos agregados estão intimamente ligadas à capacidade de sustentação da mistura e, conseqüentemente, intimamente relacionadas com o desempenho dos pavimentos.

Neste sentido, propõe-se a utilização do Método Bailey como forma de seleção dos agregados para misturas asfálticas densas, visto que tal método leva em consideração o intertravamento dos agregados constituintes da mistura asfáltica, o que visa refletir na melhoria do desempenho da estrutura (MENDES, 2011), diminuindo a incidência de muitos defeitos ou irregularidades encontradas em vias

pavimentadas, como deformação permanente, trincas por fadiga, entre outros.

Simultaneamente, para efeitos de comparação, é estudada a seleção de agregados pelo método tradicional (por tentativas), que tem seu processo baseado nas faixas granulométricas de agregados apresentadas na norma DNIT-ES 031/2006. Os resultados obtidos na comparação mostram que a seleção de agregados pelo método Bailey, assim como a seleção pelo método das tentativas, garante misturas com propriedades mecânicas acima dos valores mínimos exigidos por norma, o que se considera satisfatório para uma primeira pesquisa a respeito deste tema.

### **1.1 Justificativa**

No Brasil, a rede rodoviária é o modal de transporte mais amplamente utilizado, totalizando cerca de 60% de deslocamentos de cargas e 96% para deslocamentos de pessoas (GEIPOT, 2001). O sistema rodoviário conta, atualmente, com cerca de 1,72 milhões de quilômetros (km) de rodovias e estradas, e apenas 12,3% desse valor é de malha rodoviária pavimentada, segundo pesquisa da Confederação Nacional do Transporte – CNT (2016).

Como dito anteriormente, uma das funções do pavimento é a de resistir aos esforços provenientes do tráfego a que ele estiver submetido, garantindo uma superfície em que não ocorra desconforto e que propicie segurança no ato de dirigir. Ironicamente, apesar das rodovias serem o principal sistema de transporte nacional, dados do CNT (2016), apontam que em 58,26% de um total de 103.259 km de rodovia avaliados, há existência de defeitos tanto no pavimento, como na sinalização e na geometria, o que significa necessidade de intervenção (Figura 2).

Figura 2 - Defeitos comuns em pavimentos do Brasil: deformação permanente e trincas por fissura



Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

De acordo com Bernucci et al. (2008), este quadro de precária infraestrutura rodoviária, bem como dos demais modais de transportes, repercute na capacidade produtiva do país, que está muito longe da ideal. Além disso, com o constante aumento de condições socioeconômicas da população, e o conseqüente aumento do número de veículos nas estradas, as rodovias tendem a sofrer mais com problemas como altas temperaturas, pressão de enchimento dos pneus, excesso de carga nos eixos de veículos e volume elevado de tráfego, o que vai refletir no aparecimento de deformações permanentes, trincas por fadiga, entre outros defeitos.

Dessa forma, torna-se necessário haver modificações nos processos de concepção da mistura asfáltica, devido a essa crescente mudança de solicitações no pavimento. Neste quesito, o arranjo estrutural dos agregados que compõem a mistura tem grande impacto, uma vez que um contato grão-grão adequado, bem como o intertravamento otimizado do esqueleto mineral se relaciona, diretamente, com as características mecânicas das misturas asfálticas.

Somado a isso ainda existe o fato da utilização difundida, pelo menos a nível nacional, do método convencional para enquadramento e seleção de agregados de misturas asfálticas, o qual se configura como um processo demorado e com alta possibilidade de erros no decorrer de sua aplicação, sendo de difícil realização, principalmente para projetistas menos experientes (MENDES, 2011).

É este o cenário que dá subsídio para o desenvolvimento do presente trabalho, visando o uso do Método Bailey para seleção de agregados de misturas asfálticas. Tal método se baseia na forma como os agregados graúdos e os agregados

miúdos se empacotam para formar um esqueleto estrutural forte, já que são os agregados que suportam a maior parte das forças de compressão vindas do tráfego. Portanto, com uso do Método Bailey, visa-se garantir o desenvolvimento de uma estrutura resistente, durável e com vazão de agregado mineral (VAM) adequado a um melhor desempenho do pavimento (MANJUNATH e POORNACHANDRA, 2014).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo comparativo entre o Método Bailey e o método tradicional (de tentativas) para seleção de agregados de mistura asfáltica densa (CAUQ), dando enfoque às características mecânicas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar a dosagem de um CAUQ pelo método Marshall, fazendo uso do método Bailey;
- Analisar os resultados mecânicos da mistura asfáltica;
- Analisar as características volumétricas da mistura asfáltica;

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Sequência de atividades

O desenvolvimento desse trabalho se baseia na realização de pesquisa bibliográfica, de procedimentos laboratoriais e discussões teórico-práticas sobre o assunto.

A pesquisa bibliográfica sobre as formas de aplicação e função do Método Bailey, bem como todos os outros conceitos que dão embasamento ao presente estudo, foi realizada em livros, artigos, dissertações, teses de monografia e pós-graduação, websites e outros trabalhos científicos que discorram sobre o tema em questão.

A realização de ensaios se deu no Laboratório de Solos e Pavimentação do Centro de Ciências Tecnológicas na Universidade Estadual do Maranhão, situada na cidade de São Luís, capital do Estado do Maranhão. Antes do início de procedimentos laboratoriais, se fez necessário obter os devidos materiais a serem ensaiados, como ligante (CAP), e agregados graúdos e miúdos junto a construtoras da cidade.

A ordem de ensaios foi, inicialmente estabelecida, pelos que tratam a respeito dos agregados, como o de granulometria (DNER-ME 083/98), o de absorção e densidade (DNER-ME 081/98 e DNER-ME 194/98), Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), dentre outros a serem mostrados no decorrer do estudo.

Em seguida, foram realizados os ensaios para o ligante adotado: Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP. Os ensaios a serem executados foram, basicamente, os de viscosidade Saybolt-Furol (ABNT NBR 14950/2000), o de penetração (DNIT 155/2010 – ME) e o de ponto de amolecimento (DNIT 131/2010 – ME), também chamado de ensaio do anel e da bola.

No processo de dosagem, fez-se uso do Método Marshall, porém aqui foram definidos dois caminhos para composição do agregado da mistura:

- 1) Seleção de agregados pelo método convencional (de tentativas);
- 2) Seleção de agregados pelo Método Bailey;

Seguindo para as próximas etapas da dosagem Marshall, foi feita a confecção dos corpos de prova e posterior definição de um teor de asfalto ideal. Após isso, os corpos de prova, de ambas as misturas, foram submetidos aos ensaios de Estabilidade Marshall, Fluência e Resistência à Tração por compressão diametral.

Por fim, os resultados das etapas anteriores foram discutidos, com o intuito de verificar se o uso do método proposto, de acordo as práticas indicadas pela literatura técnica, configura a confecção de uma mistura de melhor rendimento.

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste item serão tratados todos os assuntos que tenham relação com o tema do presente trabalho. Utilizou-se literatura tanto nacional como internacional para dar embasamento a diversos termos e informações relevantes ao desenvolvimento do tema apresentado, como: a caracterização dos pavimentos asfálticos; agregados utilizados em pavimentação; Método Bailey para seleção granulométrica dos agregados, entre outros.

#### **3.1 Pavimentos Asfálticos**

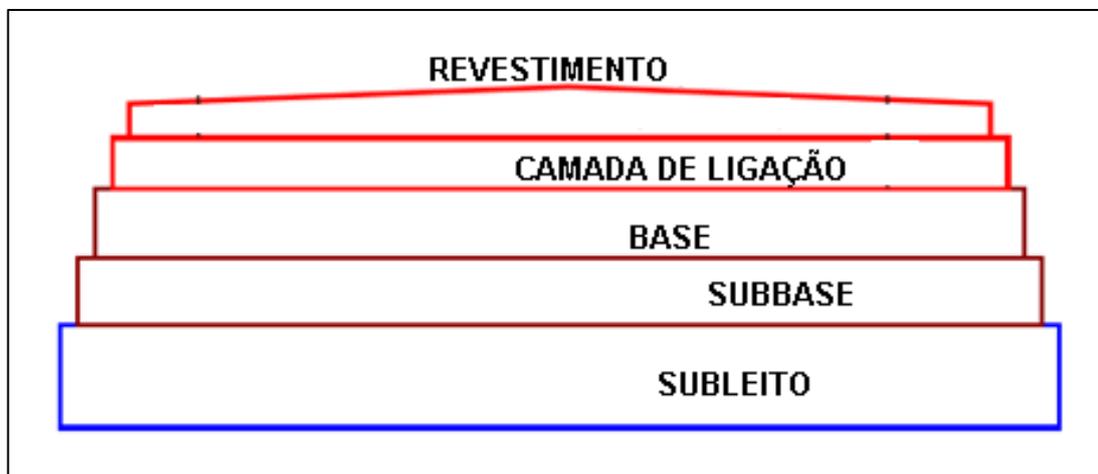
Como dito anteriormente, o pavimento costuma ser definido como a estrutura construída sobre a terraplenagem destinada a distribuir no terreno subjacente as cargas do tráfego e oferecer condições de suavidade, segurança e boa aderência ao tráfego de veículos (FRAENKEL, 1980). Por ser uma estrutura constituída de diversas camadas, para funcionar de maneira adequada, todas devem trabalhar com deformações compatíveis com sua natureza e capacidade de suportar cargas, não ocorrendo ruptura ou danos prematuros nos materiais que compõem as partes do pavimento (BALBO, 2007).

Objeto deste trabalho, de acordo com Bernucci et al. (2008), os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Tem em sua estrutura, geralmente, quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 3). Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas ou acréscimo de outras.

A característica marcante desse tipo de pavimento é o fato do carregamento vindo dos veículos que agem na estrutura se distribuírem em uma área maior, assim o estresse das tensões diminui na medida que atinge camadas mais profundas. Baseado nisso, o pavimento flexível é construído com um determinado número de camadas, sendo que as camadas mais superficiais devem apresentar maior qualidade para sustentar o máximo de tensões de compressão. As camadas mais profundas experimentam menor magnitude de tensões e, por isso, materiais de

menor qualidade podem ser utilizados em sua concepção (MATHEW e RAO, 2007).

Figura 3- Seção transversal típica de um pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Mathew e Rao (2007).

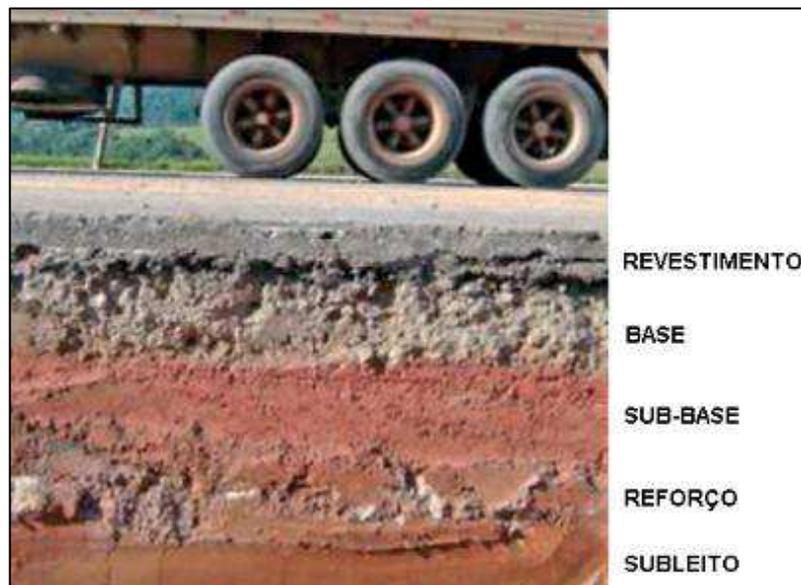
Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural, já que tem a função de limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, o que pode ser considerado o objetivo da mecânica dos pavimentos (MEDINA, 1997).

Segundo Bernucci et al. (2008), o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). Pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder. Diversos são os materiais que podem constituir essa camada, mas todos se configuram de uma mesma maneira: há a associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser de duas maneiras principais, por penetração ou por mistura – termos que serão tratados mais detalhadamente no decorrer deste trabalho.

### 3.1.1 Camadas do pavimento asfáltico

Uma seção típica de um pavimento — com todas as camadas possíveis - consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento (SENÇO, 2001). Nesse caso, em específico, por se tratar de pavimento asfáltico, as demais camadas são a de regularização (quando necessária), o reforço do subleito, a sub-base, a base e o revestimento asfáltico (Figura 4).

Figura 4- Vista transversal de um pavimento asfáltico



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

#### 3.1.1.1 Subleito

É considerado o terreno de fundação do pavimento. O subleito é composto de material natural consolidado e compactado, sendo que os esforços que ocorrem em sua superfície são aliviados em sua profundidade (normalmente dispersando-se no primeiro metro). Uma maior preocupação é tomada com as camadas que o sobrepõem, devido às solicitações atuantes de maior magnitude (BALBO, 2007).

#### 3.1.1.2 Regularização

De acordo com Senço (2001), é a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformá-lo, transversal e

longitudinalmente, com o projeto. Deve ser executada, sempre que for necessária, em aterros, para que evite:

- a) a execução de cortes difíceis no material da "casca" já compactada pelo tráfego;
- b) a substituição de uma camada já compactada naturalmente por uma camada a ser compactada, que nem sempre atinge o grau de compactação já existente.
- c) o uso do equipamento de escarificação desnecessariamente, agindo numa camada compactada.

### *3.1.1.3 Reforço do subleito*

Esta camada é empregada geralmente quando o subleito é composto por um solo com uma baixa resistência aos esforços verticais (cisalhamento) que ocorreriam sobre sua superfície. Com isso é realizado um reforço com um solo de maior qualidade, este resistindo mais as pressões provenientes do carregamento (BALBO, 2007).

Devido ao nome de *reforço do subleito*, essa camada é, às vezes, associada à fundação. No entanto, essa associação é meramente formal, pois o reforço do subleito é parte constituinte especificamente do pavimento e tem funções de complemento da sub-base que, por sua vez, tem funções de complemento da base. Assim, o reforço do subleito também resiste e distribui esforços verticais, não tendo as características de absorver definitivamente esses esforços, o que é característica específica do subleito. Em conclusão, o reforço do subleito poderia ser considerado indistintamente camada suplementar do subleito ou camada complementar da sub-base (SENÇO, 2001).

### *3.1.1.4 Sub-base e base*

Segundo Senço (2001), a sub-base é a camada complementar à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Segundo a regra geral, o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base. Já a base é a camada destinada a resistir aos

esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

As camadas de base e sub-base surgem para aliviar pressões sobre as porções inferiores do pavimento e também desempenham um importante papel na drenagem subsuperficial. Os materiais que as compõem podem ser solos estabilizados naturalmente, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo-brita, concretos, macadame seco, entre outros (BALBO, 2007). Genericamente, pode-se dividir as bases e sub-bases em granulares e estabilizadas quimicamente (com aditivos).

As bases e sub-bases granulares são as constituídas por solos, britas de rochas, de escoria de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos. Quando se utiliza material natural e pedra britada, tem-se o solo-brita; quando se usa apenas produtos da britagem, tem-se as bases ou sub-bases de brita graduada ou corrida; e quando se utiliza brita de graduação aberta com vazios preenchidos pelo material de enchimento (pó de pedra), tem-se o macadame hidráulico (DNIT, 2006).

Ainda segundo o DNIT (2006), as bases e sub-bases estabilizadas com aditivos apresentam, quase todas, processos tecnológicos e construtivos semelhantes às granulares com estabilização granulométrica, diferindo apenas em alguns detalhes. Alguns exemplos desse tipo são: mistura de solo com cimento Portland e água (solo-cimento); adição de pequenos fatores de cimento no solo (solo melhorado com cimento); mistura de solo com cal e água (solo-cal); solo com pequenas frações de cal (solo melhorado com cal); mistura de solo com material betuminoso (solo-betume); entre outras.

### *3.1.1.5 Revestimento asfáltico*

Segundo Bernucci et al. (2008), o revestimento é a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática, e por causa disso, deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato

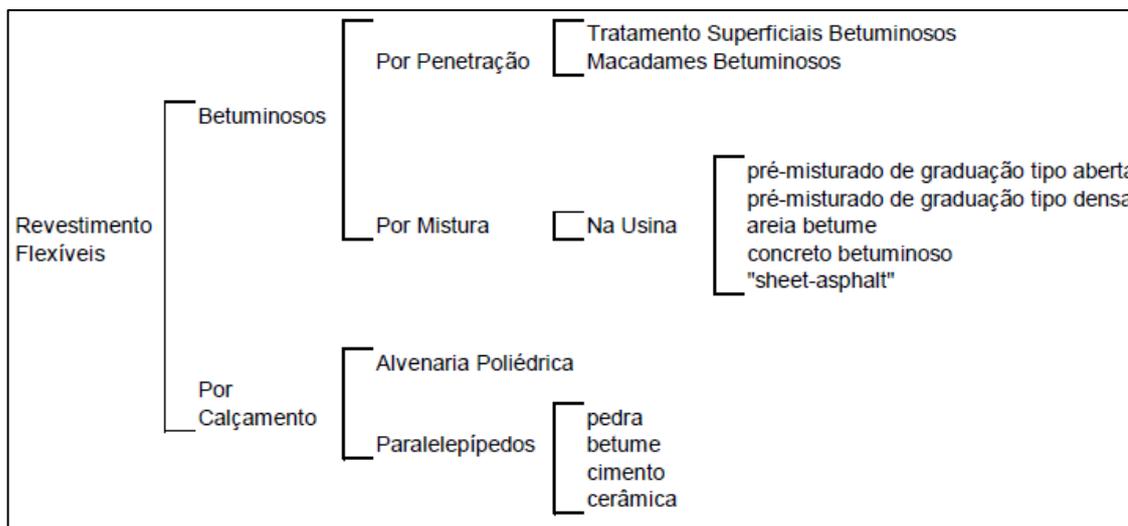
pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos. Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, entre outros.

Os revestimentos asfálticos são muitas vezes subdivididos em duas ou mais camadas, devido a questões tanto técnicas como construtivas. Por isso, surgem designações como “camada de rolamento” ou “camada de ligação” para descrever um revestimento dividido em duas camadas de materiais diferentes (BALBO, 2007). Assim, faz-se necessário definir o que seria cada uma delas, como se segue:

- a. Camada de rolamento → aquela mais superficial no pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais;
- b. Camada de ligação → aquela intermediária, também em mistura asfáltica, entre camada de rolamento e a base do pavimento. É comumente chamada de *binder*.

De acordo com o DNIT (2006), os revestimentos podem ser agrupados como mostrado na Figura 5, logo abaixo.

Figura 5- Divisão de revestimentos



Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Como mostrado na Figura 5, dentre os revestimentos flexíveis existentes cita-se os por calçamento e os betuminosos, que são os que interessam para este estudo. De acordo com o DNIT (2006), os revestimentos por penetração são os executados através de uma ou mais aplicações de material betuminoso, seguida (s) de número igual de operações para espalhamento e compactação das camadas de agregados (penetração invertida); há, também, a ocorrência de revestimentos executados através do espalhamento e compressão de agregados, com cada camada, após ser compactada, submetida à aplicação de material betuminoso (penetração direta).

Ainda seguindo as definições do DNIT (2006), o outro tipo de revestimento betuminoso é o revestimento por mistura, no qual o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso, antes da compressão. Podem ser classificados, também, como pré-misturados a frio ou pré-misturados a quente, mas isso será debatido profundamente em outro item deste trabalho.

### 3.1.2 Ligantes asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, e seu uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento: só aqui no Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Balbo (2007), para definir o asfalto, deve-se saber o que é betume, ou seja, uma substância composta por hidrocarbonetos pesados, com propriedades ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em temperatura ambiente, e que ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, a partir da destilação do petróleo, de madeira ou resinas. Dito isso, o asfalto é entendido como um produto natural ou derivado do petróleo, presente geralmente em rochas ou outros tipos de depósitos, e que se constitui basicamente de betume.

Todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura. Este efeito da temperatura nos ligantes asfálticos tem relação direta com o modelo estrutural das moléculas que o constituem. Assim, o comportamento do

ligante fica condicionado à temperatura a que ele estiver exposto, ou seja, em temperaturas muito baixas, as moléculas têm maiores dificuldades para se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. Caso a temperatura comece a aumentar, algumas moléculas começam a se mover mais, podendo mesmo haver um fluxo entre as moléculas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido (BERNUCCI et al., 2008).

Bernucci et al. (2008) conclui que, pelo ligante asfáltico apresentar tal propriedade, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos têm temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento, visto que o asfalto é um material termoviscoelástico.

### *3.1.2.1 Tipos de ligantes asfálticos*

De acordo com Bernucci et al. (2008), no Brasil, os tipos de ligantes asfálticos existentes são: o cimento asfáltico de petróleo (CAP), as emulsões asfálticas (EAP), os asfaltos diluídos (ADP), asfaltos oxidados, modificados e agentes rejuvenescedores. Dentre todos os mais conhecidos e empregados são o CAP, a EAP e o ADP, portanto serão explicados abaixo; e dentre estes três, o CAP é o tipo de ligante mais utilizado nacionalmente e, também, o empregado na realização da mistura asfáltica deste estudo.

#### a) Cimento asfáltico de petróleo – CAP

De acordo com a Especificação Brasileira EB -78 do Instituto Brasileiro de Petróleo e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1978), assim é definido o cimento asfáltico de petróleo: o CAP é o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos, tendo uma penetração a 25° C entre 5 e 300 sob uma carga de 100 g, aplicada durante 5 segundos.

O cimento asfáltico é especificamente obtido para apresentar características adequadas à pavimentação, podendo ser obtido por destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. O cimento asfáltico

oriundo petróleo recebe o símbolo CAP enquanto o natural identificado por CAN (IME, 2011).

O CAP, como material ligante ou aglutinante, possui geralmente boa aderência aos agregados, além de apresentar propriedades impermeabilizantes, o que aumenta o seu uso consideravelmente em obras de engenharia civil, para diversas aplicações. É um material termoplástico, de comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que, com o intemperismo, se altera, perdendo as propriedades iniciais e se tornando mais viscoso e frágil (BALBO, 2007).

Segundo Senço (2001), as classificações mais antigas dos cimentos asfálticos identificavam 10 tipos CAP, de acordo com a penetração, utilizando ainda as iniciais AC (de asphalt cement): CAP's de penetração 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-85, 85-100, 100-120, 120-150, 150-200 e 200-300. Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil, em substituição às anteriores (BERNUCCI et al., 2008). Essa nova especificação baseia-se na penetração e nos ensaios que serão vistos adiante.

Seguindo a especificação, o CAP pode ser considerado duro, médio e mole, sendo a classificação atual: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Com temperatura mais elevada ocorre aumento em seu fluxo viscoso, podendo ser misturado com outros materiais, envolvendo-os totalmente. Já a temperaturas muito baixas, o CAP acaba por tornar-se sólido, com ruptura vítrea ou frágil (BALBO, 2007). Dentre os tipos de CAP apresentados, aquele que será utilizado neste trabalho é o CAP 50-70, típico da nossa região.

#### b) Emulsão asfáltica de petróleo – EAP

Chama-se emulsão à mistura de dois constituintes não-miscíveis entre si que, entretanto, constituem fases separadas. A fase dispersante ou fase contínua é normalmente um líquido, enquanto a fase dispersa ou descontínua pode ser constituída por um líquido viscoso, um sólido ou um semissólido, como, por exemplo, um asfalto ou um alcatrão (SENÇO, 2001).

As emulsões são produzidas a partir de CAP (ou de asfaltos diluídos), adicionados de água e agente emulsificante em pequenas proporções (0,2% a 1%), com a água sendo a fase contínua, e a fase descontínua formada por pequenos

glóbulos de asfalto com diâmetros que chegam a 1 $\mu$ m, em constante movimento desordenado no meio da fase contínua da emulsão (BALBO, 2007).

Senço (2001) afirma que, em termos práticos, as emulsões vieram atender a expectativa de poder dissolver os asfaltos com água num processo desenvolvido inteiramente a frio. Podendo-se dividir as emulsões em dois tipos: emulsões diretas (óleo ou betume dispersado em água) e emulsões inversas (água dispersada no óleo ou ligante hidrocarbonado).

No Brasil, há a norma ABNT NBR 14594/2000, que fala da classificação de emulsões asfálticas. As designações das classes das emulsões brasileiras são feitas em função (i) do tempo necessário para que ocorra a ruptura, dividida em lenta, média ou rápida; (ii) do teor de asfalto contido na mesma; e (iii) da carga iônica. Por exemplo, uma emulsão designada de RR 1C representa uma emulsão de ruptura rápida RR, catiônica C, e o número 1 indica a faixa de viscosidade (BERNUCCI et al., 2008).

#### c) Asfalto diluído de petróleo – ADP

São asfaltos que resultam da diluição de um cimento asfáltico de petróleo por destilados leves de petróleo, em frações que se aproximam da nafta, do querosene e do diesel, com o objetivo de reduzir temporariamente sua viscosidade, facilitando sua aplicação, geralmente exigindo temperaturas menores que a do cimento asfáltico nessa aplicação. Após a aplicação, os diluentes se evaporam, dando-se a essa evaporação o nome de cura (SENÇO, 2001).

Segundo Bernucci et al. (2008), No Brasil são fabricados dois tipos de asfalto diluído, chamados de cura média e de cura rápida. O termo cura refere-se à perda dos voláteis e depende da natureza do diluente utilizado. A denominação dos tipos é dada segundo a velocidade de evaporação do solvente: cura rápida (CR) cujo solvente é a gasolina ou a nafta; cura média (CM) cujo solvente é o querosene.

O complemento da classificação dos ADP's é composto com uma numeração referente ao início da faixa de viscosidade cinemática em cada classe considerada, ou seja, se for estudado um ligante (ADP) denominado CM-30 significa que é um asfalto diluído de cura média (CM), com faixa de viscosidade cinemática a 60<sup>o</sup> C iniciando em 30cSt; da mesma forma, um CR-250 seria um asfalto de cura rápida que tem início da faixa de viscosidade em 250cSt (BERNUCCI et al., 2008).

### 3.1.2.2 Ensaio classificatórios do Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP

De acordo com o Instituto do Asfalto (1989), para qualquer projeto ou construção, os ligantes asfálticos apresentam três características ou propriedades importantes, sendo elas a pureza, a consistência (também chamada de viscosidade) e segurança, que serão descritas a seguir. Assim os ensaios mais básicos a serem realizados nos ligantes asfálticos analisam essas características essenciais.

i. Ensaio de solubilidade:

É o ensaio que trata a respeito da pureza do ligante asfáltico, ou seja, à quantidade de partículas (impurezas) encontradas no ligante que não sejam betume. A composição do cimento asfáltico é quase que inteiramente de betume e, para realização deste ensaio, este tem sua totalidade solubilizada no bissulfeto de carbono, com posterior filtragem da amostra. A quantidade de material retido no filtro representa as impurezas no cimento asfáltico; é determinado pela norma ASTM D 2042, ABNT NBR 14855/2002.

ii. Ensaio de viscosidade:

Existem vários tipos de ensaio para analisar a viscosidade do ligante asfáltico, porém o mais utilizado no Brasil é o viscosímetro de Saybolt-Furol, regido pelas normas ASTM 102-93, ABNT NBR 14756/2001. O parâmetro estudado por esse ensaio é a consistência do ligante, que pode ser entendida como o termo utilizado para descrever o grau de fluidez do ligante em questão a qualquer temperatura considerada. Assim, de acordo com Bernucci et al. (2008), a medida dessa fluidez (ou viscosidade), tem influência direta na consistência adequada que o ligante deve apresentar quando feita a mistura com os agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos, e também quando for feita a aplicação no campo. O valor da viscosidade é reportado em segundos Saybolt-Furol, abreviado como SSF, a uma dada temperatura de ensaio.

iii. Ensaio de penetração:

É outro ensaio que analisa a consistência do ligante asfáltico, sendo regido pela norma brasileira ABNT NBR 6576/98. Segundo Bernucci et al. (2008), a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. A consistência do ligante será tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

iv. Ensaio de ponto de fulgor:

Este é o ensaio que trata a respeito da segurança no manuseio do ligante asfáltico, seja no transporte, na aplicação ou usinagem do mesmo. O chamado ponto de fulgor representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C (BERNUCCI et al., 2008).

v. Demais ensaios:

Além dos ensaios mostrados acima, vários outros procedimentos laboratoriais podem ser realizados para completa caracterização do CAP. Pode-se citar ensaios como: o de ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560/2000), o de ductilidade (ABNT NBR 6293/2001), o de durabilidade (ABNT NBR14736/2001), espuma, massa específica e densidade relativa (ABNT NBR 6296/2004), ponto de ruptura Fraass e o ensaio de suscetibilidade térmica (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989).

### 3.1.3 Agregados

Agregado é o material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto (ABNT NBR 9935/2011). Segundo o DNIT (2006), os agregados, que são os materiais pétreos utilizados na pavimentação, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são utilizados na forma que se encontram na natureza, como os pedregulhos. Já os segundos são os que necessitam de transformações físicas e químicas do material como a escória de alto forno ou argila expandida.

Para conhecer o desempenho potencial dos agregados, é importante considerar como são formados e o que aconteceu com eles desde então. Antes de serem utilizados em um revestimento asfáltico, é importante lembrar que eles já existem há milhões de anos (tempo geológico), portanto deve-se tentar prever como será o comportamento desses agregados por meio de ensaios laboratoriais e experiência prática. Uma vez associados com ligantes asfálticos, como parte de uma estrutura de pavimento, seu desempenho deve ser considerado em termos de tempo em engenharia, que em obras de pavimentação é medido em anos ou décadas (BERNUCCI et al., 2008).

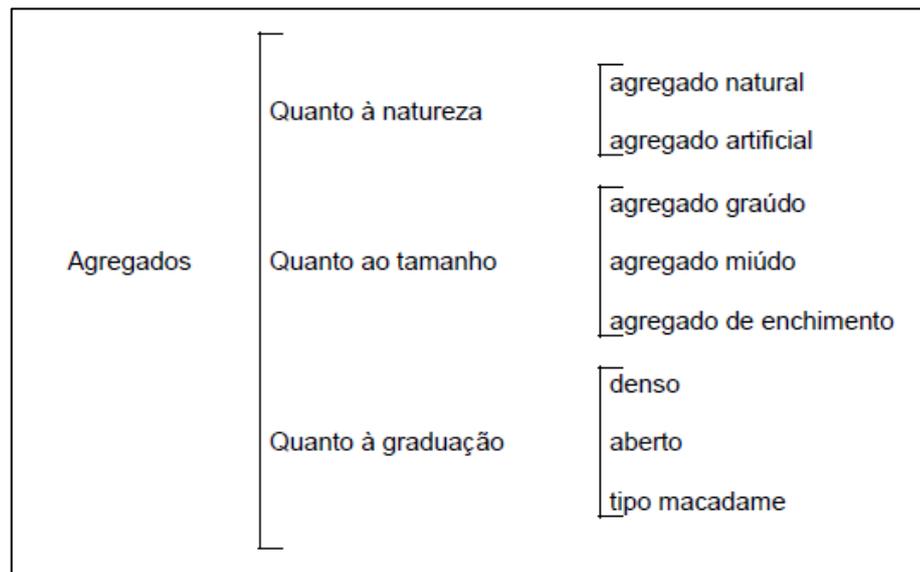
Com relação à sua aplicação nos pavimentos, os agregados são os principais responsáveis pela resistência às cargas impostas pelo tráfego e suas propriedades deveriam ser consideradas no momento da dosagem. As propriedades que determinam a adequação ao uso em misturas asfálticas são em maior extensão, as propriedades físicas e em menor extensão as propriedades químicas (ROBERTS et al., 1996). Algumas características são determinantes para a classificação dos agregados: natureza tamanho e distribuição dos grãos (Figura 6).

De acordo com Bernucci et al. (2008), quanto à natureza das partículas, os agregados podem ser:

- i) Naturais → inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem. Exemplos: os pedregulhos, seixos, britas, areais, etc.

- ii) Artificiais → são resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço.

Figura 6- Classificação dos agregados



Fonte: DNIT (2006).

Quanto ao tamanho, os agregados, para uso em misturas asfálticas, são classificados em graúdo, miúdo e material de enchimento (filer). O agregado graúdo é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira de nº 10; pode ser pedra britada, escória, seixo rolado ou britado, ou outro material que atenda a especificação. O agregado miúdo é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. o material que é retido na peneira de nº 200, mas que passa na de abertura nº 10; pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material que atenda a especificação. O material de enchimento é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de no 200; deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, pós-calcários, cinza volante, entre outros (DNIT 031/2004 – ES, 2006).

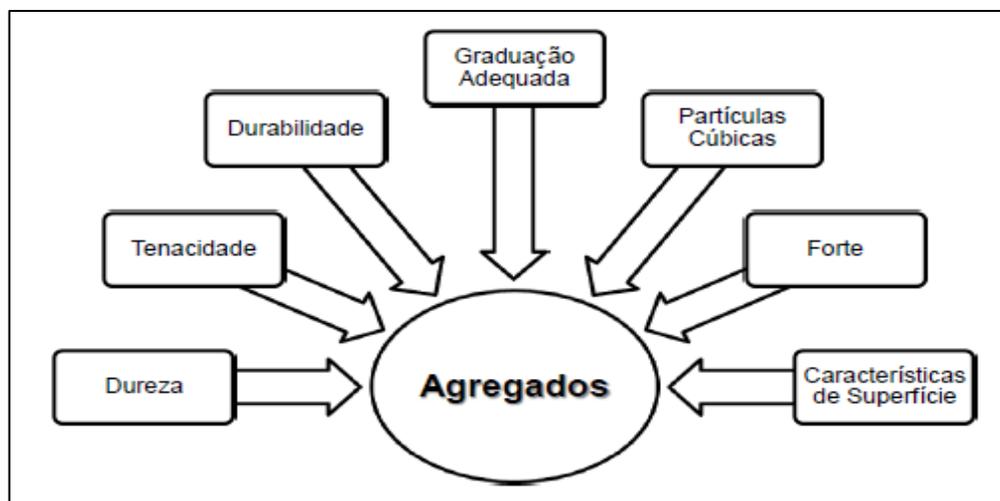
Quanto à distribuição dos grãos, de acordo com o DNIT (2006), os agregados podem ter graduação aberta, densa, uniforme e descontínua:

- a. Graduação densa: aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- b. Graduação aberta: aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- c. Graduação tipo macadame: é aquela que possui partículas de um único tamanho, ou seja, apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante uniforme e íngreme.

Há, também, de acordo com Bernucci et al. (2008), a graduação descontínua, ou seja, aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias.

Para os agregados serem utilizados em misturas asfálticas, é desejável devem apresentar algumas características (Figura 7) como dureza, tenacidade, durabilidade, graduação adequada, apresentar partículas cúbicas com baixa porosidade, além de ser forte e apresentar superfície limpa, rugosa e hidrofóbica (MENDES, 2011).

Figura 7- Características dos agregados para pavimentação



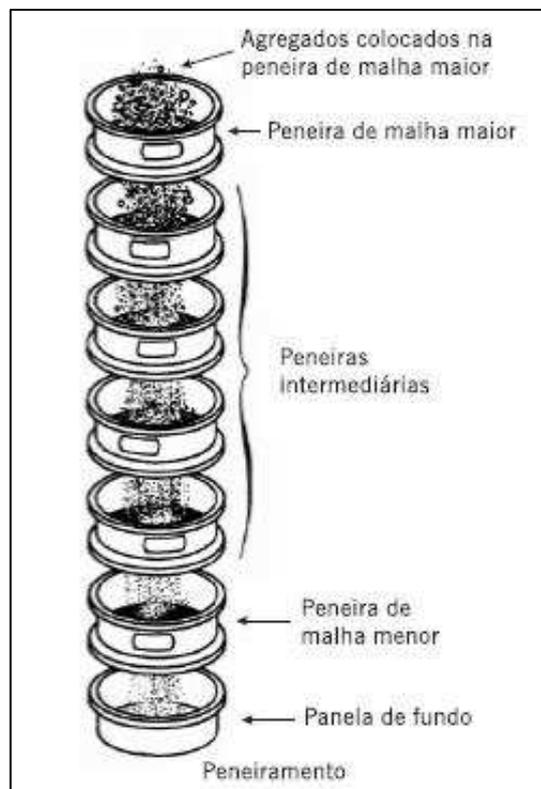
Fonte: Mendes (2011).

### 3.1.3.1 Distribuição granulométrica dos agregados

Segundo Bernucci et al. (2008), a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc.

A obtenção da granulometria se dá através do peneiramento do material por uma série de peneiras empilhadas (Figura 8) com aberturas progressivamente menores, pesando-se o material retido em cada uma delas. Sua representação pode ser feita de forma gráfica, traçando-se uma curva granulométrica, onde a ordenada corresponde à porcentagem total de peso passante em um dado tamanho sobre uma escala aritmética, e a abscissa representa o tamanho da partícula, plotada em escala logarítmica (MENDES, 2011).

Figura 8- Ilustração do peneiramento de agregados



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Cunha (2004) afirma que é através da análise das porcentagens de agregados, retidas e/ou passadas em um conjunto de peneiras (Tabela 1), variando de acordo com a norma ou especificação usada, que é feita a determinação da distribuição granulométrica de um material. Através das porcentagens, a graduação pode ser representada graficamente por uma curva granulométrica (Figura 9), na qual a ordenada, numa escala aritmética, indica a porcentagem total passante, em peso, numa determinada peneira, enquanto a abscissa representa o tamanho de abertura das peneiras em escala logarítmica ou elevadas à potência 0,45.

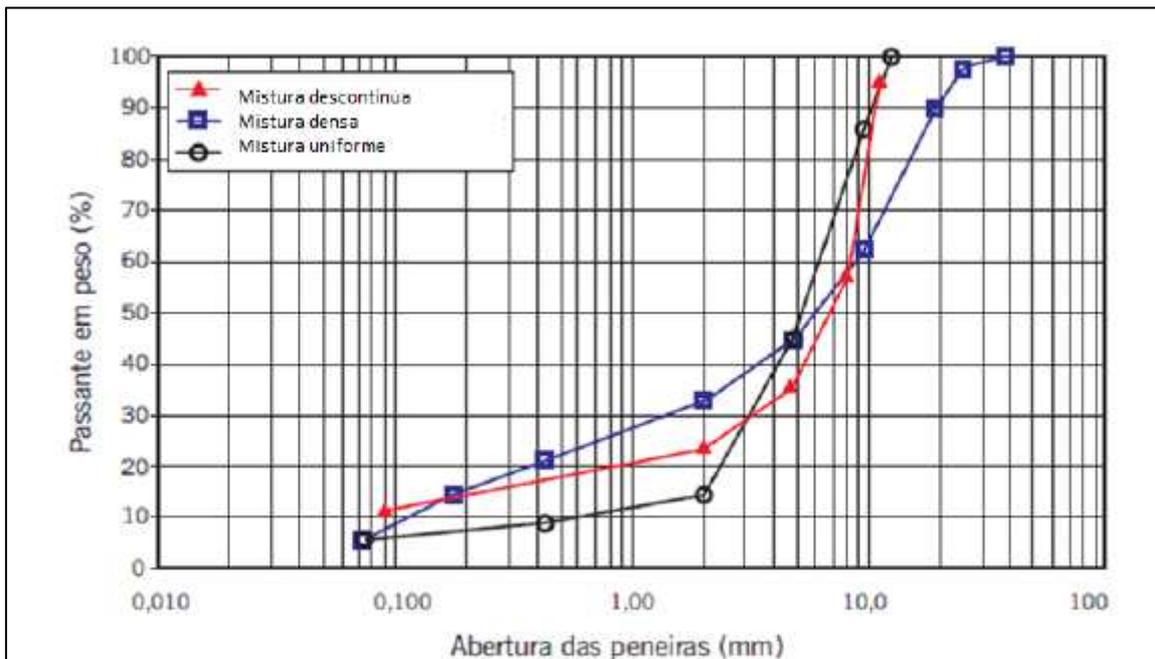
Tabela 1- Dimensões das peneiras para granulometria

PENEIRA	ABERTURA (mm)	PENEIRA	ABERTURA (mm)
4"	101,6	#16	1,19
2"	50,8	#20	0,840
1"	25,4	#30	0,590
¾"	19,1	#40	0,420
½"	12,7	#50	0,297
3/8"	9,52	#60	0,250
¼"	6,35	#70	0,210
#4	4,76	#100	0,149
#6	3,36	#140	0,105
#8	2,38	#200	0,075
#10	2,00	#270	0,053
#12	1,68	#400	0,037

Fonte: Balbo (2007).

Existem dois procedimentos de peneiramento amplamente usados, a seco e por lavagem. O procedimento a seco é padronizado pela norma ASTM C136 e DNER-ME 83/98 e o com lavagem, pela ASTM C117. Apesar do peneiramento com lavagem ser mais preciso, o método a seco é mais rápido e, frequentemente, mais utilizado para determinar a graduação dos agregados. Com o uso do método de peneiramento a seco, a quantidade de material passante na peneira nº 200 (0,075mm) fica, geralmente, abaixo do valor que seria obtido pelo método com lavagem (CUNHA, 2004).

Figura 9- Curvas granulométricas convencionais



Fonte: Bernucci et al. (2008).

### 3.1.3.2 Tamanho dos agregados

De acordo com Gouveia (2006), para assegurar um bom desempenho, é importante considerar o tamanho máximo da partícula de agregado: se o tamanho máximo é muito pequeno, a mistura pode ser instável; quando é muito grande, podem aparecer problemas de trabalhabilidade e de segregação da mistura.

O diâmetro máximo de um agregado é a abertura da malha da menor peneira onde passam, no mínimo, 95% de material. Já o diâmetro mínimo é a abertura da malha da maior peneira onde passam, no máximo, 5% de material (DNIT, 2006).

Segundo Bernucci et al. (2008), a norma americana ASTM C 125 define o tamanho máximo do agregado de duas formas distintas:

1) Tamanho máximo – é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas da amostra de agregado. Na metodologia SHRP-Superpave o tamanho máximo do agregado é definido como a abertura de malha imediatamente maior do que a correspondente ao tamanho nominal máximo;

2) Tamanho máximo nominal – é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em peso. Na

metodologia SHRP-Superpave o tamanho nominal máximo é definido como a abertura de malha de peneira imediatamente maior do que a da primeira peneira a reter mais de 10% do material.

### *3.1.3.3 Graduação contínua*

Segundo Cunha (2004), a melhor mistura asfáltica, em termos de estabilidade, seria uma em que as partículas de agregados ficassem completamente adensadas, devido ao aumento de contato entre estas e um decréscimo na quantidade de vazios da mistura. Porém, na prática, isso não é possível, pois é necessário que haja volume de vazios suficientes para a adição de ligante asfáltico, capaz de proporcionar maior coesão e durabilidade à mistura, sendo necessários também para evitar a exsudação do ligante e/ou a deformação permanente da mistura sob esforços solicitantes, como o tráfego. Sendo assim, uma mistura que apresente volume de vazios baixos é mais sensível a alterações na quantidade de asfalto, tornando-se mais susceptível a exsudação e deformações permanentes.

De acordo com Roberts et al. (1991, apud CUNHA, 2004), uma graduação com densidade máxima pode não conter uma quantidade suficiente de vazios, necessários para que haja uma adequada espessura de película de cimento asfáltico envolvendo as partículas de agregado. Portanto, para se conseguir uma adequada quantidade de vazios na mistura asfáltica, a graduação deve estar a uma certa distância da linha de máxima densidade. Dessa forma, os órgãos rodoviários tentam estabelecer curvas granulométricas que sejam aproximadamente paralelas a linha de densidade máxima, com alguns pontos acima ou abaixo, para alcançar um volume adequado de Vazios no Agregado Mineral – VAM.

Por este motivo, materiais de baixa qualidade para uso em misturas asfálticas devem ser tratados com curva granulométrica abaixo da linha de densidade máxima, o que diminui os efeitos negativos nesses materiais na mistura. Já para material britado, cúbicos e angulares, o trecho da curva granulométrica deve passar acima da linha de máxima densidade, para que possam ser utilizados os benefícios desse material (ROBERTS et al., 1991 apud CUNHA, 2004).

### *3.1.3.4 Graduação descontínua*

Apresenta curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos (BERNUCCI et al., 2008). Alguns tipos de misturas asfálticas apresentam esse tipo de graduação nos agregados, como a matriz pétreia de asfalto ou a mistura gap-graded; ambas serão discutidas posteriormente.

Assim, misturas que apresentem graduação descontínua tendem a resistir aos esforços provenientes do tráfego através de uma grande quantidade de partículas graúdas de agregados, já que estas formam o esqueleto da mistura, ao invés de utilizar a maior densidade máxima possível. Devido ao grande contato entre o agregado graúdo, a resistência à deformação permanente aumenta e a dependência da quantidade e/ou tipo de ligante diminui. Misturas assim, como o SMA (Stone Matrix Asphalt) ou a CMHB (Coarse Matrix High Binder) são consideradas descontínuas por possuírem grande proporção de agregados maiores e filer mineral, com pouca presença de agregados médios (IZZO et al., 1997 apud CUNHA, 2004).

Outro ponto importante a respeito desse tipo de mistura está no fato de apresentarem maior quantidade de ligante asfáltico do que as que possuem graduação contínua. Por conta disso e somada a grande quantidade de filer presente, ocorre a formação de um mástique, que acaba preenchendo os vazios deixados pelas partículas de agregados graúdos. Dessa forma, aumenta a resistência da mistura ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga. Além disso, as propriedades físicas dos agregados têm importância relevante em seu desempenho. Assim, para este tipo de mistura a qualidade dos materiais deve ser ainda maior, já que o esqueleto de agregado graúdo é o que suporta as cargas provenientes do tráfego (CUNHA, 2004).

### *3.1.3.5 Graduação Bailey*

De acordo com Gouveia (2006), o método Bailey apresenta, fundamentalmente, ferramentas que permitem avaliar a combinação de agregados,

levando-se em conta as características superficiais que possuem: forma, angularidade e textura. É assim que se obtém granulometrias que satisfaçam as necessidades do pavimento ao qual a mistura é designada.

Segundo Vavrik et al. (2002, apud CUNHA, 2004), o Método Bailey para seleção granulométrica de agregados tenta unir os benefícios encontrados em misturas densas (contínuas) com os encontrados em misturas descontínuas. Este método busca fazer a seleção granulométrica ideal através das curvas granulométricas dos agregados utilizados, de suas massas específicas e das massas unitárias soltas e compactadas. Dessa forma é assegurada a resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos agregados graúdos e, também, a resistência ao desgaste por apresentar um maior teor de ligante asfáltico devido ao volume de vazios adequado.

#### 3.1.4 Características dos agregados para pavimentação

Segundo Roberts et al. (1996, apud BERNUCCI et al., 2008) a seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação. São as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a possibilidade de uso em misturas asfálticas e, em menor expressão, as propriedades químicas das partículas. Algumas propriedades físicas e mecânicas básicas são: a resistência, a porosidade e a densidade. Propriedades físico-químicas tais como umidade e adesividade são função da composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores. As propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no seu desempenho, exceto quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivos antidescolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico.

##### *3.1.4.1 Densidades e massas específicas*

###### 1) Densidade real do agregado miúdo

Segundo Senço (2001), é a relação entre o peso ao ar de um dado volume de material a uma determinada temperatura e o peso ao ar de um igual volume de água destilada a uma determinada temperatura. A obtenção da densidade real de um agregado é feita da mesma maneira feita para os solos. Utiliza-se um frasco de boca larga, de vidro, de tara conhecida. Determina-se a massa em três situações: (c) frasco contendo a amostra; (b) frasco com água até uma referência; (d) frasco com amostra e água até a referência. Dessa forma, usa-se a Equação 1 para definir a densidade do agregado:

$$D = \frac{(c-a)}{(b-a)-(d-c)} \quad (1)$$

Sendo (a) = tara do frasco.

## 2) Densidade aparente agregado graúdo

É a relação entre a massa de uma certa porção de agregado em estado seco e o volume que essa massa ocupa na condição submersa, em determinado recipiente com água. A determinação da massa específica aparente ( $D_{ap}$ ) é feita de forma simples, seguindo-se os procedimentos contidos na norma brasileira DNER – ME 081/1998 – Agregados – determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. A massa específica aparente será dada pela Equação 2 (SENÇO, 2001):

$$D_{ap} = \frac{m_s}{V_1} \quad (2)$$

Onde:

$m_s$  = massa seca em estufa do agregado;

$V_1$  = volume deslocado, equivalente a massa submersa do agregado, em  $\text{cm}^3$ ;

## 3) Densidade efetiva

A densidade efetiva ( $D_{ef}$ ), em  $\text{g/cm}^3$ , é determinada quando se trabalha com misturas asfálticas cujo teor de ligante asfáltico seja conhecido. É calculada através da relação entre a massa seca da amostra e o volume efetivo do agregado. O

volume efetivo é constituído pelo volume do agregado sólido e o volume dos poros permeáveis à água que não foram preenchidos pelo asfalto. É importante salientar que a densidade efetiva não é comumente medida diretamente, sendo frequentemente tomada como a média entre a densidade real e a aparente (BERNUCCI et al., 2008).

#### 3.1.4.2 Absorção d'água no agregado

De acordo com Bernucci et al. (2008), a porosidade de um agregado é normalmente indicada pela quantidade de água que ele absorve quando imerso. Um agregado poroso irá também absorver ligante asfáltico, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica. Para compensar esse fato, deve-se incorporar à mistura asfáltica uma quantidade adicional de ligante. A absorção é a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão (DNER-ME 081/98) à temperatura ambiente e a massa inicial de material seco, sendo determinada para permitir o cálculo das massas específicas real e aparente, do agregado.

Senço (2001) afirma que o procedimento é deixar uma certa porção de agregado imersa em água por 24 horas. Em seguida, enxugam-se as pedras com toalha e determina-se o peso da amostra saturada (Mh). Em seguida põe-se para secar em estufa a 100-110°C e, após resfriamento, pesa-se novamente, obtendo o peso seco (Ms). A absorção de água será calculada pela Equação 3:

$$s(\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 \quad (3)$$

#### 3.1.4.3 Adesividade ao ligante asfáltico

Entende-se como o efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Os ensaios para determinação das características de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos: aqueles que avaliam o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico e aqueles que avaliam o desempenho de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da

água.

No método DNER-ME 078/94 a mistura asfáltica não-compactada é imersa em água e as partículas cobertas pelo ligante asfáltico são avaliadas visualmente. Na norma ASTM D 1075 a resistência à compressão simples (RC') de amostras de misturas compactadas após imersão em água a 50°C durante 24 horas é comparada com a resistência de amostras idênticas não-imersas (RC). A redução da resistência à compressão simples é uma indicação da qualidade do agregado em relação à adesividade. A relação de perda de resistência pelo efeito da água é dada por  $RC'/RC$ . Para que se considere aceitável a mistura quanto à adesividade, essa relação deve ser superior ou igual a 0,75, ou seja, a perda deve ser menor ou igual a 25% (BERNUCCI et al. 2008).

#### *3.1.4.4 Forma e textura superficial das partículas*

Segundo Bernucci et al. (2008), a forma das partículas influencia a trabalhabilidade e a resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, além de interferir na energia de compactação necessária para se alcançar determinada densidade. Para complementar, Marques (2001, apud MENDES, 2011) afirma que as partículas desejáveis para serem utilizadas em misturas asfálticas são aquelas que possuem forma cúbica. Partículas que possuam forma angular acabam gerando misturas com maior intertravamento e maior atrito interno, quando compactadas, o que resulta em maior estabilidade mecânica. Porém, para misturas com maior trabalhabilidade e menor esforço de compactação, são necessárias partículas arredondadas. Vale ressaltar que a longo prazo, essa facilidade de compactação pode não ser positiva, já que a mistura pode continuar a se densificar sob ação do tráfego, levando a deformações permanentes no pavimento.

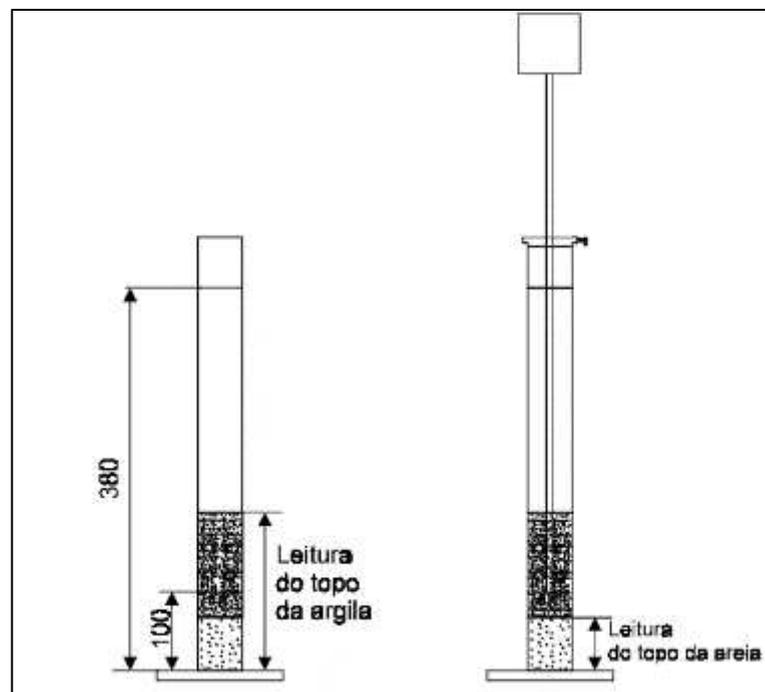
#### *3.1.4.5 Limpeza do agregado – equivalente de areia*

Este ensaio se baseia nas normas DNER-ME 054/1997 e ASTM D 2419. O equivalente de areia, de acordo com Senço (2001), é entendido como a relação volumétrica correspondente 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 fino, numa proveta, em condições estabelecidas no método (Figura 10). É um ensaio que procura determinar a pureza ou limpeza de um solo em relação à percentagem de argila/materiais deletérios que ele contém.

O termo “equivalente de areia” expressa a ideia de que a maioria dos solos, bases de cascalhos etc. são misturas de partículas graúdas, areia e, geralmente, indesejáveis partículas finas ou argila. O ensaio do equivalente de areia constitui um meio rápido para separar as partículas mais finas, como as argilas, dos grãos mais graúdos ou das areias, sendo as proporções relativas comparadas em uma base arbitrária de volumes por um processo simples, que tende a realçar ou expandir o volume de argila proporcionalmente aos efeitos prejudiciais ou indesejáveis dessa fração (GOUVEIA, 2006, p. 20).

Figura 10 - Leituras do ensaio equivalente de areia



Fonte: adaptado de DNER (1997).

#### 3.1.4.6 Características mecânicas dos agregados

Segundo Senço (2001), as características mecânicas podem ser consideradas umas das mais importantes, tendo em vista as funções que o agregado deve exercer enquanto componente das camadas de um pavimento. Dois ensaios merecem destaque para análise de tais propriedades: (i) abrasão Los Angeles; (ii) índice de degradação por compactação Marshall, com ligante ( $ID_{ML}$ ) e sem ligante ( $ID_M$ ). O primeiro é regido pela norma brasileira DNER – ME 035/1998 e o segundo

pela norma, também brasileira, DNER – ME 401/1999.

### 3.1.5 Misturas asfálticas

Segundo Yoder e Witczak (1975), o propósito da camada superficial do pavimento (revestimento asfáltico) é prover uma superfície que dê segurança e suavidade ao motorista. Para isso, essa camada deve possuir resistência à derrapagem, resistir a fraturas associadas a cargas de veículos ou não, e resistir à deformação permanente. Vários requisitos, tanto funcionais como estruturais, são considerados na camada de revestimento.

Por conta do alto número de materiais betuminosos disponíveis para construção de pavimentos e também ao alto número de técnicas construtivas, vários tipos de revestimentos asfálticos podem ser aplicados. O tipo de revestimento depende largamente do carregamento ao qual o pavimento terá que suportar, assim como do fator econômico e viabilidade de construção (YODER e WITCZAK, 1975).

Bernucci et al. (2008) afirma que o material de revestimento pode ser fabricado em usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparado na própria pista (tratamentos superficiais). Os revestimentos são também identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de CAP, ou a frio com o uso de EAP. As misturas usinadas podem ser separadas quanto à distribuição granulométrica em: densas, abertas, contínuas e descontínuas.

Misturas asfálticas preparadas em usina central são tradicionalmente conhecidas como misturas usinadas. O concreto asfáltico é considerado o tipo de mistura usinada de maior qualidade. Emulsões asfálticas são fluidas o bastante para serem misturadas com agregados em temperaturas mais baixas, variando de moderadas a quentes. No caso de tal mistura ocorrer na área a ser pavimentada, chama-se de misturas-in-loco (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989).

Neste trabalho será dado foco a um tipo de misturas: as misturas a quente. Assim, Bernucci et al. (2008) subdivide esse tipo da seguinte forma:

- i. Com graduação densa – é a que apresenta agregados com curva granulométrica contínua e bem-graduada, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. O concreto asfáltico (CA) é um exemplo;

ii. Com graduação aberta – é a que apresenta agregados com curva granulométrica uniforme, quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores. Isso torna a mistura drenante, por ter elevado volume de vazios com ar, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. A camada porosa de atrito (CPA) é um exemplo deste tipo;

iii. Com graduação descontínua – é a que apresenta agregados com curva granulométrica apresentando grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras. Isso faz com que o esqueleto mineral seja mais resistente à deformação permanente, já que há um maior número de contatos entre os agregados graúdos. A matriz pétreo asfáltica (stone matrix asphalt – SMA) é o exemplo desse tipo de mistura.

#### *3.1.5.1 Concreto asfáltico - CAUQ*

De acordo com o Asphalt Institute (1989), o concreto asfáltico consiste de agregado de alta qualidade, bem graduado e cimento asfáltico. Cada componente é aquecido separadamente, em temperaturas que vão de 121 a 163°C, então são mensurados e proporcionados para posterior mistura, até as partículas de agregado estarem todas cobertas pelo ligante. A mistura quente, e mantida aquecida durante o transporte, é levada ao local de aplicação para ser espalhada e posteriormente compactada por rolos compactadores, até atingir a devida densidade antes da mistura perder calor.

Segundo Balbo (2007), o concreto asfáltico é um material designado para a construção de revestimentos de pavimentos, sendo incluso capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos, obtido a partir de mistura e homogeneização de agregados pétreos (naturais ou artificiais, em sua forma disponível ou britados), em geral com boa graduação, de material de enchimento – filer e de CAP. Trata-se de uma mistura efetuada a quente, em usina misturadora (central de usinagem), contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte.

Bernucci et al. (2008) diz ainda que graças ao arranjo de partículas com

graduação bem-graduada, a quantidade de ligante asfáltico que o CA necessita para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não pode ser muito elevada, pois a mistura necessita contar ainda com vazios com ar após a compactação em torno de 3 a 5%, no caso de camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos) e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação (camada abaixo a de rolamento). Este será o tipo de revestimento aplicado no presente estudo.

### *3.1.5.2 Camada porosa de atrito – CPA*

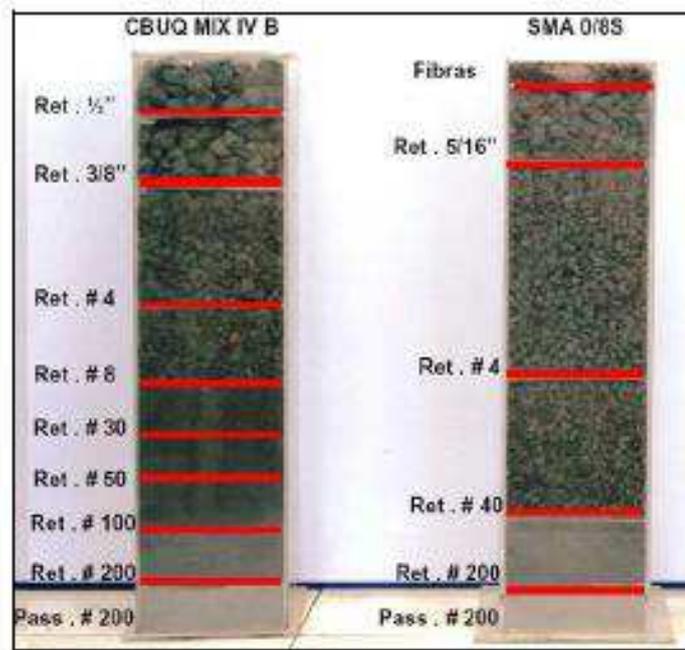
Como já mencionado, a Camada Porosa de Atrito – CPA, é considerada uma mistura asfáltica aberta, apresentando alta porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de material de enchimento, de agregado miúdo e ligante asfáltico. É, geralmente, empregada como camada de rolamento com a finalidade de aumentar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Além disso, esse tipo de revestimento tem características importantes como proporcionar redução na espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e por consequência, a diminuição da distância de frenagem; reduz o spray de água que é borrifado pelos pneus dos veículos, melhorando a visibilidade; além de reduzir, também, a reflexão da luz dos faróis noturnos. Outro fator importante é a capacidade de reduzir o ruído ao rolamento dos pneus. De acordo com a DNER-ES 386/99, esta mistura a quente apresenta entre 18% e 25% de vazios com ar (BERNUCCI et al., 2008).

### *3.1.5.3 Stone Matrix Asphalt – SMA*

Em português, chama-se matriz pétreo asfáltica. É uma mistura criada na Alemanha, década de 1960, e que tem como característica principal a alta resistência à reflexão por trincas e à deformação permanente, diferentemente do que ocorre com as misturas asfálticas densas convencionais. Pazinato (2014) afirma que o SMA é uma mistura asfáltica com elevado teor de agregados graúdos compondo a estrutura ou o esqueleto mineral e descontinuamente uma argamassa composta de uma elevada porcentagem de finos (filer, pó de pedra, fibra de celulose e ligantes asfálticos modificados por polímero). O comportamento em serviço destas misturas se dá

através de uma estrutura composta por agregados duros, unidos através de elevada coesão de uma argamassa asfáltica, que preenche os vazios dos agregados. As misturas dos tipos CAUQ possuem uma faixa granulométrica contínua enquanto o SMA é uma mistura descontínua, como se vê na Figura 11.

Figura 11 - Granulometria de CAUQ e SMA



Fonte: Pazinato (2014).

Bernucci et al. (2008) acrescenta que o SMA se aplica em diversas situações, como por exemplo: vias com alta frequência de caminhões; interseções; áreas de carregamento e descarregamento de cargas; rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus; pistas de aeroporto; estacionamentos; portos. E entre as principais características de desempenho do SMA, pode-se citar: boa estabilidade a elevadas temperaturas; boa flexibilidade a baixas temperaturas; elevada resistência ao desgaste; boa resistência à derrapagem devido à macrotextura da superfície de rolamento; redução do spray ou cortina de água durante a chuva; redução do nível de ruído ao rolamento.

### 3.2 Método Bailey

Segundo Manjunath e Poornachandra (2014), são inúmeros os tipos de misturas desenvolvidas ao longo do tempo com o objetivo de se alcançar propriedades desejadas em um revestimento, como por exemplo, durabilidade, permeabilidade, dureza, estabilidade, entre outras. No entanto, outro ponto de controle que afeta diretamente as propriedades de uma mistura asfáltica é a graduação dos agregados. Uma estrutura forte de agregados é requisito muito importante na concepção da mistura asfáltica, uma vez que os agregados suportam a maior parte das forças vindas do tráfego.

O processo experimental para garantir uma boa estrutura de agregados leva tempo e pode ser muito oneroso, não só em termos de custos laboratoriais, mas também no atraso do projeto, já que há a possibilidade de se esperar a aprovação da mistura. Nos dias atuais, com o mundo muito competitivo, atrasos longos são inaceitáveis. Aqui é onde o Método Bailey pode ser bem útil e valioso (JONES, 2006).

Tradicionalmente, misturas asfálticas são desenvolvidas usando um procedimento de tentativas e erros na seleção da graduação de agregados. Agregados são combinados em porcentagens típicas, desenvolvidas após anos de experiência prática. O Método Bailey é uma abordagem sistemática para relacionar agregados tendo como objetivo garantir um intertravamento adequado da estrutura e uma graduação contínua balanceada para completar a mistura. O método fornece uma série de ferramentas que viabiliza a avaliação de conjuntos de agregados (TRB, 2002).

O Método Bailey foi, originalmente, desenvolvido pelo engenheiro, já aposentado, Sr. Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois, entre o fim dos anos 70 e início dos anos 80. Este método é baseado em sua experiência na concepção de misturas asfálticas. Bailey desenvolveu esse método como um meio de combater a quebra de misturas asfálticas ao mesmo tempo em que mantinha características de durabilidade adequadas. Jones (2006) acrescenta que Bailey começou a usar essa ferramenta analítica para prever propriedades volumétricas das misturas e oferecer sugestões na hora de decidir mudanças de graduação necessárias que atendessem requisitos volumétricos preestabelecidos.

Blow (2009) afirma, ainda, que este método traz um procedimento que assegura que misturas bem graduadas, densas possuam uma estrutura, esqueleto mineral muito forte. O método opera por meio do princípio de que, quando compactadas, as partículas graúdas da mistura estabelecem espaços vazios que são preenchidos por ligante asfáltico, ar e as partículas menores. As maiores partículas de agregado miúdo se estabelecem nesses vazios, mas também criando espaços vazios menores, que serão preenchidos pelas menores partículas do agregado miúdo. O volume desses vazios e a distribuição de agregados com tamanhos diferentes resulta em um determinado valor de VAM, vazios com ar e na estabilidade da mistura pós compactação.

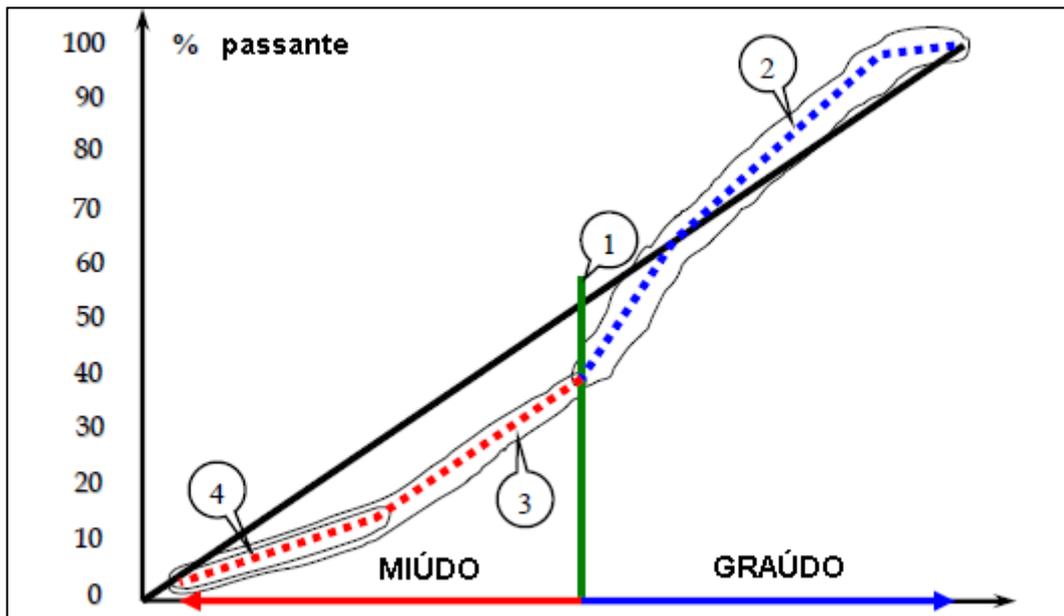
### 3.2.1 Princípios do Método Bailey

De acordo com Aurilio, Pine e Lum (2005), existem quatro princípios fundamentais a se considerar na utilização do Método Bailey:

- 1) Determinar o que é agregado graúdo e agregado miúdo, qual cria vazios e qual preenche esses vazios, e qual deles controla a estrutura de agregados.
- 2) O conjunto da fração de agregado graúdo influencia no empacotamento da fração de agregado miúdo.
- 3) A fração graúda de agregado miúdo se relaciona com o empacotamento da porção total de agregados miúdos na mistura.
- 4) A fração miúda de agregado miúdo se relaciona com o empacotamento da porção fina da graduação da mistura.

O processo de avaliação da mistura se dá na observação de cada porção de agregado, separadamente, na curva de graduação (Figura 12). Cada um dos quatro princípios tem um papel específico no VAM ou no esqueleto estrutural da mistura final. Também se relacionam em como se dará a compactação e suscetibilidade a segregação da mistura em campo (AURILIO, PINE e LUM, 2005).

Figura 12 - Princípios do Método Bailey na curva de graduação



Fonte: adaptado de Aurilio, Pine e Lum (2005).

Mendes (2011) indica que o Método Bailey segue dois princípios básicos, sendo eles o arranjo de agregados e a separação entre agregados miúdos e graúdos, que se diferencia das definições utilizadas normalmente. O método é aplicado pela combinação dos agregados em volume, e não em massa.

### 3.2.2 Arranjo de agregados

Como já dito, o Método Bailey proporciona um melhor arranjo de agregados, garantindo um intertravamento entre as partículas mais eficiente. Alguns fatores influenciam no preenchimento de vazios de uma mistura de agregados, embora nunca haja preenchimento total destes vazios (VAVRIK et al., 2002 apud MENDES, 2011):

- Tipo e quantidade de energia de compactação → diferentes energias de compactação levam a uma maior ou menor compactação das misturas, assim como a quantidade de energia aplicada na mistura pode fazê-lo.
- Forma dos agregados → como já dito antes, as partículas cúbicas tendem a gerar misturas mais estáveis do que as que apresentam agregados lamelares.

- Textura superficial das partículas → as partículas que apresentam superfície lisa tendem a se deslocar e mudar sua orientação mais facilmente do que as rugosas, que resistem mais ao deslizamento entre si.
- Graduação dos agregados → os vazios gerados por agregados maiores podem ser preenchidos pelos menores, quando a mistura for composta por diferentes tamanhos de agregados.
- Resistência das partículas → a degradação é um fator diretamente relacionado com a resistência dos agregados, ocorrendo desde a etapa de compactação e também durante a vida do pavimento, devido às cargas oriundas do tráfego.

### 3.2.3 Agregado graúdo e miúdo no Método Bailey

Cunha (2004) afirma que, de acordo com a ASTM C 294/89, agregado graúdo é todo material retido na peneira 4,75mm e, dessa forma, todo material que passa na referida peneira é considerado agregado miúdo, independentemente do tamanho máximo nominal do material.

Pelo Método Bailey, a definição de agregado graúdo e miúdo é diferente, sendo mais específica, buscando determinar a compactação e o intertravamento do agregado através da combinação de agregados de vários tamanhos. Assim, seguindo a definição do método, os agregados graúdos são as partículas que formam volume de vazios capazes de serem preenchidos por partículas de tamanhos menores. E, conseqüentemente, as partículas que preenchem esses vazios deixados pelos agregados graúdos são consideradas agregado miúdo (CUNHA, 2004).

Segundo Mendes (2011), para garantir esse controle e poder diferenciar os agregados graúdos dos miúdos, o Método Bailey faz uso da chamada Peneira de Controle Primário (PCP), que se baseia no tamanho máximo nominal da mistura (TMN). A PCP é considerada como sendo a peneira com o diâmetro de abertura mais próximo do resultado da Equação 4 (Figura 13).

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (4)$$

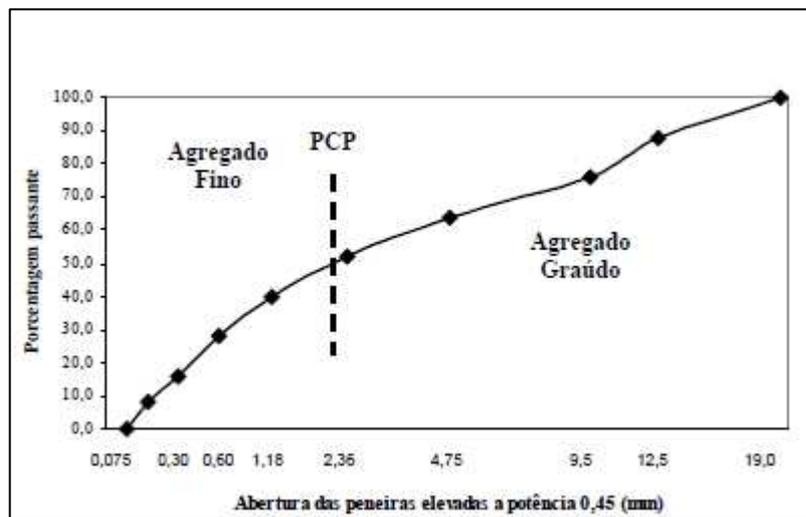
Onde:

PCP = Peneira de Controle Primário;

TMN = Tamanho máximo Nominal;

Deve-se ressaltar que o fator 0,22 usado na determinação da peneira de controle primário é resultado de análises, em duas (2D) e três dimensões (3D) do arranjo de agregados com diferentes formas. Ficou concluído que valores entre 0,18 e 0,28 são ideais para diferentes tipos de agregados, então fixou-se o valor de 0,22 como padrão da equação (VAVRIK et al., 2002 apud MENDES, 2011).

Figura 13 - Divisão de agregado graúdo e miúdo pela PCP para um TMN de 9,5mm



Fonte: Cunha (2004).

### 3.2.4 Combinação volumétrica dos agregados

Cunha (2004) afirma que toda e qualquer mistura asfáltica contém volume de vazios, este sendo função das características de compactação da própria mistura, do arranjo de agregados, entre outros fatores. É possível determinar a quantidade de vazios deixados pelos agregados graúdos na composição da mistura, podendo preenchê-los com uma quantidade apropriada de agregado miúdo.

A dosagem de misturas asfálticas é baseada em métodos volumétricos, mas por outro lado, os agregados acabam sendo combinados por peso, o que simplifica o processo de dosagem. A maioria dos métodos de dosagem faz a correção da porcentagem passante em peso pela porcentagem em volume, quando há diferença significativa entre as densidades dos materiais (VAVRIK et al., 2002 apud FENGLER, 2015).

No intuito de avaliar o intertravamento de misturas asfálticas, faz-se necessário conhecer os dados volumétricos da estrutura de vazios. Os dados que devem ser conhecidos são as massas específicas solta e compactada de cada agregado graúdo utilizado e a massa específica compactada de cada agregado miúdo empregado na mistura (MENDES, 2011). Estes dados volumétricos são capazes de representar como os agregados irão se dispor estruturalmente, formando vazios de ar, sendo importantes e necessários para fazer a avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados.

### 3.2.5 Propriedades de compactação

#### 3.2.5.1 Massa específica solta do agregado graúdo

De acordo com Cunha (2004), a massa específica solta pode ser entendida como a quantidade de agregados necessária para preencher um determinado recipiente, sem qualquer tipo de esforço de compactação, representando assim, a situação de mínimo contato entre partículas (Figura 14). O volume do dito recipiente é variável, dependendo do tamanho máximo nominal dos agregados da mistura.

Figura 14 - Determinação da massa específica solta



Fonte: Vavrik et al. (2002, apud MENDES, 2011).

A norma que prescreve este ensaio é a americana AASHTO T-19/2009: Massa específica e Vazios no Agregado ou também a norma brasileira NBR NM 45/2006. Ao se relacionar a massa do agregado pelo volume do recipiente, tem-se a massa específica solta. O volume de vazios na condição solta, ou seja, quando há

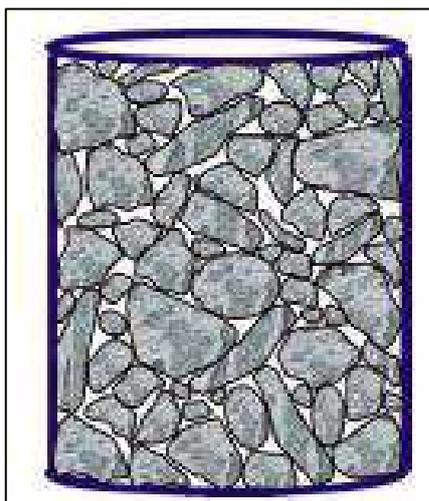
mínimo contato entre agregados, é obtido através da massa específica e da massa específica solta (MENDES, 2011).

### 3.2.5.2 Massa específica compactada do agregado graúdo

A massa específica compactada é aquela que representa a quantidade de agregado necessária para preencher um determinado recipiente, podendo variar o tamanho nominal máximo. Por meio de um esforço de compactação, o volume de vazios da amostra acaba sendo reduzido, aumentando assim, o contato entre as partículas de agregados ensaiados (VAVRIK et al., 2002 apud FENGLER, 2015).

Mendes (2011) diz que, assim como a massa específica solta do agregado graúdo, a determinação da massa específica compactada é feita segundo da AASHTO T-19/2009: Massa Específica e Vazios no Agregado. Sua determinação ocorre pela relação entre a massa de agregado pelo volume do recipiente (Figura 15). Nesta condição, os agregados encontram-se em maior contato, que foi provocado pelo esforço de compactação e seu volume de vazios pode ser determinado pela massa específica compactada e a massa específica aparente.

Figura 15 - Determinação da massa específica compactada



Fonte: Vavrik et al. (2002, apud MENDES, 2011).

De acordo com Cunha (2004), é necessária a determinação da massa específica compactada tanto da fração graúda como da fração miúda do agregado que constitui a mistura. O volume de vazios para a condição compactada é

determinado usando a massa específica e a massa específica compactada dos agregados.

### 3.2.5.3 Massa específica escolhida do agregado graúdo

O Método Bailey requer que seja escolhida uma massa específica para apresentar um certo grau de intertravamento dos agregados da mistura, chamada então de massa específica escolhida. Partindo-se desta escolha, determina-se o volume de agregados graúdos da mistura e seu nível de intertravamento (VAVRIK et al., 2002 apud FENGLER, 2015).

Mendes (2011) afirma que a partir da definição da massa específica escolhida pode-se dizer se a mistura tem caráter graúdo ou miúdo. O primeiro caso se dá quando seu esqueleto se forma por agregados graúdos e o segundo caso quando a quantidade de agregado graúdo não é suficiente para formação de um esqueleto, ficando por conta dos agregados miúdos (Figura 16).

Figura 16 - Escolha da Massa Específica Escolhida para agregados graúdos



Fonte: Vavrik et al. (2002 apud CUNHA, 2004).

Segundo Cunha (2004) a massa específica solta pode ser considerada o limite inferior de intertravamento do agregado graúdo, sendo considerada a divisão entre uma mistura de graduação miúda e outra de graduação graúda. Por outro lado, a massa específica compactada é tida como o limite superior do intertravamento de agregado graúdo. A escolha de massa específica escolhida menor que a massa específica solta cria muitos espaços entre os agregados graúdos, com partículas

espalhadas e contato não uniforme. Já a escolha de massa específica escolhida próxima da massa específica compactada dificulta a compactação da mistura no campo, requerendo esforço de compactação bem alto para atingir a densidade que se precisa.

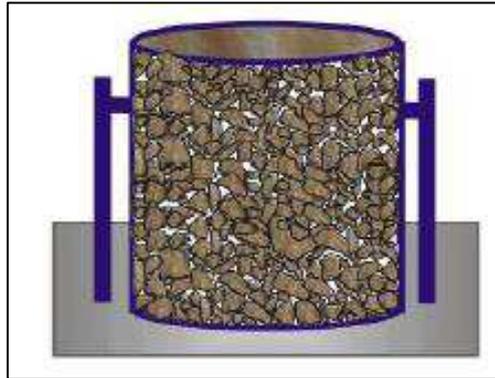
Geralmente, para misturas com graduação densa, determina-se uma massa específica escolhida como sendo porcentagem da massa específica solta. Para de dar à mistura certo grau de intertravamento entre o agregado graúdo, utilizam-se valores entre 95% e 105% para a massa específica escolhida. Agregados que possuam tendência a se degradar facilmente requerem uma porcentagem maior, com massa específica escolhida próxima de 105% da massa específica solta. Para o caso de misturas apresentando graduação miúda, deve-se escolher valores menores que 90% da massa específica solta para a massa específica escolhida, o que garante a mistura apresentar esqueleto estrutural de agregado miúdo (VAVRIK et al., 2002 apud MENDES, 2011).

#### *5.2.5.4 Massa específica compactada do agregado miúdo*

Numa mistura asfáltica, os vazios criados devido ao intertravamento dos agregados graúdos, determinado pela massa específica escolhida, devem ser preenchidos por volume de agregados miúdos, determinado pela massa específica compactada. Para isso, faz-se necessária a determinação da massa específica compactada também do agregado miúdo, de acordo com o que preconiza a norma brasileira NBR NM 45/2006 ou a americana AASHTO T-19/2009 (VAVRIK et al., 2002 apud FENGLER, 2015).

Assim como realizado para o agregado graúdo, a massa específica compactada é calculada dividindo-se o peso do agregado miúdo pelo volume do recipiente preenchido. A massa específica compactada é usada para garantir que a estrutura do agregado miúdo apresente adequada resistência (Figura 17).

Figura 17 - Determinação da massa específica compactada do agregado miúdo



Fonte: Vavrik et al. (2002, apud MENDES, 2011).

De acordo com Mendes (2011), para os agregados que possuem tamanho máximo nominal (TMN) inferior a 4,75mm, é utilizado um molde de metal proctor com 100mm de diâmetro e volume de 0,9 dm<sup>3</sup>, aproximadamente. Já para agregados apresentando TMN maior que 4,75mm, o recipiente utilizado deve seguir o que diz a norma AASHTO T-19/2009.

### 3.2.6 Seleção da granulometria utilizada

Segundo Cunha (2004), para ser feita a seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas densas deve-se ter algumas informações básicas. Pelo Método Bailey, além dessas já ditas informações, há também, outras a serem conhecidas para ser feita a seleção dos agregados, que são as massas específicas dos agregados graúdos e miúdos.

Assim, os parâmetros a se ter conhecimento no Método Bailey são:

- Massa específica de cada agregado;
- Massa específica solta do agregado graúdo;
- Massa específica compactada do agregado graúdo e miúdo;
- Massa específica escolhida do agregado graúdo;
- Quantidade de agregado graúdo e miúdo que se quer na mistura;
- Quantidade de material de enchimento (menor que 0,075mm) que se quer na mistura;

Dito isso, parte-se para os passos a serem realizados durante a seleção de agregados para misturas asfálticas densas, por meio do Método Bailey (VAVRIK et al., 2002 apud MENDES, 2011):

1. Determinar a massa específica solta dos agregados graúdos, em  $\text{kg/m}^3$ ;
2. Calcular o volume de vazios no agregado graúdo, pela massa específica escolhida;
3. Por meio da massa específica compactada do agregado miúdo, em  $\text{kg/m}^3$ , determinar a quantidade de agregado miúdo necessária para preencher os vazios no agregado graúdo;
4. Por meio da massa específica de cada agregado, determinar o peso total do conjunto de agregados e converter para porcentagens individuais de agregados na granulometria;
5. Fazer a correção de quantidade de agregado graúdo em função da quantidade de agregado miúdo que ele apresentar e também corrigir a quantidade de agregado miúdo em função da quantidade de agregado graúdo presente na porção miúda. Isso mantém a mistura adequada, em termos volumétricos, para as quantidades de agregado graúdo e miúdo;
6. Determinar as porcentagens ajustadas de cada agregado na mistura, em peso;
7. No caso de se utilizar material de enchimento (filer), deve-se ajustar a porcentagem de agregado miúdo pela porcentagem desejada de agregado miúdo na mistura, visando garantir uma mistura adequada, em volume, de agregado graúdo e miúdo;
8. Determinar as porcentagens finais revisadas de agregados, em peso, para assim ser calculada a granulometria final;

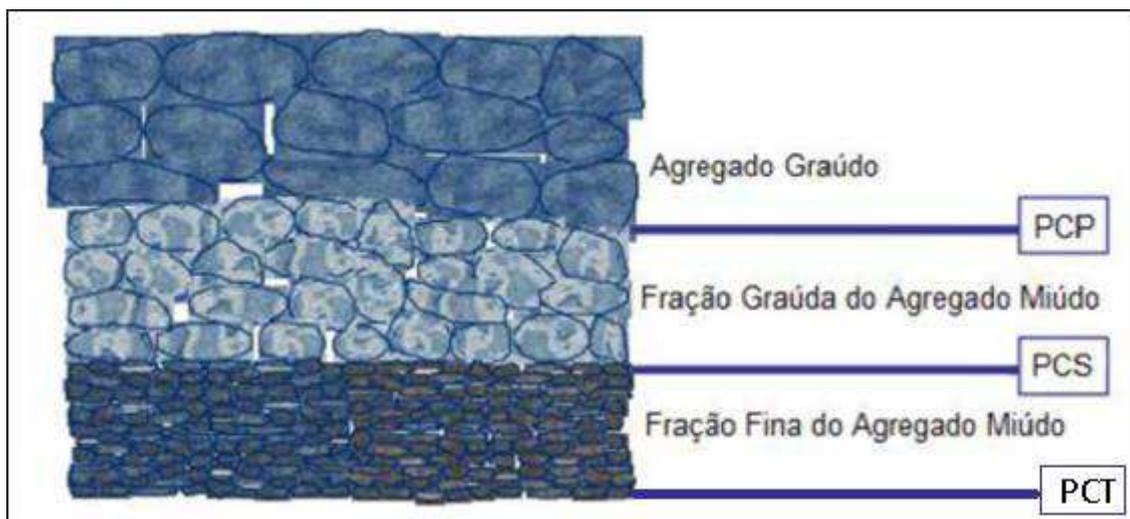
### 3.2.7 Análise de misturas de projeto

Segundo Vavrik et al. (2002, apud FENGLER, 2015), o passo seguinte à determinação da graduação da mistura é fazer a divisão da mesma em três porções distintas, para poderem ser avaliadas individualmente (Figura 18):

- A porção graúda → contendo a dimensão do maior agregado presente na mistura até a dimensão correspondente à peneira de controle primário (PCP);
- A porção graúda do agregado miúdo → contendo a dimensão correspondente à PCP até a dimensão da peneira de controle secundário – PCS. Esta corresponde à PCP multiplicada pelo fator 0,22;
- A porção miúda do agregado miúdo → contendo a dimensão do agregado passante na PCS;

Fora as peneiras supracitadas, há, também, outras peneiras de controle, como a Peneira Média (PM), correspondendo à dimensão mais próxima da metade do TMN, e a Peneira de Controle Terciário (PCT), correspondente à dimensão da PCS multiplicada pelo fator 0,22 (MENDES, 2011).

Figura 18 - Porções de agregados no Método Bailey



Fonte: Adaptado de Vavrik et al. (2002 apud MENDES, 2011).

Dessa forma, ficam definidos os três parâmetros das porções de agregados no Método Bailey: Proporção de agregados graúdos – AG; Proporção graúda de agregado miúdo – GAM; Proporção miúda de agregado miúdo – FAF. De acordo com mudanças nas proporções citadas, alterações serão sofridas nas características de compactação do conjunto de agregados (CUNHA, 2004).

### 3.2.8 Parâmetros do Método Bailey

#### 3.2.8.1 Proporção de Agregado Graúdo - AG

Segundo Cunha (2004), o valor dessa proporção de agregado graúdo na mistura indica o grau de compactação das partículas graúdas e, conseqüentemente, os vazios gerados por elas. É calculada de acordo com a Equação 5:

$$\text{Proporção AG} = \frac{\% \text{passante na PM} - \% \text{passante na PCP}}{100\% - \% \text{passante na PM}} \quad (5)$$

Onde:

AG – Agregado Graúdo;

PM – Peneira Média;

PCP – Peneira de Controle Primário;

A proporção AG indica o grau de compactação da porção de agregado graúdo, por isso pode ser considerada o fator mais importante na seleção de agregados para a mistura, seguindo o Método Bailey. Caso a Proporção AG seja reduzida, a compactação da porção de agregado miúdo acaba aumentando, já que o número de partículas passantes na PM se reduz (MENDES, 2011).

Seguindo o apresentado na Tabela 2, no caso da Proporção AG atingir valores próximos de 1,0, o volume de vazio no agregado mineral (VAM) tende a aumentar, já que as partículas passantes na PM ficam em maior quantidade na mistura e, assim, a mistura apresenta maior dificuldade de compactação. Por outro lado, caso a Proporção AG tenha valores abaixo da faixa recomendada, a mistura passa a ser suscetível a segregação, necessitando de uma forte estrutura de agregados miúdos para atender a requisitos volumétricos (CUNHA, 2004).

#### 3.2.8.2 Proporção Graúda de Agregado Miúdo - GAM

O agregado passante na PCP pode ser considerado uma mistura por si só, já que apresenta uma fração graúda e uma porção miúda, assim pode-se avaliá-lo separadamente para cada fração. A porção graúda de agregado miúdo, da mesma forma que a porção de agregado graúdo, forma vazios na mistura que serão

preenchidos pela porção miúda de agregado miúdo (CUNHA, 2004). Os valores da Proporção GAM podem ser calculados de acordo com a Equação 6:

$$\text{Proporção GAM} = \frac{\%passante na PCS}{\%passante na PCP} \quad (6)$$

Onde:

GAM – Graúdo de Agregado Miúdo;

PCS – Peneira de Controle Secundário;

PCP – Peneira de Controle Primário;

Para valores altos na Proporção GAM, o volume da fração miúda de agregado miúdo aumenta e, portanto, as partículas miúdas (aquelas que passam na PCP) apresentam maior grau de compactação. Dessa forma, diz-se que valores abaixo de 0,50 são ideais para essa proporção, já que evitam um excesso de fração miúda dos agregados miúdos (VAVRIK et al., 2002 apud FENGLER, 2015).

Mendes (2011) acrescenta, ainda, que valores menores dos que os mostrados na Tabela 2 resultam em graduações não uniformes na mistura em questão, o que se traduz em instabilidade e requer maior esforço de compactação no campo, além de influenciar no valor do VAM.

### 3.2.8.3 Proporção Miúda de Agregado Miúdo - MAM

Esta fração do agregado tem o papel de preencher os vazios deixados pela porção graúda do agregado miúdo, além de indicar o grau de compactação da fração miúda de agregado miúdo (CUNHA, 2004). Os valores da Proporção MAM podem ser encontrados pela Equação 7:

$$\text{Proporção MAM} = \frac{\%passante na PCT}{\%passante na PCS} \quad (7)$$

Onde:

MAM – Miúdo de Agregado Miúdo;

PCT – Peneira de Controle Terciário;

PCS – Peneira de Controle Secundário;

A Proporção MAM é usada para avaliar as características de compactação/empacotamento da menor porção da mistura de agregados. Similar à Proporção GAM, os valores da Proporção MAM devem ser inferiores a 0,50 para misturas densas típicas. Valores pequenos na Proporção MAM se traduzem em altos valores de VAM (AURILIO, PINE e LUM, 2005).

Abaixo segue a Tabela 3, mostrando as dimensões típicas de cada peneira de controle, variando de acordo com o TMN, em mm, do agregado.

Tabela 2 - Faixas de proporções recomendadas

Proporção	Tamanho Máximo Nominal, em mm				
	37,5	25	19	12,5	9,5
AG	0,80 - 0,95	0,70 - 0,85	0,60 - 0,75	0,50 - 0,65	0,40 - 0,55
GAM	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,51	0,35 - 0,52
MAM	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,51	0,35 - 0,52

Fonte: Adaptado de Vavrik et al. (2002 apud MENDES, 2011).

Tabela 3 - Peneiras de controle dos agregados na mistura

	TAMANHO MÁXIMO DO AGREGADO (MM)					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	
PM	19,0	12,5	9,5	6,25	4,75	
PCP	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	
PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	
PCT	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	

Fonte: Adaptado de Vavrik et al. (2002 apud MENDES, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção trata de todos os materiais utilizados no presente estudo, bem como dos procedimentos laboratoriais realizados, necessários para caracterização dos, já citados, materiais a fim de se atender aos requisitos estabelecidos em normas para preparação de mistura asfáltica, tanto no método convencional como no Método Bailey.

### 4.1 Agregados

Para início do trabalho, buscou-se realizar a caracterização básica dos agregados a serem utilizados no estudo em questão. Foram realizados ensaios usuais na definição de uma mistura asfáltica densa, somados a ensaios específicos do Método Bailey.

Os agregados utilizados neste estudo (Figura 19) para confecção de mistura asfáltica densa são provenientes da empresa Edeconsil Construções e Locações LTDA, com sede em São Luís – MA, obtidos por meio de doação a esta Universidade Estadual do Maranhão, Campus Paulo VI – São Luís/MA. Os tipos de agregados utilizados nos ensaios laboratoriais para este estudo foram: brita 1, com dimensão entre 19-9,5mm; brita 0, com dimensão entre 9,5mm e 4,8mm; pó de brita, com dimensão menor que 4,8mm e areia, com dimensão menor que 2,0mm.

Figura 19 - Amostras de agregados no laboratório



Fonte: Autoria própria (2017).

No laboratório de Solos e Pavimentação – UEMA, as amostras de cada agregado foram reduzidas de acordo com a NBR ABNT NM 27/2001, a fim de se realizar o primeiro ensaio de caracterização: análise granulométrica. Buscou-se ter o máximo cuidado no manuseio dos materiais, de forma que eles representassem da melhor forma a natureza na qual foram encontrados.

Os ensaios realizados para estes materiais foram:

1. Análise granulométrica para todos os agregados (NBR ABNT 248/2003);
2. Determinação da densidade e da absorção do agregado graúdo (DNER-ME 081/1998);
3. Determinação da abrasão “Los Angeles” do agregado graúdo (DNER-ME 035/1998);
4. Adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico (DNER 078/1994);
5. Índice de forma do agregado graúdo (NBR ABNT 7809/2006);
6. Determinação do índice de degradação após compactação Marshall, IDML (com ligante) e IDM (sem ligante), pela norma DNER-ME 401/1999;
7. Equivalente de areia, para agregado miúdo (DNER-ME 054/1997);
8. Densidade real do agregado miúdo (DNER-ME 084/1995);
9. Determinação da massa específica de agregados miúdos, pelo frasco Chapman (DNER-ME 194/1998);

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

Como já dito anteriormente, segundo Gouveia (2006), os agregados têm um papel muito importante numa mistura asfáltica, já que são responsáveis por suportar a maior parte dos esforços aplicados no pavimento, vindos do tráfego de veículos. Para se ter uma boa graduação da mistura, é de extrema importância a garantia de conhecimento real das granulometrias de cada agregado constituinte da mistura asfáltica final.

A análise granulométrica realizada neste estudo seguiu os procedimentos presentes na norma ABNT NBR 248/2003 – Agregado – Determinação da composição granulométrica, fazendo-se uso das peneiras especificadas pelo DNIT (Figura 20), e

satisfazendo as amostras mínimas para agregados com diferentes dimensões máximas características.

Figura 20 - Série de peneiras utilizadas no ensaio



Fonte: Autoria própria (2017).

Seguindo-se as recomendações da norma brasileira NBR NM 27/2001 – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório, os agregados coletados foram quarteados, colocados em estufa a aproximadamente 110°C para secagem e depois separados nas devidas porções para, assim, ser realizado o ensaio de granulometria em cada um.

O passo seguinte foi colocar as amostras de cada agregado e do filer, nas respectivas séries de peneiras, especificadas por norma. Assim foi feita agitação do conjunto, de forma manual, por um período médio de 10 minutos. Por fim, foi pesada a quantidade de material retida em cada peneira, para posterior cálculo e determinação da porcentagem retida por peneira, o que será usado para determinar a porcentagem, em peso, passante por peneira. A curva granulométrica do agregado em questão é criada com os valores de porcentagens passantes nas respectivas peneiras.

#### 4.1.2 Determinação da Densidade Aparente e Absorção do Agregado Graúdo

A absorção e as massas específicas (também chamadas de densidades) dos materiais que constituem a mistura asfáltica são dados importantes na dosagem da própria mistura, já que exercem influência na massa específica (densidade) da mesma, o que resultará diretamente na quantidade de ligante asfáltico utilizado na mistura (PASCHE, 2013 apud FENGLER, 2015).

A execução deste ensaio segue as recomendações da norma brasileira DNER-ME 081/98 - Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Vale lembrar que a densidade real dos agregados significa, em termos práticos, a massa por unidade de volume apenas da parte sólida das partículas, desconsiderando-se os vazios. Por outro lado, a densidade aparente nos dá a relação entre a massa de determinada porção de agregados e o volume ocupado por esta mesma massa, na condição em que se apresentar (SENÇO, 2001).

Separou-se as amostras dos agregados de acordo com os valores especificados na norma DNER-ME 081/98 (Figura 21).

Figura 21- Amostras mínimas dos agregados

<b>Dimensão máxima característica do agregado (mm)</b>	<b>Massa mínima da amostra de ensaio (kg)</b>
12,5 ou menor	2,0
19	3,0
25	4,0
38	5,0
50	8,0
64	12,0
76	18,0
100	40,0
125	75,0
152	125,0

Fonte: DNER (1998).

As amostras coletadas foram de 3 quilogramas para a Brita 1 e 2 quilogramas para a Brita 0. Em seguida, cada amostra foi imersa em recipiente com água à temperatura ambiente por um período de 24 horas, agitando-se cada uma de tempos em tempos para que ocorresse a saída de ar do recipiente. Após isso, as amostras foram retiradas da água e tiveram, imediatamente, as superfícies das

partículas secas por um pano, para assim fazer a medição da massa saturada com superfície seca de cada amostra, denominada  $M_h$ , em gramas (Figura 22).

Figura 22 - Agregado com superfície saturada seca



Fonte: Autoria própria (2017).

Após medição da  $M_h$ , em gramas, coloca-se as partículas da amostra em recipiente metálico vazado, com malha adequada a ponto de não permitir a passagem de nenhum grão. Esse recipiente é preso por um fio a uma haste e colocado imerso em recipiente maior, com quantidade de água suficiente para cobrir o recipiente menor. O sistema todo é então tarado, para que se possa colocar a amostra dentro do recipiente metálico vazado e, assim, fazer a leitura  $L$  de volume d'água deslocado, em  $\text{cm}^3$  (Figura 23).

Figura 23 - Conjunto para medição da densidade do agregado



Fonte: Autoria própria (2017).

O último passo é retirar a amostra do recipiente e levá-la para secagem em estufa por, pelo menos, 3 horas na temperatura de 105°C, até constância de peso. A última medição para realizar os cálculos é da massa seca da amostra,  $M_s$ , após retirada da estufa e resfriamento para manuseio. A densidade aparente é obtida por meio da Equação 8:

$$D_{ap} = \frac{m_s}{L} \quad (8)$$

Onde:

$M_s$  = massa seca do agregado, em g;

$L$  = massa submersa do agregado, equivalente ao volume deslocado, em cm<sup>3</sup>;

$D_{ap}$  = densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

A absorção do agregado se baseia na mesma norma utilizada para a determinação da massa específica aparente. E pode ser entendida como o aumento de massa no agregado graúdo, devido ao preenchimento dos vazios permeáveis com água. O valor da absorção é expresso em porcentagem da massa seca da amostra, como mostra a Equação 9:

$$A(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$A(\%)$  = absorção do agregado, em porcentagem;

$M_h$  = massa do agregado saturada com superfície seca, em g;

$M_s$  = massa seca do agregado, em g;

#### 4.1.3 Abrasão Los Angeles do agregado graúdo

Diversos são os fatores que resultam na perda de massa dos agregados graúdos de uma mistura asfáltica. O transporte, o manuseio ou qualquer ação nas partículas podem causar algum tipo de dano ou desgaste que, conseqüentemente, fará com que o agregado perca massa.

Bernucci et al. (2008) afirma que durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e

abrasão, o que também pode ocorrer durante a ação do tráfego, no transporte da mistura. É desejável que o agregado apresente a capacidade de resistir a quebras, degradação e desintegração. Como já dito, as camadas superiores do pavimento tendem a sofrer mais com as ações do tráfego, logo agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores.

O ensaio capaz de mensurar e simular uma potencial perda da massa pelo desgaste das partículas de agregado é o de Abrasão “Los Angeles”, que tem seus procedimentos recomendados na norma brasileira DNER-ME 035/1998 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. É considerado como o ensaio mais aceito para determinar a resistência de agregados — quando trabalhados em camadas ou quando fazendo parte de misturas — aos esforços oriundos das cargas do tráfego. Embora seja um ensaio misto de abrasão e impacto, tem apresentado muito boa correlação entre as previsões baseadas nos ensaios e o comportamento dos agregados na pista.

Para Senço (2001), o ensaio de abrasão Los Angeles consiste em submeter certa quantidade de agregado, obedecendo faixas granulométricas especificadas, a um misto de impactos e desgaste, quando colocada em um tambor giratório de 80 cm de diâmetro, e velocidade de giro controlada.

A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego. Os agregados devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Agregados localizados mais próximos ou exatamente na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão ainda maior do que os localizados nas camadas inferiores (BERNUCCI et al., 2006. p. 134).

Este ensaio foi realizado tanto para a Brita 1 como para a Brita 0 utilizadas no presente estudo. O ensaio consiste em colocar a amostra de agregado e as esferas metálicas, com massa de aproximadamente 440g cada, dentro do tambor da máquina Los Angeles, que passa a girar na frequência de 30 a 30 rpm até que sejam completadas 500 rotações (Figura 24). A rotação do tambor permite que as abas internas deste apanhem as partículas do agregado e as esferas metálicas, girando-as até serem tombadas para o lado oposto do tambor e, através da queda das esferas sobre os agregados e a própria queda dos agregados, uns sobre os outros, é criada

a condição de britagem da amostra por impacto. As partículas dos agregados e as esferas, ao rolar dentro do tambor, atritam-se entre si e com as paredes do tambor, promovendo abrasão entre as partes (GOUVEIA, 2006).

Figura 24 – Máquina de abrasão "Los Angeles" e agregado após ensaio



Fonte: Autoria própria (2017).

As amostras de agregados a serem submetidas ao ensaio de abrasão Los Angeles devem satisfazer a uma das faixas granulométricas, apresentadas na Figura 25. Para a Brita 1, a faixa de graduação presente na norma considerada foi a B, com 2500g de material retido na peneira de 12,5mm e 2500g de material retido na peneira de 9,5mm. Para a Brita 0, a faixa de graduação presente na norma considerada foi a C, com 2500g de material retido na peneira de 6,3mm e 2500g de material retido na peneira de 4,8mm. Segundo Bernucci et al. (2008), as especificações brasileiras limitam os valores de abrasão Los Angeles a valores entre 40% e 50%.

Figura 25 - Faixas granulométricas DNER

Peneiras				Misturas (g)			
Passado (%)		Retido (%)		A	B	C	D
(mm)	(")	(mm)	(")				
38,10	1 $\frac{1}{2}$	25,40	1	1.250	—	—	—
25,40	1	19,10	3/4	1.250	—	—	—
19,10	3/4	12,70	1/2	1.250	2.500	—	—
12,70	1/2	9,50	3/8	1.250	2.500	—	—
9,50	3/8	6,35	nº 3	—	—	2.500	—
6,35	nº 3	4,76	nº 4	—	—	2.500	—
4,76	nº 4	2,38	nº 8	—	—	—	5.000
Totais				5.000	5.000	5.000	5.000
Peso das esferas de aço				5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 25
Número de esferas de aço				12	11	8	6

Fonte: Senço (2001).

Segundo Senço (2001), após concluído o número de rotações especificado, retira-se a amostra do tambor, passando a material na peneira de nº 12, com abertura de 1,68 mm, pesando-se o material retido (mf). A diferença entre o peso inicial de 5.000 g da amostra (mi) e o peso final é o desgaste sofrido pelo material no ensaio Los Angeles. Essa diferença, expressa em porcentagem do peso inicial da amostra de agregado, é a abrasão Los Angeles, dada na Equação 10:

$$LA (\%) = \frac{mi - mf}{mi} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

Mi = massa inicial da amostra;

Mf = massa da amostra após ensaio;

LA = abrasão Los Angeles, em porcentagem;

#### 4.1.4 Adesividade do agregado graúdo

Uma das características mais importantes do agregado é a sua capacidade de aderir ao ligante asfáltico e permanecer aderido, sem falhas na película de material betuminoso. O ensaio que avalia essa propriedade do agregado é o de adesividade do agregado graúdo, regido pela norma brasileira DNER – ME 078/1994 – adesividade a ligante betuminoso.

O ensaio consiste em separar uma amostra de 500g de agregado que passam na peneira de 19mm e ficam retidos na peneira de 12,5mm, depois lavá-la com água destilada e colocar em estufa, a 120°C, por 2 horas. O passo seguinte é aquecer tanto a amostra de agregados quanto o ligante asfáltico, que no caso foi o CAP, até as temperaturas especificadas e realizar a mistura, com 17,5g de ligante.

Assim, o ensaio consiste na observação da amostra de agregados graúdos previamente envolvidos com película de asfalto submetidos à imersão a temperatura de 40°C, por um período de 72 horas. Pode-se considerar o resultado final como satisfatório, caso não haja descolamento da película, ou não satisfatório, se houver descolamento parcial ou total da película de ligante asfáltico (Figura 26).

Figura 26 – Análise do agregado graúdo envolvido com ligante asfáltico



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 4.1.5 Índice de forma do agregado graúdo

Segundo Gouveia (2006), a forma ideal dos agregados para aplicação em misturas asfálticas é a arredondada, mas as partículas também devem ser angulares, logo conclui-se que a forma ideal dos grãos é a cúbica. Isso se deve ao fato de que partículas planas e/ou alongadas usadas nas misturas asfálticas levam a diversos problemas no pavimento, como quebra de partículas no momento de compactação da mistura e até a diminuição da trabalhabilidade da mistura.

O ensaio para determinação do índice de forma dos agregados é regido pela norma brasileira ABNT NBR 7809/2006 - Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. É um parâmetro que permite avaliar a qualidade do agregado graúdo, em se tratando de forma dos grãos, atribuindo valores próximos de 1 nas partículas mais cúbicas e valores mais altos para partículas lamelares.

O ensaio consiste na utilização de um paquímetro para medir a relação nas dimensões de partículas do agregado graúdo a ser utilizado na mistura asfáltica, assim determinando porcentagens de partículas planas e/ou alongadas presentes numa certa amostra de agregado graúdo (GOUVEIA, 2006).

No presente estudo, a realização do ensaio se deu apenas nas partículas do agregado brita 1, por ser o único a se enquadrar nos requisitos presentes na norma ABNT NBR 7809/06. O primeiro passo do ensaio é coletar e pesar cerca de 2500g de material da amostra e colocá-lo em estufa para atingir constância de massa. Depois seco, faz-se o peneiramento do material, como descrito na norma, e todo material passante na peneira de 9,5mm é descartado. Também se descarta qualquer material retido em qualquer peneira que apresenta porcentagem retida menor que 5% da massa total da amostra. Em seguida, de acordo com a norma para o ensaio, parte-se para a seleção de 200 partículas do agregado, fazendo uso da Equação 11:

$$N_i = \frac{200}{\sum F_i} \quad (11)$$

Onde:

200 é o número de grãos para realizar o ensaio;

$N_i$  é o número de grãos a serem medidos na fração  $i$ ;

$F_i$  é a porcentagem de massa individual retida na fração  $i$ ;

O último passo, já com a quantidade determinada e grãos, é fazer a medição com o paquímetro das duas dimensões dos grãos de agregado graúdo (Figura 27). A maior dimensão é chamada de “c”, representando o comprimento, e a menor dimensão é chamada de “e”, representando a espessura da partícula. Por fim, é feita uma relação entre os valores de comprimento e espessura dos grãos das várias frações ( $c/e$ ). A média dessa relação para as diferentes frações nos dá o índice de forma do agregado graúdo.

Figura 27 - Realização do ensaio com o paquímetro



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 4.1.6 Índice de degradação do agregado após compactação Marshall, $ID_{ML}$ e $ID_M$

Geralmente requerido como ensaio complementar, caso a abrasão Los Angeles não dê resultado satisfatório, o ensaio de índice de degradação após

compactação Marshall busca refletir a propriedade do agregado de sofrer desgaste/dano durante o processo de compactação com ligante (ID<sub>ML</sub>) ou sem ligante (ID<sub>M</sub>). A norma que define os procedimentos deste ensaio é a DNER – ME 401/1999.

O primeiro passo dito na norma, para os dois índices, é o de secagem da amostra de agregados para posterior granulometria e pesagem de frações. Em seguida separou-se, de acordo com a Tabela 4, a massa de material retido nas peneiras especificadas, fazendo uso dos agregados brita 1, brita 0 e pó de brita. A soma das massas de cada fração determinada deve ser de, aproximadamente, 1200g. A partir daqui, para a determinação do ID<sub>ML</sub>, a mistura de agregados foi aquecida até temperatura pré-determinada, ao mesmo tempo em que se aqueceu o ligante à temperatura de trabalho. Misturou-se cerca de 60g de ligante asfáltico aos agregados e levou-se para a compactação no aparelho Marshall, a fim de se realizar 50 golpes com o soquete de compactação por face do corpo de prova.

Tabela 4 - Fração de agregados por tamanho dos grãos

Peneiras	% de material retido	Quantidade (g)
25mm – 19mm	15	180
19mm – 9,5mm	20	240
9,5mm – 4,75mm	15	180
4,75mm – 2,0mm	15	180
2,0mm – 0,425mm	15	180
0,425mm–0,075mm	15	180
<0,075mm	5	60
Total	100	1200

Fonte: DNER (1999).

A compactação foi feita fazendo uso do soquete e o molde de compactação aplicados no ensaio Marshall, indicado na norma DNER-ME 043/95. O passo seguinte do ensaio, segundo Bernucci et al. (2008), após a moldagem e passado tempo suficiente para resfriamento do corpo de prova foi:

- Após a confecção dos corpos de prova, é realizada a extração do ligante pelo método DNER-ME 053/94 ou similar (Figura 28).
- Os agregados resultantes do ensaio de extração foram submetidos a um

peneiramento nas mesmas peneiras utilizadas para confecção dos corpos de prova, sendo que a porcentagem passante é tomada em relação à massa original dos agregados.

Por fim foi feita uma série de relações numéricas, que envolvem diferenças de granulometrias antes e depois da compactação (D) e chegou-se a um valor de  $ID_{ML}$ , dado pela Equação 12:

$$ID_{ml} = \frac{\sum D}{6} \quad (12)$$

Onde:

$ID_{ML}$  = índice de degradação por compactação Marshall;

$\sum D$  = somatório das diferenças entre % média passante após ensaio e % passante antes do ensaio;

6 = quantidade de peneiras usadas na granulometria da amostra;

O índice de degradação após compactação Marshall sem ligante ( $ID_M$ ) seguiu os mesmos procedimentos anteriores, com exceção do aquecimento dos agregados e do uso de ligante, levando-se a mistura de agregados diretamente ao compactador Marshall. O cálculo do  $ID_M$  também é feito da mesma forma que o  $ID_{ML}$  (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 28 - Extração do ligante asfáltico do CAUQ no extrator de betume “Rotarex”



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 4.1.7 Equivalente de areia do agregado miúdo

Segundo Gouveia (2006), o procedimento deste ensaio consiste em agitar energicamente a amostra de agregados finos, composta do material passante na peneira de n.º 4 (4,75mm), numa proveta graduada contendo solução flocculante, de modo a soltar as partículas de argilominerais (ou outros materiais, sujeira) aderidas ao agregado.

O material utilizado no ensaio, que no caso do presente estudo, foi a areia e o pó de brita, deve ser destorroado, depois passado na peneira de n.º 4, para então, ser dissolvido numa solução concentrada dentro de proveta com, aproximadamente, 32mm de diâmetro interno e 43cm de altura. A solução concentrada contém substâncias como cloreto de cálcio, glicerina, solução de formaldeído e água destilada. Senço (2001) afirma que devem ser dissolvidos 125 mililitros da solução concentrada em água destilada, até que se complete 5 litros. Essa solução de trabalho é que será utilizada no ensaio, sendo colocada na proveta até o traço de referência (Figura 29).

Figura 29 - Provetas utilizadas no ensaio, evidenciando o traço de referência



Fonte: Autoria própria (2017).

Foram preenchidas três cápsulas com amostras, já secas em estufa por cerca de duas horas, de agregado miúdo (tanto areia quanto com pó de brita) passante na peneira n.º 4. Com as provetas preenchidas pela solução de trabalho até a marca

de referência, colocou-se a amostra de cada cápsula na respectiva proveta, realizando-se então, batidas no fundo de cada proveta para retirar bolhas de ar, as quais podem atrapalhar a leitura do ensaio. Cada proveta foi colocada em repouso, por cerca de 10 minutos, para então ser realizada agitação horizontal de cada uma por 30 segundos, totalizando 90 ciclos.

Após essa etapa, foi acrescentada mais solução em cada proveta até a marca de referência, para compensar qualquer vazamento ocorrido durante o processo de agitação. Por fim, cada proveta foi colocada em repouso novamente, mas dessa vez por um período de 20 minutos. Gouveia (2006) conclui que o equivalente de areia pode ser, então, calculado através da razão entre a leitura no topo de areia e a leitura no topo da argila (material disperso), como mostra a Equação 13:

$$EA(\%) = \frac{L_{areia}}{L_{argila}} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

$L_{areia}$  = leitura no topo de areia, mm;

$L_{argila}$  = leitura no topo da argila, mm;

EA = equivalente de areia, em %;

#### 4.1.8 Densidade Real do agregado miúdo

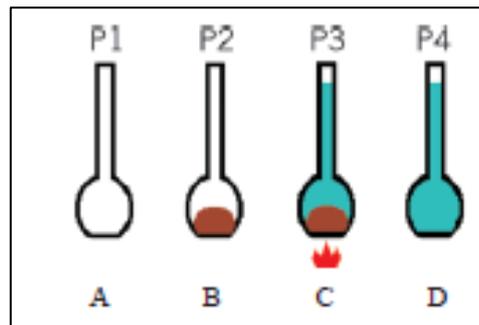
Para este ensaio foi adotado o procedimento contido na norma brasileira DNER – ME 084/1995 – Agregado miúdo: determinação da densidade real. Segundo Bernucci et al. (2008), é um ensaio com procedimento semelhante ao que determina a massa específica aparente seca de solos, porém fazendo uso de um picnômetro de 1000ml.

O ensaio foi iniciado coletando cerca de 500 g de agregado miúdo seco, que no caso do presente estudo foi feito tanto para areia quanto para o pó de brita, passante na peneira nº 4 e retido na peneira nº 200. O passo seguinte foi fazer a medição da massa de um picnômetro de 1000ml em estado seco e limpo, chamando esse valor de “A”. Em seguida o material coletado e pesado (500g) de cada agregado miúdo foi colocado dentro do respectivo picnômetro, totalizando uma massa do picnômetro mais massa da amostra. Este valor foi então chamado de “B”. O terceiro

passo foi adicionar água destilada até uma altura em que cobrisse totalmente a amostra dentro de cada picnômetro.

Após isso, cada picnômetro com a amostra e água foi levado para ser aquecido por cerca de 15 minutos, para que possíveis bolhas de ar fossem expulsas da amostra (Figura 30). Passado esse tempo, e após ocorrer o resfriamento de cada picnômetro, cada picnômetro foi preenchido totalmente com água destilada até a marca de aferição. Tomou-se então o cuidado para enxugar a parte externa do picnômetro, e assim, foi feita a medição da massa do conjunto picnômetro-amostra-água, chamando o valor de “C”. Por fim, foi retirada a mistura dentro de cada picnômetro e, depois de limpos, foram preenchidos apenas com água destilada até a marca de aferição, para serem pesados e o valor chamado de “D”.

Figura 30 - Ensaio de densidade real do agregado miúdo



Fonte: Bernucci et al. (2008).

A densidade real do agregado miúdo pode então ser determinada por meio da Equação 14:

$$Dr = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \quad (14)$$

Onde:

Dr = densidade real do agregado miúdo;

A = massa do picnômetro seco e limpo, g;

B = massa do picnômetro mais amostra, em g;

C = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

D = massa do picnômetro mais água, em g;

#### 4.1.9 Determinação da massa específica dos agregado miúdos pelo frasco Chapman

Outro ensaio que serviu para determinar a massa específica do agregado miúdo, este se baseia nos procedimentos contidos na norma brasileira DNER-ME 194/1998 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

Se iniciou na coleta de amostra com, aproximadamente, 1000g de agregado miúdo, tanto para a areia quanto para o pó de brita, secas em estufa na temperatura entre 105°C e 110°C, até atingir massa constante. Em seguida, foi separado e pesado cerca de meio quilo (500 g) da amostra original para realização do ensaio. O passo seguinte foi colocar água no frasco Chapman até a marca de aferição, de 200 cm<sup>3</sup>, para então ser colocado em repouso até que toda água contida nas paredes do frasco escorresse.

Depois disso, foi colocada no frasco a amostra de 500 g do agregado miúdo, de forma cautelosa, com o auxílio de um funil. Teve-se cuidado para agitar o frasco enquanto a amostra era colocada para que bolhas de ar fossem eliminadas, a fim de garantir uma leitura mais exata da massa específica. Por fim, com a amostra toda dentro do frasco, esperou-se escorrer o resto de água e grãos nas paredes para, então, fazer a leitura do nível atingido pelo conjunto (Figura 31).

Figura 31 - Determinação da massa específica do (a) pó de brita e (b) da areia



Fonte: Autoria própria (2017).

A Equação 15 nos dá o valor da massa específica do agregado miúdo, em  $\text{g/cm}^3$ :

$$D = \frac{500}{L - 200} \quad (15)$$

Onde:

D = massa específica do agregado miúdo;

L = leitura final do frasco, após introdução da amostra, em  $\text{cm}^3$ ;

200 = volume inicial de água no frasco, em  $\text{cm}^3$ ;

## 4.2 Material de enchimento – Filer

Também se fez necessário realizar procedimentos no laboratório para caracterização do material de enchimento (filer) a ser utilizado na confecção das misturas asfálticas, que no presente estudo foi o Cimento Portland. Porém, comparado com os ensaios de controle dos agregados, o número de ensaios para o filer é bem reduzido: análise granulométrica, já explicada no item 4.1.1 e determinação da massa específica pelo frasco Le Chatelier (DNER-ME 085/94);

#### 4.2.1 Determinação da massa específica do filer pelo frasco Le Chatelier

Esse ensaio teve como base a norma brasileira DNER – ME 085/1994 – Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real, que utiliza um recipiente/frasco semelhante ao Chapman, para determinação da massa específica de agregados miúdos.

O ensaio tem início com a coleta de cerca de 60g de material fino, que no caso do presente estudo, foi Cimento Portland – CII. Como recomenda a norma, o frasco Le Chatelier deve ser preenchido com um solvente, no caso querosene, até atingir um nível entre 0 e 1, nas marcas de aferição. Tomou-se cuidado para enxugar as paredes internas, acima do líquido, para evitar fixação do filer durante a colocação do mesmo no frasco (Figura 32).

O frasco, com o líquido dentro, foi então colocado em banho maria, à temperatura de 25°C, para realizar a primeira leitura do nível. Em seguida, o filer foi sendo adicionado, em pequenas porções, até completar os 60g separados inicialmente. Importante ressaltar, que nessa etapa, se teve cuidado para evitar que o material aderisse às paredes do frasco, o que poderia comprometer os resultados. Por fim, o frasco foi colocado em posição inclinada e realizou-se movimentos giratórios, de forma suave, no conjunto para expulsar bolhas de ar. Após colocar o frasco em repouso, foi feita a leitura final do nível do líquido dentro do frasco.

Figura 32 - Ensaio de densidade do material de enchimento (filer)



Fonte: Autoria própria (2017).

A Equação 16 nos dá o valor da massa específica real do filler:

$$\mu = \frac{M_s}{V} \quad (16)$$

Onde:

$\mu$  = massa específica real do material, em g/cm<sup>3</sup>;

$M_s$  = massa do material, em g;

$V$  = volume deslocado pelo material, em cm<sup>3</sup> ( $L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}}$ );

### 4.3 Ligante Asfáltico - CAP

Como já dito anteriormente nesse trabalho, o ligante utilizado para a concepção das misturas asfálticas foi o Cimento Asfáltico de Petróleo, mais especificamente o CAP 50/70, proveniente da usina da LUBNOR – Ceará – Brasil, que já fazia parte do estoque do Laboratório de Solos e Pavimentação – CCT, na UEMA. Dito isso, pode-se citar os ensaios de controle da qualidade do CAP realizados no laboratório:

- 1) Ensaio de penetração do ligante (ABNT NBR 6576/98);
- 2) Determinação da viscosidade Saybolt-Furol (ABNT NBR 14950);
- 3) Ensaio de ponto de amolecimento do ligante (ABNT NBR 6560);

Vale ressaltar que, por haver trabalhos sendo realizados concomitantemente a este e pelo objetivo do presente estudo focar nos agregados para misturas asfálticas, em especial na etapa de seleção dos agregados na concepção de um CAUQ, os resultados dos ensaios realizados no ligante asfáltico foram obtidos por meio de ensaios realizados em conjunto com outros graduandos.

#### 4.3.1 Determinação da penetração no ligante asfáltico

A norma que determina o procedimento desse ensaio é a ABNT NBR 6576/1998. É um ensaio que permite avaliar a consistência do ligante asfáltico, além

de classificá-lo em diferentes tipos. A penetração no ligante define quatro tipos diferentes:

- a. CAP 30/45
- b. CAP 50/70
- c. CAP 85/100
- d. CAP 150/200

O ensaio consiste em submeter uma amostra de ligante asfáltico, na temperatura de 25°C, à penetração de uma agulha, com massa de aproximadamente 100g, por um período de 5 segundos. A unidade considerada para o ensaio é décimos de milímetro. O CAP é colocado à temperatura de 125°C na capsula do ensaio, para então ser resfriado ao ar. Posteriormente, é colocado em banho maria, com água destilada, para que fosse realizada a penetração da agulha. O resultado obtido é a média de três ensaios realizados com amostras diferentes.

#### 4.3.2 Determinação da viscosidade Saybolt-Furol

Este ensaio determina as faixas de temperatura à qual o ligante será trabalhado, usinado, misturado a agregados e compactado. A norma brasileira que contém os procedimentos de execução é a DNER – ME 004/1994 – Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura: método da película delgada.

A execução consiste no aquecimento de uma amostra de CAP até certa temperatura, capaz de propiciar boa fluidez. Após isso, a amostra foi colocada completamente no viscosímetro até atingir o traço de referência (Figura 33). As temperaturas do CAP nessa etapa são de 135°C, 149°C e 177°C, especificadas na norma. Para cada um, foi marcado o tempo necessário para que a amostra preenchesse o frasco padrão do ensaio, com capacidade de 60 ml.

Figura 33 - Viscosímetro Saybolt-Furol durante ensaio



Fonte: Autoria própria (2017).

Os resultados obtidos permitiram criar um gráfico, contendo uma curva Viscosidade x Temperatura. Tal gráfico propiciou a de terminação das faixas de temperatura do CAP para as várias etapas de confecção da mistura asfáltica: mistura com o agregado, compactação, etc.

#### 4.3.3 Determinação do ponto de amolecimento do ligante

É um ensaio que determina a temperatura na qual o ligante asfáltico amolece, quando aquecido, atingindo certos valores de consistência. A norma brasileira que rege esse ensaio é a ABNT NBR 6560/2000 – Determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola.

O método foi iniciado com o aquecimento de amostra de CAP até a temperatura de 135°C, para ser possível colocá-la no anel metálico especificado pela norma. Tomou-se o cuidado para manter a superfície da amostra bem lisa, para então ser colocada em resfriamento, à temperatura ambiente, por um tempo de 45 minutos.

O passo seguinte foi colocar uma “bola” de aço, especificadas pela norma, em cima da amostra. Assim, o conjunto anel-amostra-bola foi colocado em banho d’água dentro de um béquer, posicionado em fonte de calor, para aquecimento do conjunto a uma taxa de 5°C/minuto.

O ligante foi ficando menos viscoso e amolecendo à medida que a temperatura aumentava, o que permitia a penetração da bola na película de CAP encontradas no anel. Por fim, atingiu-se determinada temperatura na qual o ligante perdeu resistência e a bola o atravessou, atingindo o fundo do béquer. A temperatura na qual isso ocorreu é considerada o ponto de amolecimento do CAP. Esse procedimento foi realizado para duas amostras diferentes, resultando numa média dos dois valores.

#### **4.4 Mistura asfáltica**

Para a mistura asfáltica, que no caso do presente estudo foi o CAUQ, concebido com a seleção de agregados pelo método convencional (método das tentativas) e outro com a seleção dos agregados por meio do método Bailey. Ambos foram dosados utilizando o método de dosagem Marshall, além de terem sido submetidos a ensaios de resistência como:

- 1) Estabilidade Marshall (DNER – ME 043/1995);
- 2) Resistência à Tração por compressão diametral (DNIT 136/2010);

##### **4.4.1 Dosagem Marshall**

De acordo com o Instituto do Asfalto (1989), o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall, que trabalhou no Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Mississippi, nos Estados Unidos. Porém, engenheiros do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) também deram contribuição ao método em questão, após extensas pesquisas e estudos de correlação, melhorando o procedimento do ensaio Marshall e acrescentando alguns pontos, desenvolvendo critérios de dosagem da mistura.

Senço (2001) acrescenta que foram construídas várias pistas experimentais, nas quais se variavam as porcentagens de ligante e a granulometria dos agregados, assim se tornou possível determinar um método de compactação para

a avaliação dos critérios de misturas Marshall. Após inúmeras passagens de veículos de diferentes tipos de cargas nos eixos, o USACE estabeleceu critérios levando em consideração a estabilidade, densidade, vazios preenchidos e não preenchidos, além da fluência, obtidos da execução do ensaio Marshall para se chegar ao teor ótimo de betume, ou teor de projeto do ligante asfáltico.

A concepção de revestimentos asfálticos deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção do teor de ligante a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro das especificações definidas com a finalidade de evitar a desagregação da mistura, devido à falta de ligante, ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso de ligante. Os procedimentos de dosagem Marshall determinam a quantidade ótima de ligante a ser utilizada em misturas asfálticas usinadas a quente, destinadas à pavimentação de vias. Além disso, é possível determinar parâmetros como estabilidade da mistura ensaiada, a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova e a fluência, que corresponde a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetro, de misturas betuminosas usinadas a quente (SANTANNA-GRECO, 201?).

A norma DNER-ME 043/95, denominada Misturas Betuminosas a Quente – ensaio Marshall trata de todo o procedimento a ser feito na dosagem Marshall, desde os materiais necessários para a execução quanto ao método em si. Também introduz conceitos como Relação Betume-Vazios, Densidade Máxima Teórica, Porcentagem de Vazios no Agregado Mineral (VAM), Estabilidade e Fluência, entre outros.

Abaixo segue os passos para realizar a dosagem Marshall e o restante dos procedimentos encontrados na norma DNER –ME 043/95:

- Após definição do traço de agregados tanto pelo método das tentativas quanto pelo método Bailey, calculou-se a quantidade de cada agregado (em peso) a formar os corpos de prova;
- Agregado e ligante asfáltico foram aquecidos separadamente, até a temperatura de 177°C para o primeiro e de 162°C para o segundo, apresentados no item 5.10;
- Agregado e ligante asfáltico foram misturados por um período de 3 minutos, mantendo-se controle na temperatura de mistura para valores entre 140°C e 150°C;

- A mistura foi colocada em molde aquecido e compactada com soquete de 10 libras de peso (4,54Kg), caindo de uma altura de 18" (45,72 cm), mantendo a temperatura de compactação entre 140°C e 150°C;
- Aplicou-se, então, 75 golpes do soquete por face do corpo de prova (Figura 34);
- Esse processo foi repetido para 3 corpos de prova para cada teor de ligante utilizado na dosagem. Os teores variavam de 4,0% a 6,5% de ligante;
- Os corpos de prova devem ser cilíndricos, com aproximadamente 4" (10,16 cm) de diâmetro e 2½" (6,35 cm) de altura;
- Após a compactação, os corpos de prova foram separados para resfriamento, a fim de os retirar dos moldes metálico;
- Em seguida os corpos de prova foram ser pesados ao ar e imersos, para determinação da sua massa específica aparente;
- Foram, então, realizadas medidas dos diâmetros e das alturas de cada corpo de prova, com paquímetro, com pelo menos três medidas de cada a fim de se calcular uma média;
- Os corpos de prova foram colocados em banho-maria a 60°C, por 40 min;
- Imediatamente após a retirada do banho-maria, foram ser levados à prensa do aparelho Marshall, que possui carga a ser aplicada de forma contínua ao longo da superfície do cilindro (compressão diametral), à média de 50,8 mm/min, até o rompimento do corpo de prova;
- A carga máxima aplicada que provoca o rompimento do corpo de prova foi tida como estabilidade Marshall, em Kgf;
- A deformação máxima sofrida pelo corpo de prova, no momento da ruptura, correspondente ao valor da carga máxima é a chamada fluência. A unidade de fluência é 0,01" (um centésimo de polegada = 0,254 mm) ou 0,1 mm (um décimo de milímetro).

De acordo com Santanna-Greco (201?), é por meio da dosagem Marshall que se deve conceber misturas que atendam a requisitos como: densidade máxima possível, o que garante maior estabilidade; fluência com certo limite, para garantir flexibilidade da mistura; vazios com certos limites, o que garante a não oxidação da porção asfáltica da mistura; e uma relação betume-vazios com certo limite, garantindo boa proporcionalidade de ligante asfáltico, de forma a não ocorrer exsudação da

mistura.

Figura 34 - Compactador Marshall e mistura asfáltica no molde



Fonte: Autoria própria (2017).

Abaixo segue valores da especificação para parâmetros intrínsecos da dosagem Marshall para concreto asfáltico denso, de acordo com a norma brasileira DNIT ES – 031/2006 (Tabela 5).

Tabela 5 - Limites para características da mistura asfáltica

Parâmetros	Limites	
	Camada de rolamento	Camada de ligação
Volume de Vazios, (%)	3 - 5	4 - 6
RBV (%)	75 - 82	65 - 72
VAM (%)	15	15
Estabilidade, mínima (kgf)	500	500
Resistencia à tração por compressão diametral, mínima, Mpa	0,65	0,65

Fonte: DNIT (2006).

Os parâmetros volumétricos dos corpos de prova calculados foram: Densidade Máxima Teórica (DMT); Densidade Aparente; Volume de vazios; Vazios no Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume-Vazios.

Para o cálculo da DMT, utilizou-se a Equação 17:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%b}{D_b} + \frac{\%f}{D_f} + \frac{\%p_0}{D_{p_0}} + \frac{\%b_0}{D_{b_0}} + \frac{\%b_1}{D_{b_1}}} \quad (17)$$

Onde:

$\%i$  = porcentagem de determinado material constituinte do CP;

$D_i$  = densidade real de determinado material constituinte do CP;

DMT = densidade máxima teórica;

Para determinar a densidade aparente da mistura, utiliza-se a Equação 18:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_{sub}} \quad (18)$$

Onde:

$D_{ap}$  = Densidade aparente, em  $g/cm^3$ ;

$M_s$  = massa seco do corpo de prova, em g;

$M_{sub}$  = massa hidrostática do corpo de prova, em g.

Para determinar o volume de vazios, fez-se uso da Equação 19:

$$V_v = \frac{DMT - D_{ap}}{DMT} \times 100 \quad (19)$$

Onde:

$V_v$  = Volume de vazios, em percentagem;

DMT = Densidade máxima teórica da mistura, adimensional;

$D_{ap}$  = Massa específica aparente, em  $g/cm^3$ ;

Para determinar o valor de vazios com betume, utilizou-se a Equação 20:

$$VCB = \frac{D_{ap} \times \%b}{D_b} \quad (20)$$

Onde:

VCB = vazios com betume, em percentagem;

$D_{ap}$  = Massa específica aparente, em  $g/cm^3$ ;

$\%b$  = Percentagem de ligante no corpo de prova;

$D_b$  = Massa específica real do CAP, em  $g/cm^3$ ;

Para determinar o valor do VAM, fez-se uso da Equação 21:

$$VAM = V_v + VCB \quad (21)$$

Onde:

VAM = Vazios do agregado mineral, em percentagem;

$V_v$  = Volume de vazios, em percentagem;

VCB = volume com betume, em percentagem;

Para determinar o valor da RBV, usou-se a Equação 22:

$$RBV = \left( \frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \times 100 \quad (22)$$

Onde:

RBV = Relação betume/vazio, em percentagem;

VAM = Vazios do agregado mineral, em percentagem;

VV = Volume de vazios, em porcentagem;

#### 4.4.2 Estabilidade Marshall

Seguindo os passos já mencionados no item 6.4.1, após resfriamento dos corpos de prova, e já tiradas as medidas do diâmetro e da altura de cada um, todos foram levados para se medir a massa seca ao ar e a massa submersa, em balança hidrostática, em gramas.

O passo seguinte foi colocar cada corpo de prova em banho d'água, à temperatura de 60°C por um período variando de 30 a 40 minutos. Passado esse tempo, os corpos de prova foram levados à prensa Marshall para rompimento e determinação da Estabilidade Marshall (Figura 35). Esse procedimento está contido na norma DNER – ME 043, 1995 – Mistura betuminosa a quente – ensaio Marshall.

Importante ressaltar que na determinação da estabilidade Marshall, deve-se calcular fator de correção “f”, função da altura medida de cada corpo de prova, para compensar a não ocorrência da altura ideal para o corpo de prova de 63,5cm.

Esse fator é definido pela seguinte Equação 23:

$$f = 927,23 \times h^{-1,64} \quad (23)$$

Onde:

f = fator de correção em função da altura do corpo de prova;

h = altura do corpo de prova, em cm;

Figura 35 - Prensa Marshall e realização do ensaio de estabilidade no corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2017).

Dessa forma, a estabilidade Marshall pode ser calculada pela Equação 24:

$$E = L_p \times f \times F_p \quad (24)$$

Onde:

E = estabilidade Marshall, em kgf;

L<sub>p</sub> = leitura na prensa, em kgf;

f = fator de correção em função da altura do corpo de prova;

F<sub>p</sub> = constante de correção da prensa, que no caso tinha o valor de 2,0154;

#### 4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Definidos os teores ótimos de ligante para a mistura tradicional e para a mistura Bailey, foram concebidos 3 corpos de prova de cada uma para execução desse ensaio, regido pela norma brasileira DNIT 136/2010 – ME – Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas: 4 medidas para a altura, em mm, e 3 medidas para o diâmetro, também em mm. Os valores finais de altura e diâmetro equivalem à média aritmética dos valores mensurados de cada parâmetro.

O passo seguinte foi colocar cada CP em repouso, à temperatura de aproximadamente 25°C, por cerca de 2 horas. Passado esse tempo, os corpos de prova foram colocados no friso de compressão diametral para se iniciar a compressão na prensa Marshall (Figura 36). Iniciou-se a compressão de cada CP, até atingir o valor de carga no qual ocorresse a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração (RT) por compressão diametral foi calculada com o uso da Equação 25:

$$\sigma_r = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (25)$$

Onde:

$\sigma_r$  = Resistência à tração, em MPa;

F = Carga de ruptura, em kgf;

D = Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm;

Figura 36 - Friso para ensaio de RT (a) e medição das dimensões do CP (b)



Fonte: Autoria própria (2017).

## 4.5 Método Bailey

Além de todos os ensaios realizados para os agregados e ligante asfáltico constituinte da mistura asfáltica, o Método Bailey, proposto nesse estudo, requer a execução de mais um ensaio, recomendado pela norma brasileira NBR – NM 45/2006 – Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios ou pela norma americana AASHTO T 19M/T 19 – Massa específica solta e vazios no agregado.

### 4.5.1 Massa específica solta e compactada

Para realização dos cálculos propostos pelo Método Bailey na busca de definir um traço de agregados para misturas asfálticas, é necessário que se saiba os valores de Massa Específica Solta e Compactada para os agregados graúdos e Massa específica compactada para os agregados miúdos.

Os agregados graúdos utilizados neste estudo que foram submetidos ao ensaio de Massa Específica Solta e Compactada foram a brita 1 e a brita 0. O agregado miúdo utilizado para confecção de mistura asfáltica pelo método Bailey foi o pó de brita, submetido ao ensaio de Massa Específica Compactada.

O procedimento contido na norma se inicia com a calibração do recipiente a ser utilizado no ensaio, que deve ser capacidade de, no mínimo, 10 dm<sup>3</sup> (Figura 37). A calibração foi feita primeiro medindo-se a massa, em kg, do recipiente. Em seguida, preencheu-se o recipiente usado no ensaio com água, à temperatura de aproximadamente 29°C, condição na qual, segundo a norma, a água apresenta densidade com valor próximo de 995,8 kg/m<sup>3</sup>. O conjunto recipiente-água foi, então, pesado para se medir a massa de água contida no recipiente. De posse desses valores, achou-se o valor da capacidade volumétrica do recipiente dividindo-se a massa da água pela densidade já estabelecida, resultando, então, em um volume de 10,56 dm<sup>3</sup>.

Figura 37 - Recipiente utilizado no ensaio



Fonte: Autoria própria (2017).

Os passos seguintes foram encher o recipiente com quantidade suficiente de agregado graúdo, jogando-os a uma altura de, no máximo, 10 cm a partir da abertura do recipiente. Os agregados foram inseridos no recipiente até completar o nível para então o conjunto recipiente-agregado em condição solta ser pesado, a fim de se medir a massa solta do agregado ( $M_s$ ). Esse ensaio foi realizado para a brita 1 e para a brita 0 (Figura 38).

Figura 38 - Execução do ensaio para brita 1 (a) e brita 0 (b)



Fonte: Autoria própria (2017).

A Massa Específica Solta do agregado graúdo é dada pela Equação 26:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (26)$$

Onde:

$D_s$  = Massa Específica Solta, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$M_s$  = massa solta do agregado, em kg;

$V$  = volume do recipiente, em  $\text{m}^3$ ;

De forma análoga, a determinação da Massa Específica Compactada segue os mesmos princípios da Massa Específica Solta, acrescentando ainda, o fato de que é realizada com o agregado miúdo, além dos agregados graúdos. A diferença está na etapa de preenchimento do recipiente pelos agregados. Enquanto na determinação da massa solta, o agregado foi jogado, a 10 cm da superfície, até preencher totalmente o recipiente, na determinação da massa compactada, o agregado foi inserido no recipiente até 1/3 (um terço) da altura total do recipiente, para em seguida ser aplicada uma série de 25 golpes com haste de metálica, especificada por norma, a fim de se compactar o agregado, diminuindo os espaços entre partículas (Figura 39).

Em seguida, foi colocado mais agregado até atingir 2/3 (dois terços) da altura do recipiente, para serem aplicados mais 25 golpes com a haste. Seguiu-se assim até realizar os 25 golpes na camada superficial de agregados, preenchendo totalmente o recipiente.

Figura 39 - Compactação de uma das camadas de agregado



Fonte: Autoria própria (2017).

A Massa Específica Compactada é calculada de acordo com a Equação 27:

$$D_c = \frac{M_c}{V} \quad (27)$$

Onde:

$D_c$  = Massa Específica Compactada do agregado, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$M_c$  = massa compactada do agregado, em kg;

$V$  = volume do recipiente, em  $\text{m}^3$ ;

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo mostrar os resultados finais encontrados para os diversos ensaios laboratoriais descritos anteriormente e realizados no Laboratório de Solos e Pavimentação da UEMA. Se inicia com a análise granulométrica dos diversos agregados usados nas misturas asfálticas, bem como as determinações das propriedades físicas de cada um. Também será abordado o resultado final de traço de agregados para mistura, resultante do processo de seleção de agregados, pelos dois métodos tratados no estudo. Por fim, serão mostrados os resultados da dosagem Marshall, bem como dos ensaios mecânicos relacionados: Estabilidade e Resistência à Tração por compressão diametral e, também, parâmetros volumétricos das misturas confeccionadas: DMT, Vv, Dap, RBV, VAM e VCB.

### 5.2 Análise granulométrica

O resultado da análise granulométrica pode ser visto na Tabela 6, que relaciona a porcentagem passante nas peneiras de cada material com as respectivas peneiras.

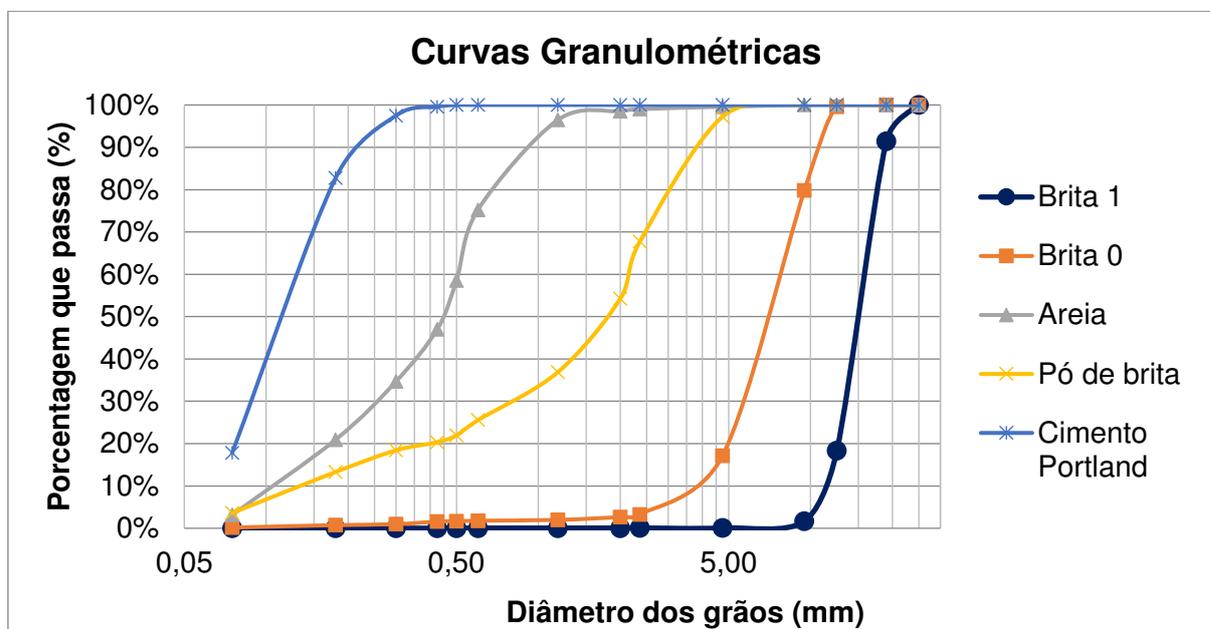
Tabela 6 - Composição Granulométrica dos materiais

#	MATERIAIS				
	B1	B0	PÓ DE BRITA	AREIA	FILER
2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	91,42	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	18,34	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	1,67	79,79	100,00	100,00	100,00
4	0,06	17,16	97,21	99,57	100,00
10	0,05	2,67	54,25	98,54	100,00
40	0,00	1,59	20,34	47,00	100,00
80	0,00	0,74	13,31	20,94	99,58
200	0,00	0,17	3,60	3,15	88,87

Fonte: Autoria própria (2017).

Assim, na Figura 40, é mostrado gráfico com as curvas granulométricas dos materiais que constituíram as misturas asfálticas no estudo.

Figura 40 - Curvas granulométricas dos agregado e filer



Fonte: Autoria própria (2017).

Vale ressaltar que os valores encontrados representam uma média entre resultados de 3 ensaios de granulometria para amostras diferentes dos materiais. Fica claro perceber que os agregados graúdos possuem pouca quantidade de material fino, uma vez que suas curvas granulométricas se apresentam muito íngremes, e possuem baixa porcentagem passando na peneira de nº 4 (4,75mm).

### 5.3 Massa específica e absorção dos agregados

Foi realizado ensaio para determinação da massa específica real e aparente dos agregados graúdos, bem como ensaio de absorção. Para os agregados miúdos e o filer, foi realizado ensaio de massa específica real, necessários aos cálculos propostos no estudo. Em adição, realizou-se ensaio de massa específica aparente para o pó de brita e a areia. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de massa específica real, aparente e absorção dos materiais para mistura asfáltica

Material	Norma do ensaio	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Brita 1	DNER-ME 081/98	2,744	2,717	1,01
Brita 0	DNER-ME 081/99	2,769	2,748	0,73
Pó de brita	DNER-ME 084/95	2,767	2,759	-
Areia	DNER-ME 084/96	2,571	2,600	-
Filer	DNER-ME 085/94	2,9943	-	-

Fonte: Autoria própria (2017).

Pode-se verificar que a brita 0 apresenta maior densidade, tanto real quanto aparente, do que a brita 1. Isso influencia em menores vazios nos grãos dos agregados, contribuindo para uma absorção de água menor do que a brita 1. Resultados assim indicam que misturas asfálticas com maior porcentagem de brita 1 do que brita 0, necessitará de maiores quantidades de ligante asfáltico, devido à presença mais elevada de poros na brita 1.

#### 5.4 Abrasão Los Angeles

Como já mencionado, o ensaio para determinação da abrasão Los Angeles foi realizado para todos os agregados graúdos, ou seja, para a brita 1 e para a brita 0. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da Abrasão "Los Angeles" do agregado graúdo

MATERIAL	FAIXA DE GRADUAÇÃO	RESULTADO, EM %
Brita 1	B	12,39
Brita 0	C	16,57

Fonte: Autoria própria (2017).

Fica verificado, então, que a brita 0 sofreu mais desgaste por abrasão do que a brita 1, o que é resultado da perda de massa do material pelos danos causados

no ensaio. Ainda assim, ambos os agregados graúdos obtiveram resultados satisfatórios para a abrasão “Los Angeles”, uma vez que os valores ficaram abaixo do limite de 50%, estabelecido pela norma DNIT 031/2006. Isso indica que ambos os materiais estão aptos para serem aplicados na concepção de uma mistura asfáltica.

### 5.5 Índice de forma

O ensaio utilizado para a determinação do índice de forma foi preconizado pelo que recomenda a norma da ABNT NBR 7809/2006. Dito isso, e ressaltando que o ensaio foi realizado para um dos agregados graúdos, a brita 1, o resultado encontrado é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Índice de forma da brita 1

Fração	Quant. De grãos	C/E
19mm	19	2,689
12,5mm	161	2,043
9,5mm	19	1,802
C/E médio		2,178

Fonte: Autoria própria (2017).

O limite estabelecido por norma para o índice de forma é 3, de acordo com a ABNT NBR 7211/05, o que significa que as partículas devem possuir, em sua maioria, a forma cúbica, o que é desejável na aplicação de uma mistura asfáltica. Portanto, conclui-se que o agregado graúdo utilizado no estudo está dentro da especificação, apresentando valor abaixo do limite para este parâmetro.

### 5.6 Adesividade do agregado ao ligante

Os resultados deste ensaio são definidos por análise tátil visual da amostra coberta por ligante. No caso de o agregado permanecer recoberto por inteiro pelo ligante asfáltico, após o período estabelecido na norma do ensaio DNER-ME 078/94, ou apresenta falhas minúsculas na película de ligante, a adesividade é considerada

satisfatória. Para o caso da película de ligante se desprender, consideravelmente, dos grãos de agregado, o resultado é então considerado insatisfatório.

No presente estudo, as partículas de agregado graúdo apresentaram grande quantidade de falhas na película do ligante, o que caracteriza desprendimento do betume e configura um resultado insatisfatório para a adesividade do agregado graúdo, conforme mostrado na Figura 26, no item 4.1.4.

### 5.7 Índice de degradação por compactação Marshall

Os resultados de IDML são apresentados no Quadro 1, enquanto os resultados de IDM são apresentados na Quadro 2.

Quadro 1- Resultado do ID<sub>ML</sub>

DEGRADAÇÃO MARSHALL			
PENEIRAS	%passante inicial	%passante FINAL	D
19MM	85,0	92,40	7,41
9,5MM	65,0	65,64	0,66
4,75MM	50,0	51,94	1,96
2MM	35,0	38,10	3,12
0,425MM	20,0	23,98	3,98
0,075MM	5,0	13,76	8,77
$\Sigma D$			25,90
IDML			4,31687082

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 2 - Resultado do ID<sub>M</sub>

DEGRADAÇÃO MARSHALL			
PENEIRAS	%passante inicial	%passante FINAL	D
19MM	85,0	93,50	8,51
9,5MM	65,0	66,02	1,04
4,75MM	50,0	51,70	1,72
2MM	35,0	40,10	5,12
0,425MM	20,0	24,23	4,23
0,075MM	5,0	13,83	8,84
$\Sigma D$			29,45
IDM			4,907865278

Fonte: Autoria própria (2017).

De acordo com a norma DNIT-ES 031/2006, os limites de valores para os índices ensaiados são: IDML < 5% e IDM < 8%, portanto ambos os resultados estão dentro dos valores limites especificados, configurando agregados aptos à uso em mistura asfáltica.

### 5.8 Equivalente de areia

Os resultados do ensaio de equivalente de areia, para ambos os agregados miúdos são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Resultado do EA para areia

AMOSTRA	ALTURA DE SUSPENSÃO (H1), em cm	ALTURA DE AREIA (H2), em cm	EA (%)	EAm (%)
1	13,95	9,35	67,0%	
2	14,1	9,7	68,8%	68,6%
3	14,8	10,35	69,9%	

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 11- Resultado do EA para pó de brita

AMOSTRA	ALTURA DE SUSPENSÃO (H1), em cm	ALTURA DE PÓ DE BRITA (H2), em cm	EA (%)	EAm (%)
1	14	10,75	76,8%	
2	14,1	10,9	77,3%	76,7%
3	13,8	10,5	76,1%	

Fonte: Autoria própria (2017).

De acordo com a norma DNIT-ES 031/2006, os valores de equivalente de areia para os agregados miúdos devem ser iguais ou superiores a 55%. Logo, pode-se verificar que ambos os agregados miúdos usados neste estudo apresentam resultados que atendem a especificação.

## 5.9 Massa Específica Solta e Compactada dos agregados

Conforme explicado no item 4.5.1, os agregados graúdos foram submetidos ao ensaio para determinação de massa específica solta e compactada e o agregado miúdo foi submetido ao ensaio de massa específica compactada. Vale ressaltar que, conforme realizados nos trabalhos de Cunha (2004), Mendes (2011) e Fengler (2015), optou-se por não utilizar areia na definição de um traço pelo método Bailey, assim apenas o pó de brita foi utilizado como agregado miúdo. Na Tabela 12 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 12 - Massa específica solta e compactada dos agregados

Materiais	Brita 1	Brita 0	Pó de brita
Massa Específica Solta (kg/m <sup>3</sup> )	1657,29	1608,71	-
Massa Específica Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1745,55	1713,83	1957,95

Fonte: Autoria própria (2017).

## 5.10 Cimento Asfáltico de Petróleo

Os resultados obtidos para ensaio de caracterização do ligante asfáltico são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros obtidos para o CAP

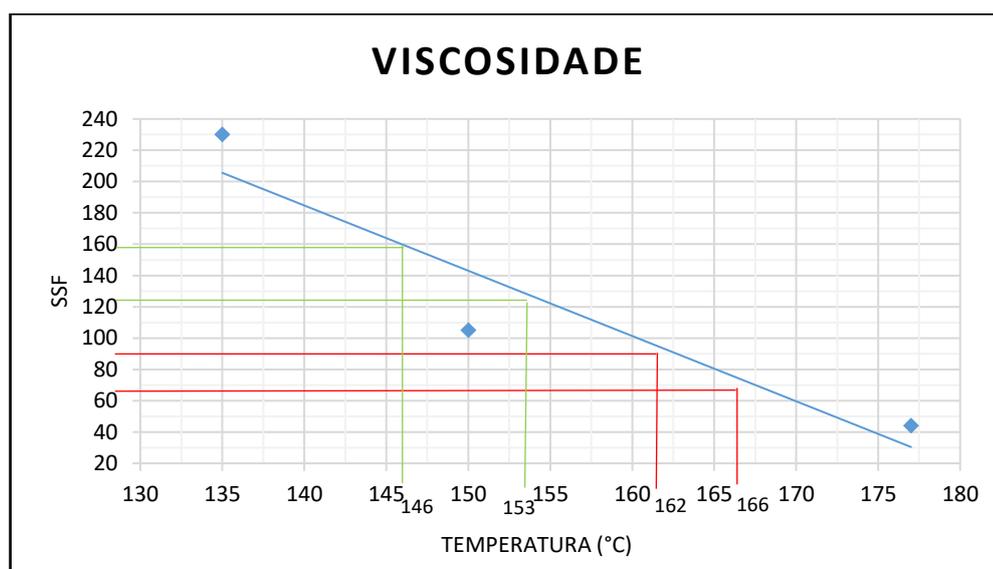
Parâmetro	Unidade	Norma do ensaio	Limites especificados	Resultado
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	ABNT NBR 6576	50 - 70	54
Viscosidade	135°C, mín	ABNT NBR 14950	141	230
Saybolt-Furol	150°C, mín		50	105
	177°C, mín		30-150	44
Ponto de amolecimento, mín	°C	ABNT NBR 6560	46	52,5

Fonte: Autoria própria (2017).

Verifica-se que todos os parâmetros ficaram dentro dos limites especificados para o CAP neste estudo. Os cálculos detalhados para obtenção dos valores apresentados acima estão contidos no Apêndice D.

Vale lembrar que, de acordo com a norma DNER-ME 043,95, as temperaturas de trabalho do ligante asfáltico, e conseqüentemente, dos agregados fica em função da viscosidade Saybolt-Furol do ligante asfáltico. A norma estipula que a temperatura para o ligante deve ficar entre valores que correspondem a uma viscosidade de  $85 \pm 10$  SSF. Para os agregados, a temperatura deve ser entre  $10^\circ\text{C}$  e  $15^\circ\text{C}$  acima da temperatura do ligante asfáltico. Por último, a temperatura para compactação da mistura asfáltica deve ser a correspondente a uma viscosidade de  $140 \pm 15$  SSF do ligante (Figura 41).

Figura 41 - Determinação das temperaturas de trabalho da mistura asfáltica



Fonte: Autoria própria (2017).

Dessa forma, verifica-se que a temperatura do ligante deve estar entre os limites de  $162^\circ\text{C}$  e  $166^\circ\text{C}$  (linhas vermelhas), enquanto a temperatura de compactação da mistura asfáltica deve estar entre os limites de  $146^\circ\text{C}$  e  $153^\circ\text{C}$  (linhas verdes). Além disso, a temperatura dos agregados para a mistura deve ter entre  $10^\circ\text{C}$  e  $15^\circ\text{C}$  a mais que a temperatura do ligante asfáltico. Os valores adotados foram os seguintes:

- i. CAP –  $162^\circ\text{C}$ ;
- ii. Agregados –  $175^\circ\text{C}$ ;
- iii. Compactação –  $150^\circ\text{C}$ ;

## 5.11 Dosagem Marshall

Foram confeccionadas duas misturas de CAUQ pela dosagem Marshall: uma mistura tradicional, com seleção de agregados pelo método das tentativas, e uma mistura Bailey, fazendo seleção de agregados pelo método Bailey. A seguir são apresentados os resultados obtidos nos parâmetros volumétricos e mecânicos para ambas as misturas, fazendo uso do CAP 50/70 abordado no item 5.10.

### 5.11.1 Definição do traço de agregados

Definiu-se, de acordo com o tamanho máximo nominal do agregado, que a faixa granulométrica de agregados a ser utilizada na mistura tradicional seria a Faixa B, especificada na norma DNIT 031/2006. Para a mistura Bailey, ficou decidido que o traço exato encontrado nos cálculos próprios do método seria o adotado, não sendo necessário que fosse enquadrado em nenhuma faixa do DNIT. A planilha que contém os cálculos realizados na determinação do traço da mistura Bailey se encontra no Apêndice G. Na Tabela 14 é apresentado o enquadramento da mistura tradicional na faixa B do DNIT e na Figura 42 a curva granulométrica da mistura tradicional.

Testando-se diferentes porcentagens de agregados, fez-se uso do software Microsoft Excel para se chega a uma porcentagem de agregados dada pelo traço abaixo:

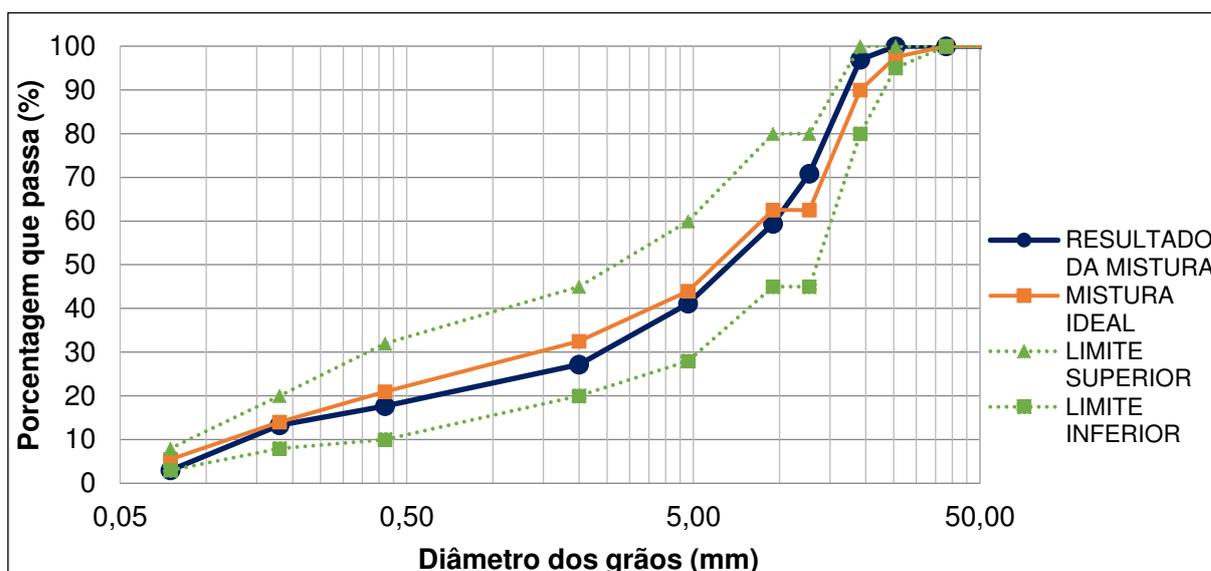
- i. 36% de brita 1;
- ii. 27% de brita 0;
- iii. 23% de pó de brita;
- iv. 03% de areia;
- v. 11% de cimento Portland (filer);

Tabela 14 - Enquadramento da mistura tradicional na Faixa B

Mistura tradicional					
Nº	PENEIRA (MM)	FAIXA		LIMITE DESEJAVEL	RESULTADO DA MISTURA
		LIMITE DE FAIXA INFERIOR	LIMITE DE FAIXA SUPERIOR		
2"	50.8	100	100	100	100,00
1 1/2"	38.1	100	100	100	100,00
1"	25.4	95	100	97,5	100,00
3/4"	19.1	80	100	90	96,94
1/2"	12.7	45	80	62,5	70,83
3/8"	9.5	45	80	62,5	59,39
4	4.8	28	60	44	41,15
10	2	20	45	32,5	27,20
40	0.42	10	32	21	17,71
80	0.18	8	20	14	13,28
200	0.075	3	8	5,5	3,00

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 42 - Curva granulométrica da mistura tradicional na Faixa B



Fonte: Autoria própria (2017).

Para a mistura Bailey, realizou-se a série de procedimentos matemáticos e se chegou ao seguinte traço:

- i. 31% de brita 1;
- ii. 43% de brita 0;
- iii. 23% de pó de brita;
- iv. 3% de Cimento Portland (filer);

A seguir mostra-se o roteiro de cálculo na definição do traço da mistura Bailey. O primeiro passo é definir os dados de entrada: massa específica escolhida (MEE), quantidade de material fino desejada, e as porcentagens de cada agregado, em volume, no conjunto de agregado graúdo ou miúdo. Pro presente estudo, os valores foram:

1. Massa específica escolhida de 102% da massa específica solta. Assim, a brita 1 e a brita 0 tiveram os resultados para MEE: 1690,44 kg/m<sup>3</sup> e 1640,9 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente;

2. Volume de cada agregado no conjunto de agregados graúdos foi de 45% para brita 1 e 55% para brita 0. A soma deve dar em 100%;

3. Acha-se, então, a contribuição de cada agregado pela multiplicação da MEE com a volume desejado: 760,7 kg/m<sup>3</sup> para brita 1; 902,49 kg/m<sup>3</sup> para brita 0;

4. Acha-se os vazios no agregado graúdo pela fórmula abaixo:

$$\text{Vazios no agregado graúdo} = \left( 1 - \frac{\text{massa unitária escolhida}}{G_s \times 1000} \right) \times \% \text{ AG da mistura} \quad (27)$$

Brita 1 = 16,99% e Brita 0 = 22,16%, resultando na soma de 39,157% de vazios no agregado graúdo;

5. A quantidade de vazios no agregado graúdo é utilizado para achar a contribuição do agregado miúdo na mistura, mostrando o preenchimento dos vazios pelas partículas menores:

$$\text{Contribuição A. Miúdo} = \text{MEE} \times 100\% \times 39,157\% = 766,74 \text{ kg/m}^3;$$

6. Soma-se, então a contribuição dos três agregados, totalizando em 2429,92 kg/m<sup>3</sup> para a MEE da mistura;

7. Dividindo-se a contribuição de cada agregado pela MEE da mistura, chega-se ao primeiro traço: 31,3% de brita 1; 37,1% de brita 0 e 31,6% de pó de brita;

8. A seguir é determinado o material passante na PCP nos agregados graúdos e o material retido na PCP no agregado miúdo, pela granulometria dos materiais: B1 = 0,064%; B0 = 17,16%; Pó = 2,79%;

9. Com esses dados, sabe-se então a quantidade de agregado miúdo na porção da agregado graúdo e a porcentagem de agregado graúdo na porção de agregado miúdo.

$$\text{Porcentagem de A. Miúdo} = \% \text{ no traço inicial} \times \% \text{ passante na PCP}$$

$$\text{Porcentagem de A. Graúdo} = \% \text{ no traço inicial} \times \% \text{ retida na PCP}$$

B1 = 0,02% e B0 = 6,373%, totalizando 6,3934%;

Pó = 0,88%;

10. O traço é, então, corrigido de acordo com as fórmulas abaixo, sendo a primeira pros agregado graúdos e a segunda pro agregado miúdo:

Ajuste da porcentagem na mistura =

$$= (\% \text{inicial}) + (\text{AF no AG}) - \left( \frac{\% \text{ inicial } \times \text{ soma de AG no AF}}{\% \text{ total de AG}} \right) \quad (28)$$

Porcentagem de material ajustado na mistura =

$$= (\% \text{ inicial}) + (\text{AG no AF}) - \left( \frac{\% \text{ inicial } \times \text{ soma de AF em AG}}{\% \text{ total de AF}} \right) \quad (29)$$

B1 = 30,923%; B0 = 43,036%; Pó = 26,041%;

11. Depois é determinada a quantidade de material passante na peneira #200 para cada agregado, com o intuito de definir a % de material de enchimento na mistura:

$$\text{Porcentagem contribuinte da peneira } 0,075 \text{ para cada material} = \text{porcentagem ajustada do material} \times \text{porcentagem passante na peneira } 0,075\text{mm para cada material.} \quad (30)$$

B1 = 0%; B1 = 0,07%; Pó = 0,93%;

12. Por fim, acha-se a quantidade de filer requerido, de acordo com o especificado no início. Desejou-se 4% de material de enchimento, então fez-se a relação abaixo para determinar a quantidade de filer a adotar no traço:

$$\text{Porcentagem de FM} = \left( \frac{\% \text{ desejada de } 0,075\text{mm} - \% \text{ de } 0,075\text{mm na mistura}}{\% \text{ de } 0,075\text{mm no filler}} \right) \quad (31)$$

13. Assim, é feita a correção de acordo com a fórmula abaixo, e chega-se ao traço final da mistura Bailey:

$$\text{Porcentagem final de agregado fino na mistura} = \text{porcentagem ajustada da mistura} - \left( \frac{\% \text{ AF } \times \text{ FM}}{\% \text{ total de AF}} \right) \quad (32)$$

B1 = 31%; B0 = 43%; Pó = 23%; Cimento Portland = 3%;

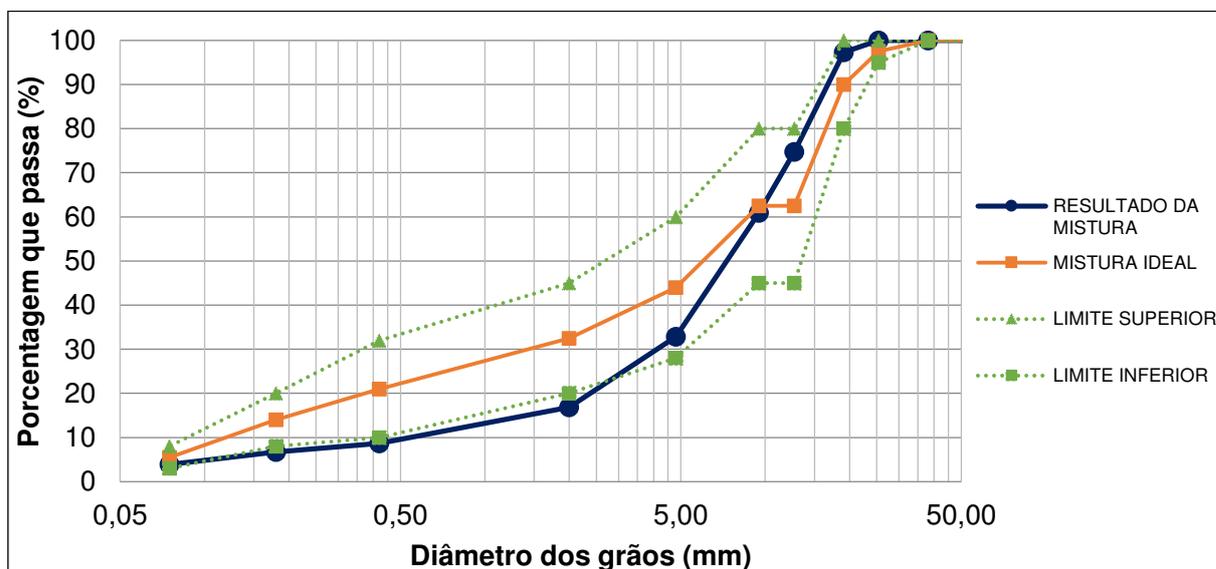
A Tabela 15 contém a granulometria dos agregados para a mistura Bailey comparando-se aos valores ideais da Faixa B do DNIT e a Figura 43 apresenta a curva granulométrica da mistura Bailey.

Tabela 15 - Granulometria da mistura Bailey comparada aos limites do DNIT

Nº	PENEIRA (MM)	FAIXA LIMITE DE FAIXA		LIMITE DESEJAVEL	RESULTADO DA MISTURA
		INFERIOR	SUPERIOR		
2"	50.8	100	100	100	100,00
1 1/2"	38.1	100	100	100	100,00
1"	25.4	95	100	97,5	100,00
3/4"	19.1	80	100	90	97,35
1/2"	12.7	45	80	62,5	74,75
3/8"	9.5	45	80	62,5	60,90
4	4.8	28	60	44	32,81
10	2	20	45	32,5	16,85
40	0.42	10	32	21	8,69
80	0.18	8	20	14	6,72
200	0.075	3	8	5,5	3,91

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 43 - Curva granulométrica da mistura Bailey na Faixa B DNIT

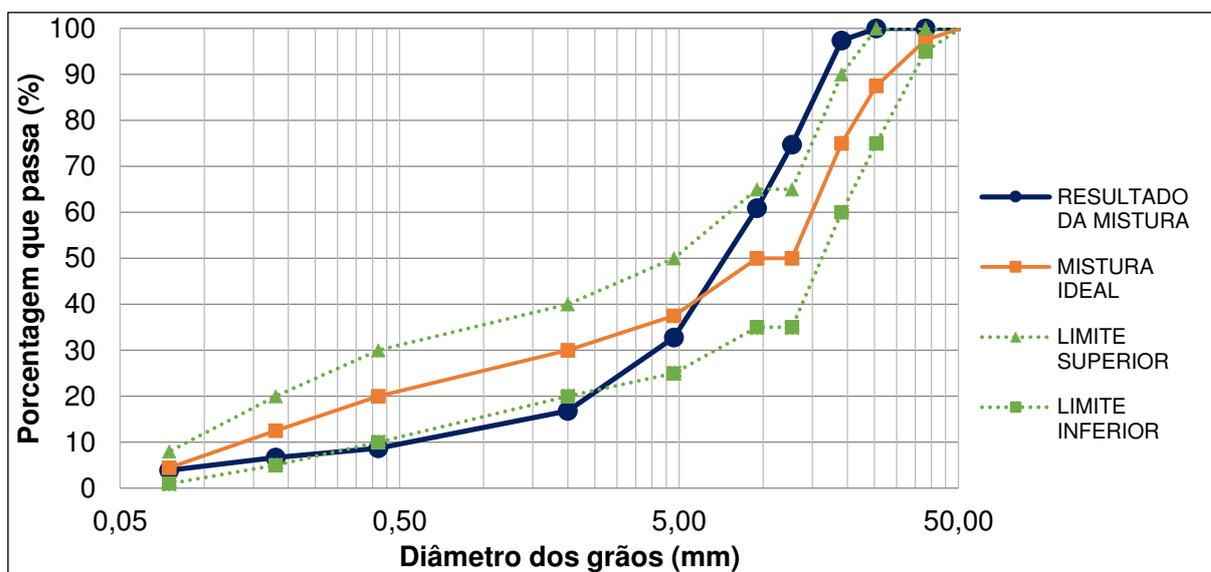


Fonte: Autoria própria (2017).

Vale ressaltar que por se tratar de um método americano, e não possuir especificação nacional, não se considera necessário enquadrar o traço determinado em alguma faixa especificada pelo DNIT. Porém, para efeitos de comparação, a

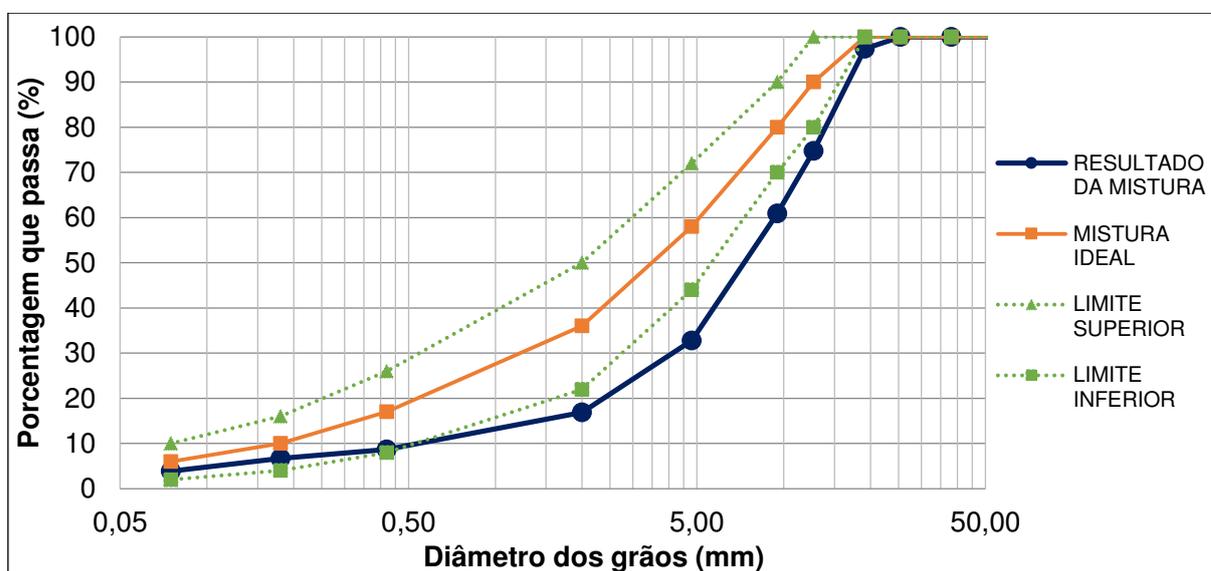
mistura Bailey foi inserida nas outras faixas de graduação especificadas pelo DNIT a fim de se determinar em qual das faixas o traço definido pelo método Bailey se enquadra melhor. As curvas são apresentadas nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 - Curva granulométrica da mistura Bailey na faixa A DNIT



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 45 - Curva granulométrica da mistura Bailey na faixa C DNIT



Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando as curvas apresentadas nas figuras, fica fácil concluir que a faixa granulométrica do DNIT na qual o traço da mistura Bailey mais se enquadra é a faixa B, portanto a partir dela ficaram definidos os teores de CAP a serem considerados na confecção dos corpos de prova.

### 5.11.2 Parâmetros volumétricos

Buscou-se confeccionar 3 corpos de prova para cada teor de ligante considerado. Para a mistura tradicional, a porcentagem de ligante variou de 4,0% a 6,5%. Já para a mistura Bailey, a porcentagem de ligante variou de 4,5% a 6,5%, totalizando 33 corpos de prova somando as duas misturas.

Os parâmetros obtidos na dosagem Marshall (DMT, Dap, Vv, VAM, VCB e RBV) para a mistura tradicional são apresentados na Tabela 16 e para a mistura Bailey na Tabela 17.

Tabela 16 - Parâmetros volumétricos para mistura tradicional

Teor de Ligante (%)	DMT (g/cm <sup>3</sup> )	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
6,5%	2,504	2,479	1,02	15,64	16,66	93,87
6,00%	2,523	2,495	1,13	14,53	15,66	92,81
5,5%	2,543	2,499	1,73	13,34	15,07	88,53
5,00%	2,563	2,500	2,43	12,14	14,57	83,31
4,5%	2,583	2,513	2,71	10,98	13,69	80,23
4,0%	2,632	2,521	4,20	8,76	12,96	77,25
Parâmetros estabelecidos pela DNIT 031/2006 - ES	-	-	3 a 5	-	Mín. 15	75 - 82

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 17 - Parâmetros volumétricos para mistura Bailey

Teor de Ligante (%)	DMT (g/cm <sup>3</sup> )	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
6,00%	2,515	2,399	4,612	13,975	18,587	75,190
5,5%	2,535	2,432	4,063	12,986	17,050	76,260
5,00%	2,554	2,414	5,482	11,718	17,200	69,220
4,5%	2,575	2,440	5,250	10,660	15,910	66,990
4,0%	2,595	2,468	4,894	9,584	14,478	66,210
Parâmetros estabelecidos pela DNIT 031/2006 - ES	-	-	3 a 5	-	Mín. 15	75 - 82

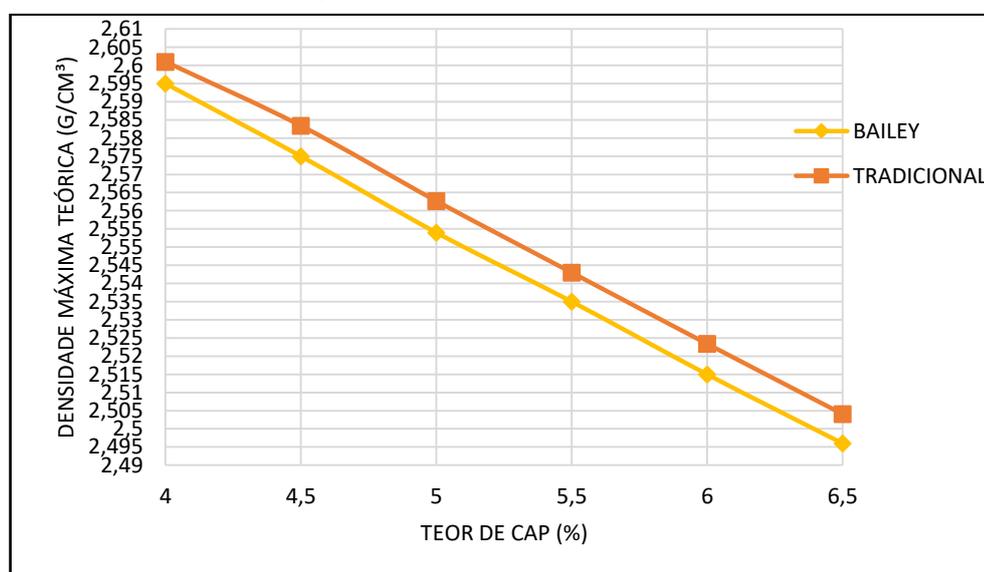
Fonte: Autoria própria (2017).

Percebe-se assim, que para a mistura tradicional, o volume de vazios obteve resultados muito baixos, já que apenas a partir de um teor de CAP, próximo de 4%, foi possível atingir o volume de vazios mínimo de 3%. Segundo Balbo (2007),

quanto maior é a porcentagem de material passante na peneira nº200, maior é a redução do volume de vazios e queda no teor de asfalto da dosagem. Sendo assim, o fato do traço da mistura tradicional apresentar grande quantidade de material fino (filer) acarretou na redução drástica do volume de vazios da mistura. Além de resultar em valores de RBV bem altos também.

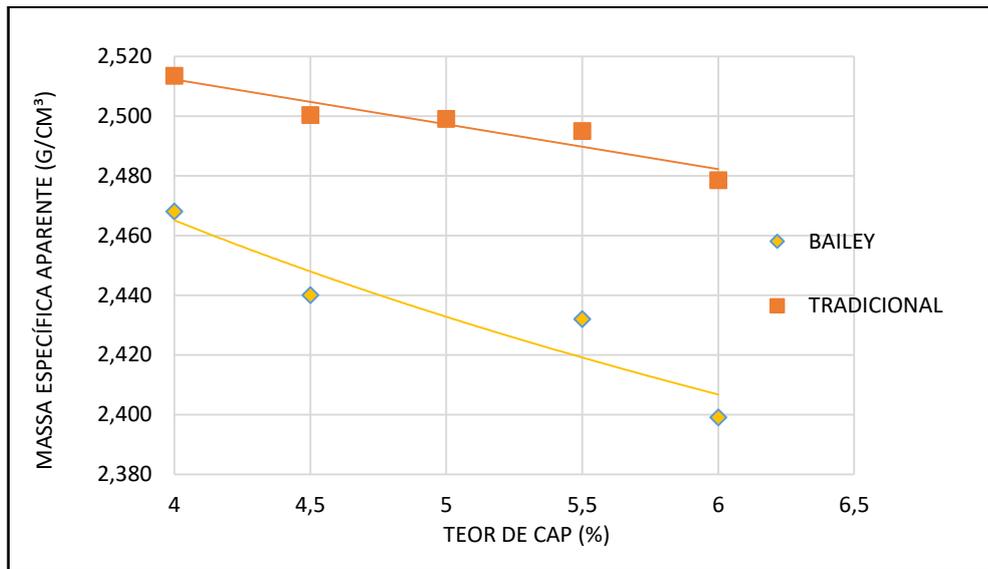
Para a mistura Bailey, os parâmetros obtiveram resultados mais satisfatórios, dentro dos limites especificados para a maioria dos teores de asfalto considerados. Os parâmetros apresentados nas Tabelas 16 e 17 estão plotados nas Figuras 46 a 50, comparando os resultados para as duas misturas.

Figura 46 – DMT das duas misturas



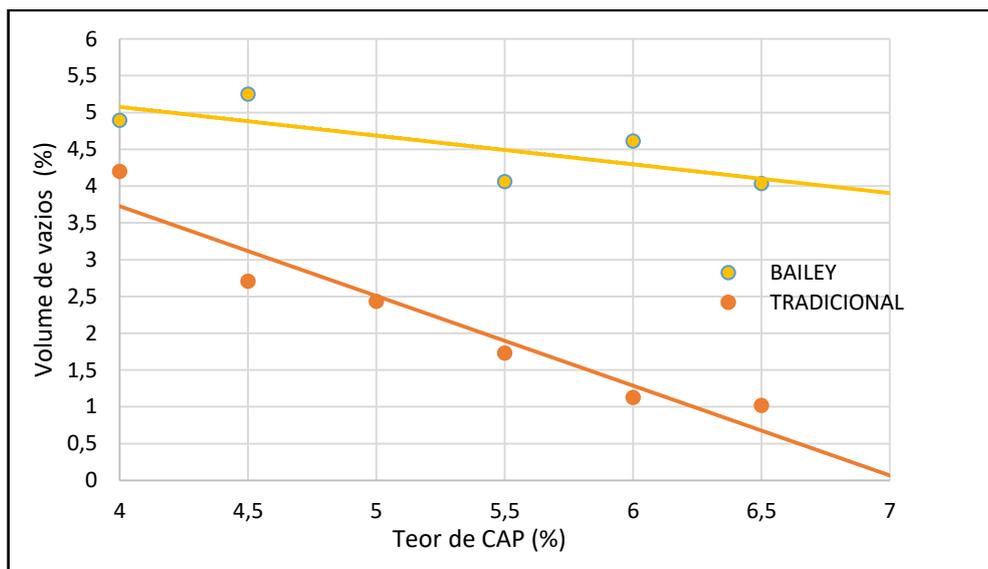
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 47 - Dap das duas misturas



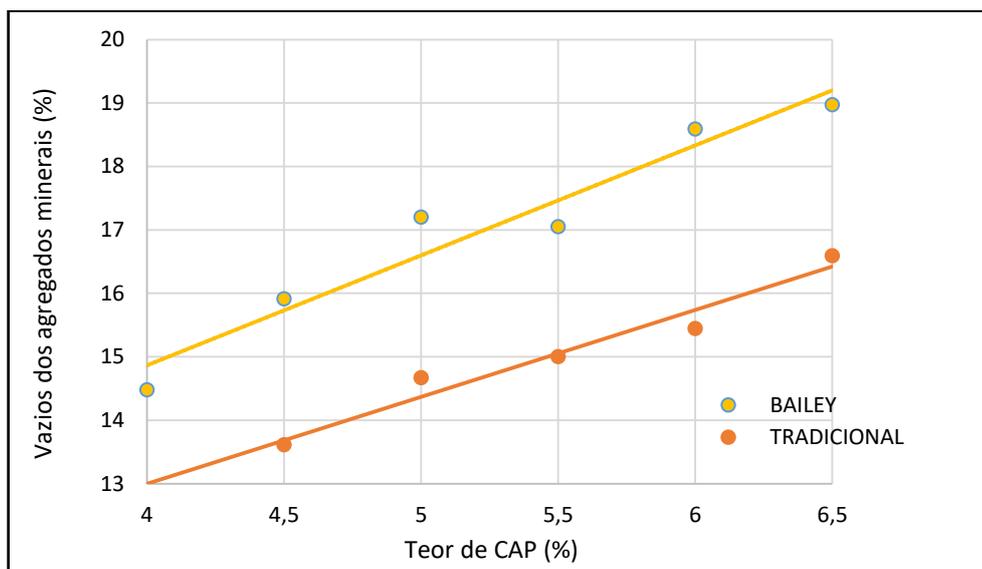
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 48 - Volume de vazios das duas misturas



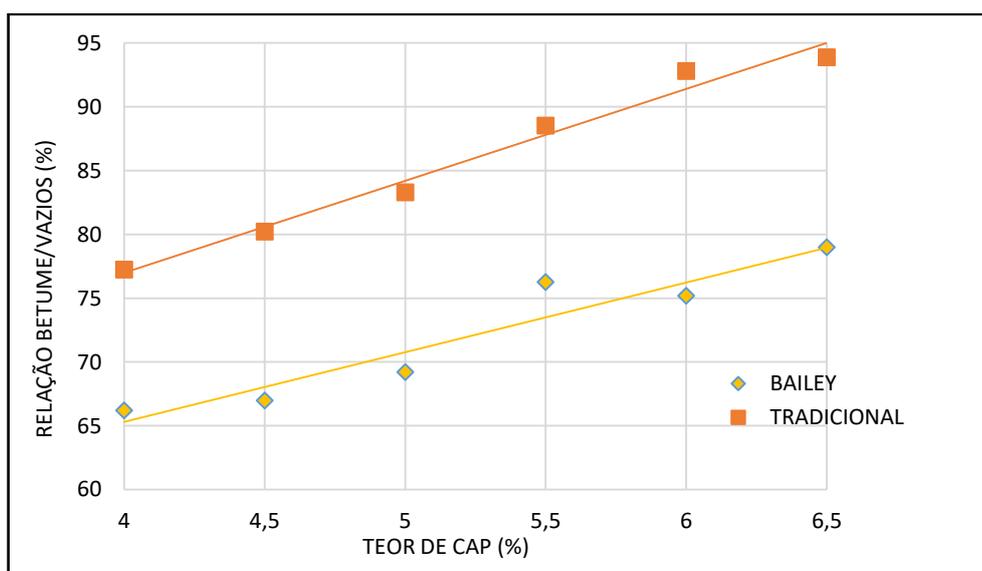
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 49 - VAM das duas misturas



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 50 - RBV das duas misturas



Fonte: Autoria própria (2017).

Comparando os valores entre as misturas, percebe que a DMT atingiu valores maiores na mistura Bailey, em contrapartida a Dap dos CP's da mistura Bailey foram inferiores à Dap dos CP's da mistura tradicional, configurando mistura mais densa. O Vv da mistura Bailey apresentou resultados bem maiores que o Vv da mistura tradicional, o que pode ser explicado pela quantidade alta de material fino na mistura tradicional. De forma semelhante, os valores de VAM da mistura Bailey foram maiores do que os valores de VAM para a mistura tradicional, o que pode ser explicado

pelo mesmo motivo do parâmetro Vv. Por fim, valores de RBV da mistura tradicional se mostraram bem superiores aos valores de RBV da mistura Bailey, mostrando que a os vazios são preenchidos quase completamente pelo ligante na mistura tradicional.

### 5.11.3 Propriedades Mecânicas

Os resultados de estabilidade e fluência dos corpos de prova são apresentados na Tabela 18. Verifica-se que tanto a mistura tradicional quanto a mistura Bailey apresentaram baixa estabilidade para a maioria dos CP's, sendo que apenas o teor de CAP de 4,5% da mistura tradicional ficou acima do limite mínimo especificado de 500 kgf. A mistura Bailey não teve nenhum CP que tenha tingido o mínimo de Estabilidade Marshall. Tal fato representa uma situação incomum, e pode ser explicado por fatores acidentais, como possíveis problemas técnicos na prensa Marshall no decorrer do tempo de criação deste trabalho.

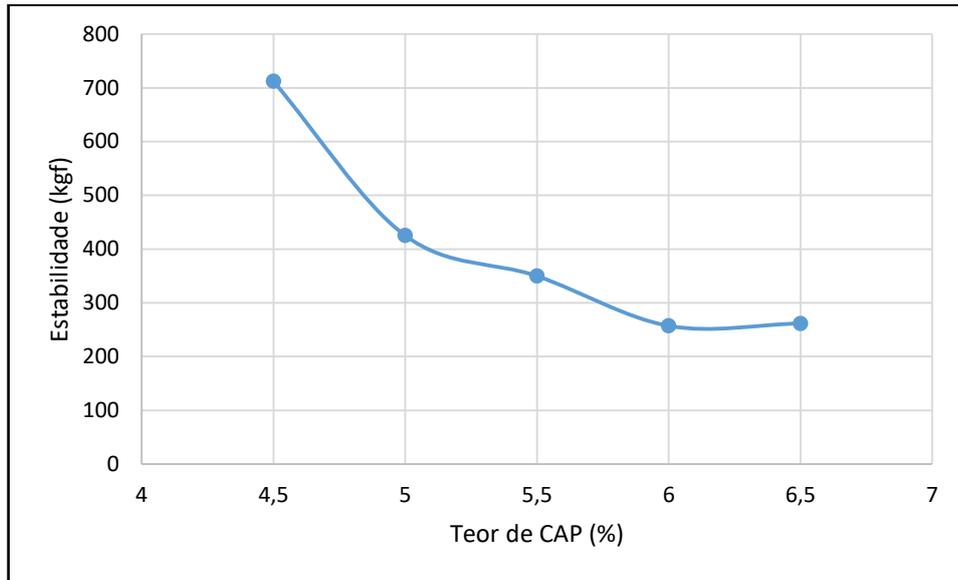
Tabela 18 - Resultado de Estabilidade e Fluência das misturas

%CAP	Mistura Bailey		%CAP	Mistura tradicional	
	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)		Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
6	212,9	6,35	6,5	261,6	10,32
5,5	231,88	5,01	6	257,2	10,87
5	289,67	6,79	5,5	349,8	10,76
4,5	153,17	6,75	5	425,1	10,79
4	194,47	6,43	4,5	712,1	10,72

Fonte: Autoria própria (2017).

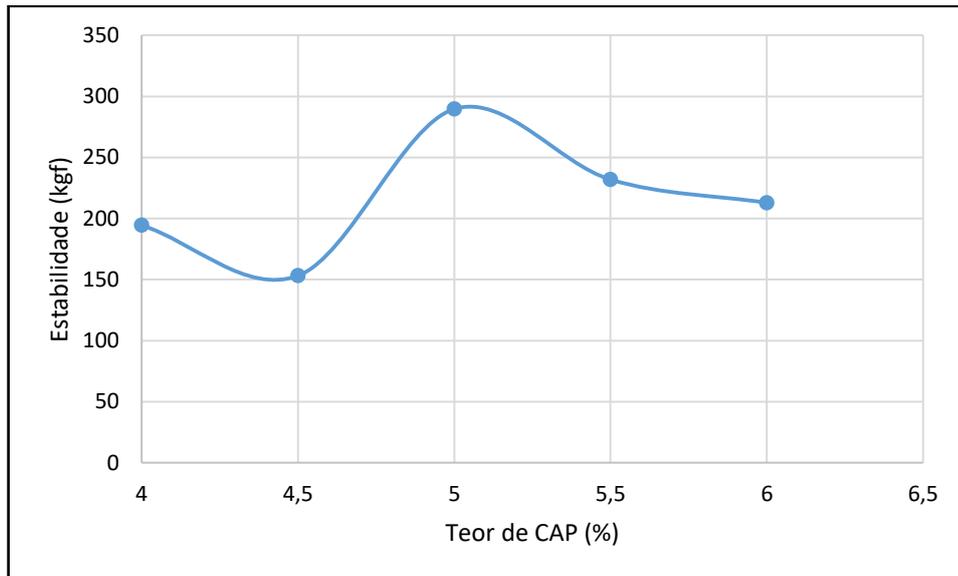
Assim, pode-se apresentar os gráficos de estabilidade para a mistura tradicional na Figura 51 e para a mistura Bailey na Figura 52, além da comparação entre as duas misturas na Figura 53.

Figura 51 - Estabilidade da mistura tradicional



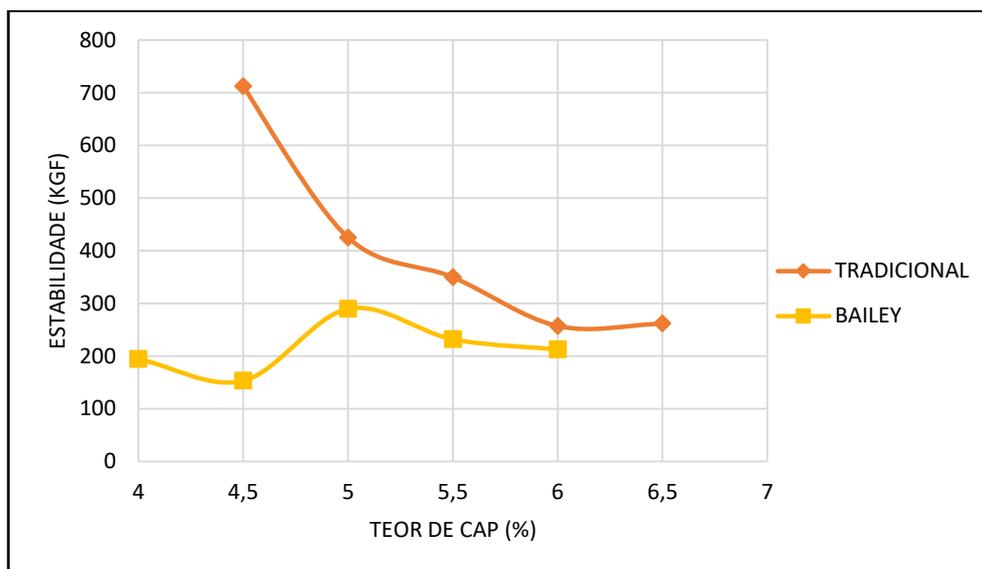
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 52 - Estabilidade da mistura Bailey



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 53- Estabilidade das duas misturas

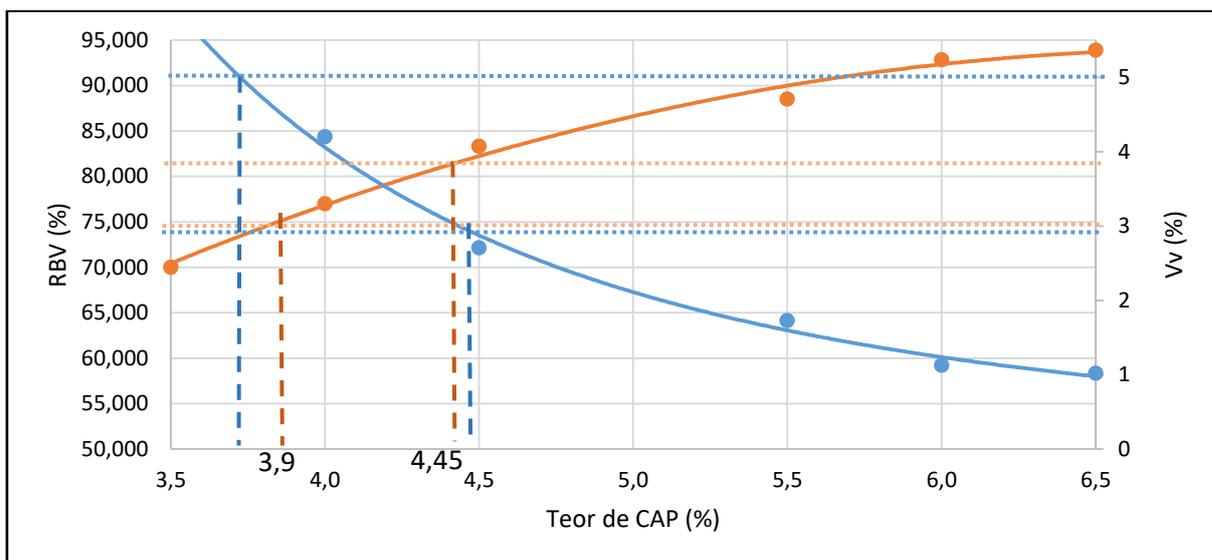


Fonte: Autoria própria (2017).

#### 5.11.4 Teor de ligante ótimo

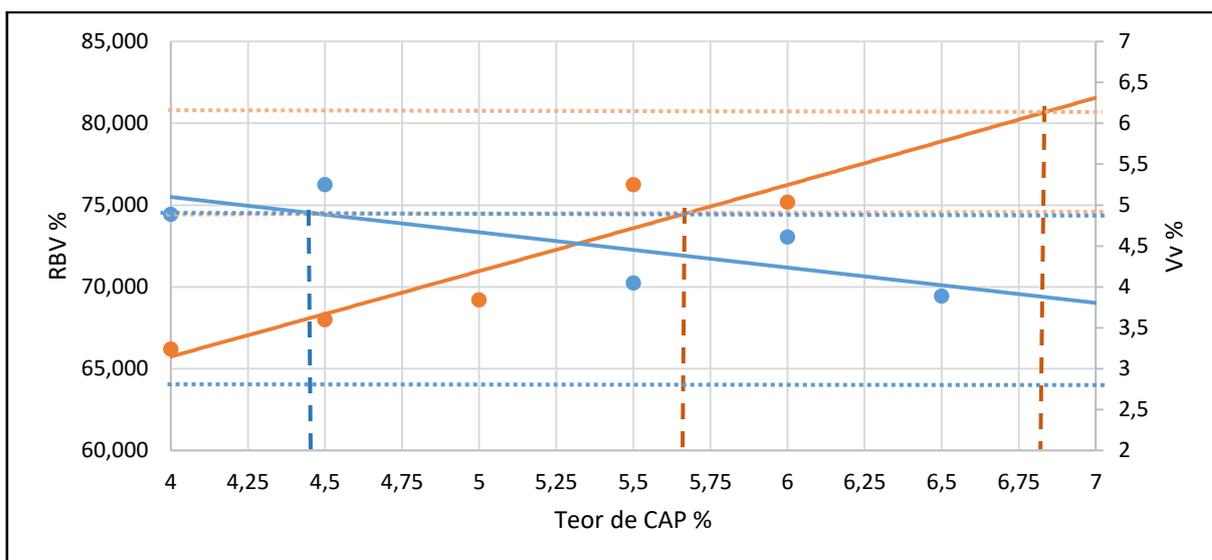
Para se obter o teor ótimo de ligante asfáltico, tanto para a mistura tradicional, quanto para a mistura Bailey, optou-se por adotar o método que correlaciona o volume de vazios ( $V_v$ ) da mistura e a relação betume-vazios (RBV) com os teores de ligante, formando um gráfico de três parâmetros. A partir disso, foram definidos os teores de CAP equivalentes à interceptação da linha de  $V_v$  da mistura nos limites de  $V_v$  e à interceptação da linha de RBV nos limites de RBV, todos estabelecidos na norma DNIT 031/2006 (Figuras 54 e 55). Para bom entendimento, a linha vermelha representa o RBV (%), enquanto a azul representa o  $V_v$  (%).

Figura 54 - Determinação do teor ótimo da mistura tradicional



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 55 - Determinação do teor ótimo da mistura Bailey



Fonte: Autoria própria (2017).

O valor do teor ótimo para a mistura tradicional resultou de uma média aritmética entre os valores de 3,9% e 4,45%, que nos dá o resultado de aproximadamente 4,2% de CAP.

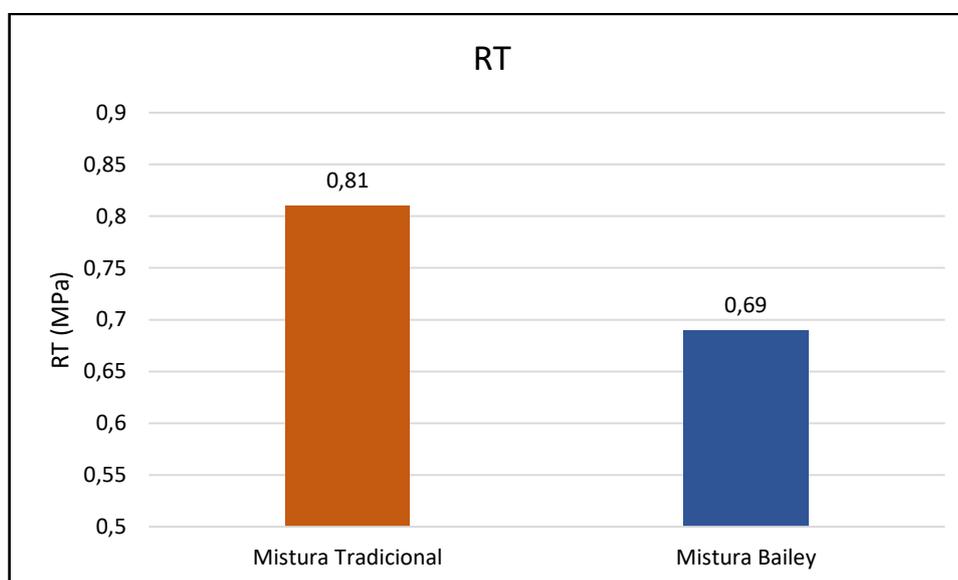
O valor do teor ótimo para a mistura Bailey resultou de uma média aritmética entre os valores de 5,7% e 6,76% de CAP, dando um resultado de, aproximadamente, 6,2% para o teor ótimo. É válido comentar que o teor de CAP extremo correspondente à intersecção da linha de Vv no limite inferior (3%) teria um

valor muito elevado, tanto que não coube no gráfico. E como recomendado, o cálculo foi feita para os dois teores entre os extremos.

#### 5.11.5 Resistência à Tração por compressão diametral

A Figura 56 apresenta os resultados para resistência à tração por compressão diametral, à temperatura de 25°C no corpo de prova, para ambas as misturas estudadas no presente trabalho. Verifica-se que ambas as misturas atingiram o requisito mínimo no valor de RT, especificado por norma, de 0,65 MPa. Embora os resultados tenham sido favoráveis, a mistura tradicional ainda obteve o valor de RT maior do que a mistura Bailey, o que não era esperado, considerando a base teórica na qual o método Bailey se fundamenta para selecionar agregados. No geral, a resistência à tração por compressão diametral da mistura Bailey obteve um valor com cerca de 85% do valor da RT para a mistura tradicional.

Figura 56 - Resultado da Resistência à Tração



Fonte: Autoria própria (2017).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve seu desenvolvimento baseado na ideia de propor um método alternativo para selecionar agregados a serem utilizados em misturas asfálticas densas: o Método Bailey. A razão para isso é que por utilizar procedimentos que levam em conta parâmetros volumétricos dos agregados, o método proposto tende a garantir uma estrutura mais forte do esqueleto mineral das misturas, o que resultaria em revestimentos mais resistentes.

Levando-se em conta a importância dos agregados no desempenho de um revestimento asfáltico, buscou-se, num primeiro momento, realizar pesquisa teórica sobre o Método Bailey e todos os parâmetros inerentes a ele, bem como de vários outros conceitos relacionados à pavimentação, ligante asfáltico, enquadramento e seleção granulométrica, além da importância dos agregados em uma mistura asfáltica.

O segundo passo tratou a respeito da definição dos materiais a serem utilizados no decorrer do estudo e quais ensaios laboratoriais seriam realizados em cada tipo de agregado escolhido, para caracterização e conhecimento da aplicabilidade em mistura asfáltica. Dito isso, todos os agregados escolhidos passaram por ensaios de granulometria e determinação da massa específica real ou aparente. O agregado graúdo (brita e brita 0) foram submetidos, também, aos ensaios de abrasão Los Angeles e adesividade ao ligante betuminoso. Também foram realizados os ensaios de índice de degradação após compactação Marshall, índice de forma e determinação da massa específica solta e compactada, próprias do Método Bailey.

O ligante asfáltico utilizado, CAP 50/70, passou por ensaios de caracterização básicos como: penetração, viscosidade Saybolt-Furol e ponto de amolecimento. Ambas as misturas foram dosadas a partir da dosagem Marshall, havendo distinção apenas na etapa de seleção do traço de agregados para cada mistura. Por último, as duas misturas confeccionadas foram submetidas aos ensaios de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração por compressão diametral.

As conclusões a que se chegou podem ser divididas em três tipos: em relação à aplicabilidade e utilização do Método Bailey, em relação aos parâmetros volumétricos de ambas as misturas e em relação aos parâmetros mecânicos de ambas as misturas.

Quanto à aplicabilidade e utilização do Método Bailey, verificou-se que com um mínimo de dedicação e empenho para estudar e entender o método, pode-se obter maiores facilidades no processo de seleção dos agregados para uma mistura asfáltica. Observou-se a aplicação de relações entre volumes dos agregados para se chegar a um traço inicial, o que ilustra a base teórica do método. Quanto a esse ponto, conclui-se que, diferentemente do método das tentativas, que tem um processo mais complexo e demorado na escolha do traço, pelo método Bailey pode-se chegar a um traço de agregados que resultaria em um CAUQ capaz de atingir os limites de resistência mecânica e parâmetros volumétricos desejados.

Quanto aos parâmetros volumétricos das misturas confeccionadas, verificou-se que houve dificuldade para a mistura tradicional apresentar valores dentro das especificações da norma. O volume de vazios e os vazios no agregado mineral obtiveram valores abaixo dos limites da norma, o que pode ser explicado pelo traço escolhido com alto teor de material de enchimento (filer). Já a relação betume-vazios e a densidade aparente da mistura apresentaram valores altos, maiores que os da mistura Bailey.

Por outro lado, a mistura Bailey se enquadrou facilmente nos limites estabelecidos por norma, com volume de vazios próximos de 4% e 5%, relação betume vazios também atingindo o limite inferior de 75%, vazios no agregado mineral acima do limite especificado de 15%, porém apresentando densidade teórica máxima menores, na maioria dos corpos de prova, do que a mistura tradicional. Portanto, conclui-se que para parâmetros volumétricos, a mistura Bailey adquiriu resultados satisfatórios, dentro dos limites, e conseqüentemente, melhores do que os da mistura tradicional.

Referente aos parâmetros mecânicos das duas misturas, verificou-se que ambas as misturas apresentaram valores extremamente baixos para a Estabilidade Marshall, o que pode ser considerado incomum, e talvez seja algo causado por quesitos técnicos no aparelho utilizado para o ensaio em questão. Apenas os corpos de prova de uma porcentagem de ligante (4,5%), da mistura tradicional, atingiu o limite mínimo de 500 kgf para a estabilidade. Na mistura Bailey, nenhum teor de ligante resultou em corpos de prova que atingissem o limite mínimo especificado por norma.

Para o ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral, verificou-se que ambas as misturas ficaram acima do valor mínimo especificado por norma, de

0,65 MPa. Porém, comparando as duas misturas, concluiu-se que a mistura tradicional obteve resultados melhores para a RT do que a mistura Bailey, o que não era esperado, já que o Método Bailey propõe uma mistura com maior capacidade de suporte e resistência mecânica. Ainda assim, levando-se em conta o traço rico em filler da mistura tradicional, o que a deixa com aspecto bem rígido, pode-se finalizar dizendo que os resultados obtidos foram satisfatórios, já que se trata de um primeiro experimento com o Método Bailey e que há muito o que se aprender a respeito dele.

Concluído o trabalho, verificou-se que a realização de alguns procedimentos complementares poderia resultar em melhores resultados na mistura Bailey. Dessa forma, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- 1) Realização de mais ensaios de controle e caracterização para o agregado, como o Desgaste Cântabro e o ensaio Lottman;
- 2) Realização de ensaios de avaliação do desempenho da mistura asfáltica, como o Módulo de Resiliência e o Creep Dinâmico;
- 3) Adequação do traço Bailey às várias faixas do DNIT;
- 4) Utilização do mesmo número de agregados para as duas misturas;

## REFERÊNCIAS

AASHTO. Designation. **T 19M/T 19-09**: massa específica unitária e vazios no agregado. 200?. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR: 6560/00**: materiais asfálticos - determinação de ponto de amolecimento- método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576/07**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809/05**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 14950/03**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AURILIO, Vince; PINE, William J; LUM, Paul. **The Bailey Method: achieving volumetrics and HMA compactability**. Asphalt Institute. Ontario, 2005. Disponível em: < <http://www.asphaltinstitute.org/bailey-method-achieving-volumetrics-and-hma-compactability/>>. Acesso em 09 out. 2017.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008. 504 p. il. color.

BLOW Mark. **Bailey Method Offer Technicians Volumetric Control**. Asphalt Pro Magazine. Asphalt Institute. Harrisburg, 2009. Disponível em: <<http://asphaltmagazine.com/bailey-method-offers-technicians-volumetric-control/>>. Acesso em: 04 out. 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. 20. ed. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>, Acesso em: 05 jul. 2017.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método de Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. - 2004. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 003/99**: Material Asfáltico- determinação da penetração: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1999.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 004/94**: material asfáltico determinação da viscosidade “Saybolt-

Furol” a alta temperatura: método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 035/98**: agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043/95**: misturas betuminosas a quente – ensaio marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 054**: equivalente de areia – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.10.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 078/94**: Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081**: agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998. 6 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 084**: agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 085/94**: Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 401/99**: agregados – determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante -  $ID_{ML}$  e sem ligante -  $ID_M$

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual da Pavimentação**. 3. ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719)

\_\_\_\_\_. **DNIT-ES 031**: pavimentos flexíveis - concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 136**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT. **Manual de planejamento cicloviário**. 3. ed., rev. e amp. Brasília: GEIPOT, 2001.

FENGLER, Ricardo Zardin. **Método Bailey: avaliação laboratorial de misturas asfálticas a quente**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

FRAENKEL, Benjamin B. **Engenharia Rodoviária**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S/A, 1980.

GOUVEIA, Lilian Taís de. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340 f. il. color. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13022007-171503/pt-br.php>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

INSTITUTO DO ASFALTO. **Manual de Asfalto**. 1989. 599 p. il.

JONES, Wayne. **A Tool For Evaluating HMA Volumetrics and Field Compactibility**. Asphalt Institute. Asphalt Magazine, online, Columbus, 2006. Disponível em: <[www.asphaltmagazine.com/understanding-the-bailey-method](http://www.asphaltmagazine.com/understanding-the-bailey-method)>. Acesso em: 03 out. 2017.

MANJUNATH K.R; POORNACHANDRA Dev N.B. **Design Of Hot Mix Asphalt Using Bailey Method Of Gradation**. International Journal of Research in Engineering and Technology, online, Bangalore, v. 3, n. 6, p. 386-393, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0306072>>. Acesso em: 14 set. 2017.

MATHEW, Tom V.; RAO K. V. Krishna. **Introduction to Pavement Design**. Introduction to Transportation Engineering. National Programme on Technology Enhanced Learning, online, Mumbai, 2007. Disponível em: <<http://nptel.ac.in/courses/105101087/downloads/Lec-19.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2017.

MEDINA, J. de. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MENDES, Larissa de Oliveira. **A utilização do método Bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas**. 2011. 130 f.: il. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

PAZINATTO, João Antonio. **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha**. 2014. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. NAPA Research and Education Foundation. 2. ed. Lanham, Maryland, 1996. NCAT.

SANTANNA-GRECO, J. A. **Misturas Betuminosas Densas: dosagem marshall** (notas de aula). Construção de Estradas e Vias Urbanas. UFMG. Belo Horizonte, 200?. (Apostila da disciplina ETG033: Construção de Estradas e Vias Urbanas). Disponível em: <<files.israel-tecnico-qualidade.webnode.com/200001164-36dc437d9b/dosagem%20Marshall.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2017.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 2001. v. 2, il.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - TRB. NATIONAL ACADEMIES. **Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design**. Transportation Research E-Circular, online, Washington, n. e-c044, 2002. Disponível em: <[www.trb.org/Publications/Blurbs/161442.aspx](http://www.trb.org/Publications/Blurbs/161442.aspx)>. Acesso em: 03 out. 2017.

YODER, E. J; WITCZAK, M. W. **Princípios de dimensionamento de pavimentos**. Nova Jersey: Wiley & Sons, Inc. 1975. 2 ed.

## APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Quadro 3 – Granulometria da brita 0

GRANULOMETRIA BRITA 0		AMOSTRA (g)				
			2088,67			
PENEIRA	ABERTURA					
Pol.	mm	RETIDO (g)	RETIDO ACUM. (g)	%RETIDO	%RETIDO ACUM.	%PASSANTE
1/2"	12,5	8,4	8,4	0,40%	0,40%	99,60%
3/8"	9,5	413,81	422,21	19,81%	20,21%	79,79%
#4	4,75	1308,14	1730,35	62,63%	82,84%	17,16%
#8	2,36	290,08	2020,43	13,89%	96,73%	3,27%
#10	2	12,56	2032,99	0,60%	97,33%	2,67%
#30	0,6	18,38	2051,37	0,88%	98,21%	1,79%
#40	0,425	4,02	2055,39	0,19%	98,41%	1,59%
#80	0,18	17,74	2073,13	0,85%	99,26%	0,74%
#200	0,075	11,97	2085,1	0,57%	99,83%	0,17%
FUNDO		3,57	2088,67	0,17%	100,00%	0,00%

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 4 – Granulometria da brita 1 (amostra 1)

GRANULOMETRIA BRITA 1		AMOSTRA 1				
			2411,6			
Pol.	mm	RETIDO (g)	RETIDO ACUM. (g)	%RETIDO	%RETIDO ACUM.	%PASSANTE
1"	25	0	0	0%	0%	100%
3/4"	19	204,80	204,8	8,49%	8,49%	91,51%
1/2"	12,5	1780,00	1984,8	73,81%	82,30%	17,70%
3/8"	9,5	390,40	2375,2	16,19%	98,49%	1,51%
#4	4,75	35,00	2410,2	1,45%	99,94%	0,06%
#10	2	0,30	2410,5	0,01%	99,95%	0,05%
#40	0,425	0,20	2410,7	0,01%	99,96%	0,04%
#80	0,18	0,20	2410,9	0,01%	99,97%	0,03%
#200	0,075	0,50	2411,4	0,02%	99,99%	0,01%
FUNDO		0,20	2411,6	0,01%	100,00%	0,00%

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 5 – Granulometria da brita 1 (amostra 2)

GRANULOMETRIA BRITA 1		AMOSTRA 2				
			2328			
pol.	mm	RETIDO (g)	RETIDO ACUM. (g)	%RETIDO	%RETIDO ACUM.	%PASSANTE
3/4"	19	201,50	201,50	8,66%	8,66%	91,34%
1/2"	12,5	1684,50	1886,00	72,36%	81,01%	18,99%
3/8"	9,5	399,10	2285,10	17,14%	98,16%	1,84%
#4	4,75	41,30	2326,40	1,77%	99,93%	0,07%
#10	2	0,38	2326,78	0,02%	99,95%	0,05%
#40	0,425	0,23	2327,01	0,01%	99,96%	0,04%
#80	0,18	0,19	2327,20	0,01%	99,97%	0,03%
#200	0,075	0,63	2327,83	0,03%	99,99%	0,01%
FUNDO		0,17	2328,00	0,01%	100,00%	0,00%

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 6 – Granulometria da areia

GRANULOMETRIA AREIA			AMOSTRA (g)	1007,49			
PENEIRA	ABERTURA	RETIDO (g)	RETIDO ACUM. (g)	%RETIDO	%RETIDO ACUM.	%PASSANTE	
3/8"	9,5mm	0	0	0	0,00%	100%	
#4	4,75mm	4,30	4,30	0,43%	0,43%	99,57%	
#10	2,00mm	10,39	14,69	1,03%	1,46%	98,54%	
#16	1,18mm	20,72	35,41	2,06%	3,51%	96,49%	
#30	0,6mm	214,02	249,43	21,24%	24,76%	75,24%	
#35	0,5mm	168,57	418,00	16,73%	41,49%	58,51%	
#50	0,3mm	239,95	657,95	23,82%	65,31%	34,69%	
#80	0,18mm	138,56	796,51	13,75%	79,06%	20,94%	
#200	0,075mm	179,21	975,72	17,79%	96,85%	3,15%	
Fundo		31,77	1007,49	3,15%	100,00%	0,00%	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 7 – Granulometria do pó de brita

GRANULOMETRIA PÓ DE BRITA			AMOSTRA (g)	1016,05			
PENEIRA	ABERTURA	RETIDO (g)	RETIDO ACUM. (g)	%RETIDO	%RETIDO ACUM.	%PASSANTE	
3/8"	9,5mm	0	0	0	0,00%	100%	
#4	4,75mm	28,33	28,33	2,79%	2,79%	97,21%	
#10	2,00mm	436,55	464,88	42,97%	45,75%	54,25%	
#16	1,18mm	176,28	641,16	17,35%	63,10%	36,90%	
#30	0,6mm	115,32	756,48	11,35%	74,45%	25,55%	
#35	0,5mm	36,57	793,05	3,60%	78,05%	21,95%	
#50	0,3mm	35,96	829,01	3,54%	81,59%	18,41%	
#80	0,18mm	51,84	880,85	5,10%	86,69%	13,31%	
#200	0,075mm	98,60	979,45	9,70%	96,40%	3,60%	
Fundo		36,60	1016,05	3,60%	100,00%	0,00%	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 8 – Granulometria do filer

	RET.(g)	RET ACUM (g)	%RET	%PAS
40	0	0	0	100
80	0,96	0,96	0,42	99,58
200	25,43	26,39	11,50	88,50
FUNDO	203,11	229,5039	100,00	0
Amostra (g)		229,5		

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE B – DENSIDADE REAL, DENSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO

Quadro 9 - Densidade aparente da brita 1

DENSIDADE BRITA 1				
Mh(g)	Ms(g)	Vol. Deslocado (ml)	D(g/ml)	Dap Final
3014,85	2987,5	1086,9	2,748642929	2,7167345
2715,7	2685,9	1000,4	2,68482607	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 10 – Densidade aparente da brita 0

DENSIDADE BRITA 0				
Mh(g)	Ms(g)	Vol. Deslocado (ml)	D(g/ml)	Dap Final
2059,36	2042,25	744,6	2,742747784	2,748824939
2034,5	2021,74	733,87	2,754902094	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 11 – Densidade aparente do pó de brita

DENSIDADE PÓ DE BRITA				
P(g)	Vi (ml)	Vf(ml)	D(g/ml)	Dfinal(g/ml)
500	200	382,7	2,736726875	2,749578907
500	200	381	2,762430939	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 12 – Densidade aparente da areia

DENSIDADE ap. AREIA				
P(g)	Vi (ml)	Vf(ml)	D(g/ml)	Dfinal(g/ml)
500	200	391	2,617801047	2,597560317
500	200	394	2,577319588	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 13 – Densidade real do filer

DENSIDADE filer				
LEITURA 1 (ML)	LEITURA 2 (ML)	PESO AMOSTRA (G)	D(g/ml)	Dfinal(g/ml)
0,5	20,2	60	3,045685279	2,993430875
0,3	20,7	60	2,941176471	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 14 – Absorção dos agregados

ABSORÇÃO				
Amostra	B1		B0	
	1	2	1	2
Mh (g)	3014,85	2715,7	2059,36	2034,5
Ms (g)	2987,5	2685,9	2042,25	2021,74
A (%)	0,915481172	1,109497747	0,84	0,63
Am (%)	1,01248946		0,734470479	

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 15 – Massa específica solta e compactada

MASSA ESP. SOLTA			MASSA ESP. COMPAC			
	B1	B0		B1	B0	PO
M. RECIP. (KG)	6,232	6,232	M. RECIP (KG)	6,232	6,232	6,232
M.SOLTA (KG)	23,733	23,220	M. COMPAC. (KG)	24,665	24,330	26,908
M.E. SOLTA (KG/m <sup>3</sup> )	1657,292	1608,712	M.E. COMPAC. (KG/m <sup>3</sup> )	1745,549	1713,826	1957,955

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 16 – Densidade real dos agregados miúdos

Densidade real						
Material	Peso A (g)	Peso B (g)	Peso C (g)	Peso D (g)	Dreal (g/cm <sup>3</sup> )	Dm (g/cm <sup>3</sup> )
Pó de brita	140,12	637,4	928,35	611,85	2,750746764	2,766827897
	115,87	615,43	941,56	621,51	2,78290903	
Areia	170,99	671,35	1455,01	1149,26	2,5710909	2,571215791
	168,22	669,76	1453,89	1147,4	2,571340682	

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE C – ÍNDICE DE FORMA

Quadro 17 – Dimensão dos grãos para o índice de forma

Grão	C(mm)	E(mm)	C/E	Grão	C(mm)	E(mm)	C/E	Grão	C(mm)	E(mm)	C/E	Grão	C(mm)	E(mm)	C/E
1	36,62	23,5	1,558	51	27,81	13,47	2,06	101	18,51	12,84	1,44	151	25,19	13,38	1,88
2	26,1	19,34	1,350	52	25,73	11,16	2,31	102	19,66	12,28	1,60	152	23,37	11,01	2,12
3	29,34	17,85	1,644	53	23,76	9,48	2,51	103	26,65	13,17	2,02	153	19,00	11,59	1,64
4	30,03	9,54	3,148	54	22,86	9,43	2,42	104	20,52	13,79	1,49	154	14,76	14,64	1,01
5	32,56	19,57	1,664	55	23,88	11,82	2,02	105	19,44	9,08	2,14	155	21,12	13,24	1,60
6	23	7,27	3,164	56	35,85	13,4	2,68	106	17,20	11,74	1,47	156	23,06	11,83	1,95
7	24,91	8,53	2,920	57	19,84	9,31	2,13	107	21,07	14,23	1,48	157	15,76	7,47	2,11
8	21,75	13,5	1,611	58	26,06	10,2	2,55	108	23,76	9,96	2,39	158	16,91	9,26	1,83
9	23,84	4,58	5,205	59	18,99	8,93	2,13	109	20,36	9,08	2,24	159	24,48	10,86	2,25
10	19,84	10,71	1,852	60	21,62	16,28	1,33	110	22,29	15,46	1,44	160	18,69	13,36	1,40
11	33,12	6,43	5,151	61	29,47	7,73	3,81	111	19,46	13,14	1,48	161	18,04	11,92	1,51
12	28,38	7,93	3,579	62	19,57	8,49	2,31	112	18,44	11,56	1,60	162	19,67	14,94	1,32
13	22,84	8,28	2,758	63	24,44	13,06	1,87	113	25,33	15,58	1,63	163	17,00	7,99	2,13
14	25,02	11,38	2,199	64	25,56	14,95	1,71	114	17,51	13,64	1,28	164	44,45	17,80	2,50
15	28,26	16,17	1,748	65	24,44	14,23	1,72	115	20,88	17,02	1,23	165	35,02	16,28	2,15
16	24	15,48	1,550	66	26,62	11,97	2,22	116	24,61	17,37	1,42	166	31,13	20,00	1,56
17	28,18	6,69	4,212	67	33,17	14,85	2,23	117	20,28	11,59	1,75	167	29,43	19,51	1,51
18	18,8	9,73	1,932	68	24,37	12,65	1,93	118	15,94	8,79	1,81	168	25,48	16,34	1,56
19	28,74	7,48	3,842	69	23,3	14,68	1,59	119	17,72	13,77	1,29	169	30,27	18,86	1,60
20	16,64	7,08	2,350	70	23,55	9,96	2,36	120	19,32	13,25	1,46	170	23,52	16,40	1,43
21	30,12	11,49	2,621	71	27,76	14,85	1,87	121	21,77	16,77	1,30	171	27,40	20,44	1,34
22	29,86	8,56	3,488	72	21,58	12,33	1,75	122	24,26	9,90	2,45	172	21,37	15,56	1,37
23	20,55	8,27	2,485	73	22,79	9,43	2,42	123	21,49	10,29	2,09	173	30,28	16,26	1,86
24	21,92	5,89	3,722	74	20,29	12,81	1,58	124	18,34	14,23	1,29	174	28,53	15,39	1,85
25	28,63	13,6	2,105	75	29,16	13,84	2,11	125	25,92	13,08	1,98	175	24,83	18,22	1,36
26	35,04	6,7	5,230	76	25,6	11,83	2,16	126	26,99	16,20	1,67	176	24,46	15,48	1,58
27	22,6	8,99	2,514	77	20,02	14,69	1,36	127	24,58	15,05	1,63	177	26,21	13,64	1,92
28	26,12	15,8	1,653	78	25,42	12,66	2,01	128	23,51	11,26	2,09	178	24,86	8,05	3,09
29	29,02	16,44	1,765	79	21,68	15,32	1,42	129	23,47	12,01	1,95	179	24,18	16,46	1,47
30	26,44	19,3	1,370	80	21,28	13,99	1,52	130	19,45	12,52	1,55	180	16,91	15,40	1,10
31	18,31	10,82	1,692	81	23,71	17,3	1,37	131	24,50	14,81	1,65	181	24,48	13,72	1,78
32	17,24	8,15	2,115	82	20,11	12,7	1,58	132	19,30	12,15	1,59	182	18,69	17,16	1,09
33	20,04	7,46	2,686	83	27,14	10,47	2,59	133	17,23	11,87	1,45	183	18,04	13,15	1,37
34	29,34	15,22	1,928	84	23,67	14,32	1,65	134	20,55	15,51	1,32	184	19,67	17,87	1,10
35	24,41	13,45	1,815	85	22,22	9,02	2,46	135	16,47	13,56	1,21	185	17,00	17,05	1,00
36	24,42	11,45	2,133	86	27,47	11,18	2,46	136	18,92	11,90	1,59	186	44,45	13,78	3,22
37	25,4	6,05	4,198	87	19,17	6,62	2,90	137	21,77	13,88	1,57	187	35,02	15,77	2,22
38	34,01	12,5	2,721	88	27,51	15,3	1,80	138	20,50	12,33	1,66	188	31,13	16,22	1,92
39	27,09	4,35	6,228	89	27,38	9,98	2,74	139	18,49	9,40	1,97	189	29,43	13,67	2,15
40	26,39	8,71	3,030	90	19,61	8,23	2,38	140	12,70	6,85	1,85	190	25,68	15,72	1,63
41	29,97	9,04	3,315	91	22,02	13,65	1,61	141	22,49	15,37	1,46	191	22,51	12,96	1,74
42	23,28	8,89	2,619	92	23,22	11,23	2,07	142	21,45	11,66	1,84	192	31,51	10,86	2,90
43	30,43	8,48	3,588	93	20,41	7,84	2,60	143	24,30	12,24	1,99	193	26,73	15,07	1,77
44	28,12	8,08	3,480	94	26,04	12,6	2,07	144	19,00	14,95	1,27	194	26,28	15,56	1,69
45	20,23	8,72	2,320	95	27,07	11,35	2,39	145	19,04	17,28	1,10	195	35,88	19,17	1,87
46	23,01	7,6	3,028	96	20,71	7,64	2,71	146	15,99	8,94	1,79	196	27,48	15,75	1,74
47	19,82	9,42	2,104	97	22,18	15,91	1,39	147	19,57	11,28	1,73	197	28,51	17,96	1,59
48	28,91	7,59	3,809	98	20,55	12,28	1,67	148	24,75	13,14	1,88	198	27,82	11,13	2,50
49	24,35	6,6	3,689	99	22,9	6,77	3,38	149	21,62	14,80	1,46	199	25,24	11,31	2,23
50	22,33	13,73	1,626	100	18,05	12,14	1,49	150	19,96	9,95	2,01	200	19,89	16,20	1,23

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 18 – Granulometria para índice de forma

Amostra (g)	5015,6				
Peneira	Abertura	Peso retido (g)	Peso retido acumulado (g)	%retida	%passante
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	478,6	478,6	9,542228248	90,46
1/2"	12,5	4034,58	4513,18	89,9828535	10,02
3/8"	9,5	479,32	4992,5	99,53943696	0,46

Fonte: Autoria própria (2017).

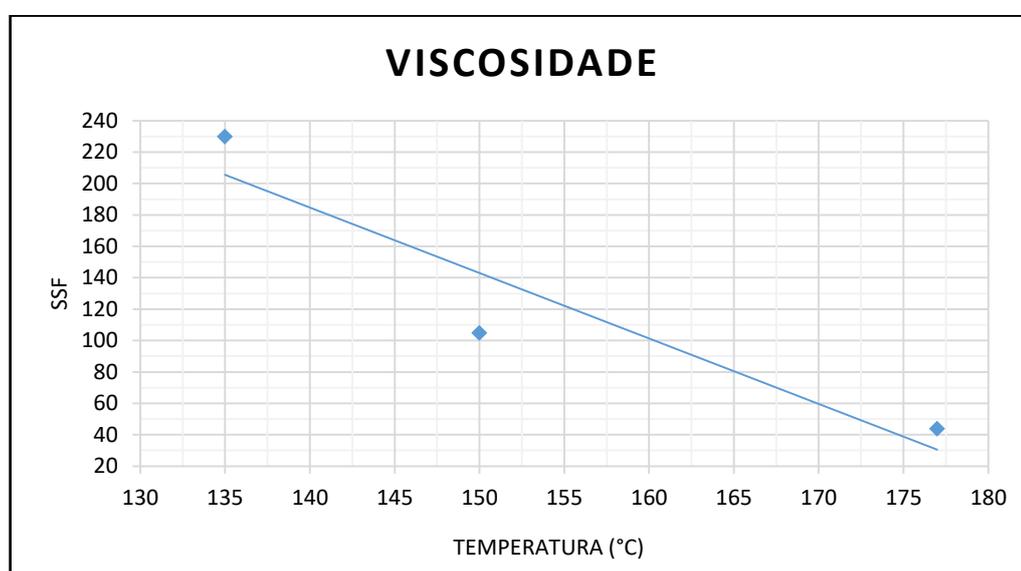
## APÊNDICE D – ENSAIOS PARA O LIGANTE ASFÁLTICO

Quadro 19 – Penetração do CAP

Amostra	Linicial (0,1 mm)	Lfinal (0,1 mm)	P (0,1 mm)	Pm final (0,1 mm)
1	262,5	315,6	53,1	54,0
2	293	347	54	
3	223	278	55	

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 57 - Viscosidade Saybolt-Furol do ligante



Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 20 – Ponto de amolecimento

Amostra	1	2	3
T (°C)	52	53,5	52
T médio (°C)	52,5		

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE E – CORPOS DE PROVA DA MISTURA TRADICIONAL

Quadro 21 – Dimensões dos corpos de prova

Dimensões CPs							
CP	%CAP	H(mm)	D(mm)	CP	%CAP	H(mm)	D(mm)
CP1	4,50%	57,98	99,9	CP9	5,5%	57,04	98,86
		58,01	100,1			57,6	100,25
		57,05	101,02			57,05	99,47
		60,21				57,26	-
CP2	4,50%	59,4	101	CP10	6,0%	56,42	100,17
		58,97	101,23			56,73	99,95
		58,54	101,17			57,19	100,18
		59,93				56,75	-
CP3	4,50%	61,17	98,54	CP11	6,0%	58,39	99,38
		61,96	100,56			58,28	100,53
		60,78	100,45			57,91	100,32
		61,92				57,72	-
CP4	5,00%	59,23	98,99	CP12	6,0%	58,73	100,11
		57,28	99,93			59,38	99,51
		59,46	99,38			58,92	99,12
		58,95				59,3	-
CP5	5,0%	60,45	101,17	CP13	6,5%	56,53	101,18
		59,62	99,85			56,78	100,89
		58,52	101,12			56,15	101,78
		59,85				56,35	-
CP6	5,0%	59,12	101,06	CP14	6,5%	57,68	100,61
		58,8	101,24			57,22	100,77
		58,63	100,68			57,42	99,85
		58,49				57,3	-
CP7	5,5%	58,52	100,14	CP15	6,5%	58,04	101,02
		58,29	100,85			58,7	100,69
		58,94	99,45			59,31	98,88
		57,96				58,55	-
CP8	5,5%	57,9	100,3				
		57,53	99,39				
		57,88	98,8				
		57,77					

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 22 – Características médias dos corpos de prova

Características médias dos CPs														
CP	H(mm)	Hmed(mm)	D(mm)	Ms (g)	ms med (g)	Msub(g)	Msub med(g)	Est	E med	Emed Corr.	F(mm)		Dap	Dap med
CP 1	58,31	59,66	100,34	1165,5	1179,833	467,7	469,40	300	318,33	712,14159	11,22	10,7166667	2,492	2,513
CP 2	59,21		101,13	1167,7		462,9		305			11,1		2,523	
CP 3	61,46		99,85	1206,3		477,6		350			9,83		2,526	
CP 4	58,73	59,03	99,43	1153,2	1155,667	462,3	462,20	210	186,67	425,11504	10,38	10,7933333	2,494	2,500
CP 5	59,61		100,71	1155,1		461,2		170			11,02		2,505	
CP 6	58,76		100,99	1158,7		463,1		180			10,98		2,502	
CP 7	58,43	57,81	100,15	1149,7	1140,633	458,9	456,43	150	148,33	349,77267	10,59	10,7566667	2,505	2,499
CP 8	57,77		99,50	1135,8		457,1		145			10,32		2,485	
CP 9	57,24		100,10	1136,4		453,3		150			11,36		2,507	
CP 10	56,77	57,98	100,10	1107,4	1133,767	444,1	453,67	95	110	257,16504	11,91	10,8666667	2,494	2,495
CP 11	58,08		100,08	1141,8		456,4		125			10,27		2,502	
CP 12	59,08		99,58	1152,1		460,5		110			10,42		2,502	
CP 13	56,45	57,50	101,28	1133,8	1139,05	457,7	459,57	130	110	261,59892	10,82	10,3166667	2,477	2,479
CP 14	57,41		100,41	1129,04		455,6		95			10,17		2,478	
CP 15	58,65		100,20	1154,31		465,4		105			9,96		2,480	

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE F – CORPOS DE PROVA DA MISTURA BAILEY

Quadro 23 – Dimensões e Dap do CP 4,5%

<b>CAP 4,5%</b>				
	CP1	CP2	CP3	Média
h1 (mm)	69,34	67,76	68,62	
h2 (mm)	69,99	68,74	66,76	
h3 (mm)	69,79	68,78	68,77	
h4 (mm)	69,75	69,09	70,55	
<b>H (mm):</b>	69,72	68,59	68,68	69,00
d1	101,35	101,33	99,78	
d2	101,33	99,01	101,55	
d3	101,58	100,92	101,71	
<b>D (mm):</b>	101,42	100,42	101,0133	100,9511
Par (g)	1173,1	1167,8	1179,3	1173,4
Pim (cm <sup>3</sup> )	480,1	479,7	483,3	481,0333
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,443449	2,434438	2,440099	2,439329

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 24 – Dimensões e Dap do CP 5%

<b>cap 5%</b>				
	CP1	CP2	CP5	Média
h1 (mm)	63,68	63,74	69,36	
h2 (mm)	63,41	63,57	66,21	
h3 (mm)	64,8	62,75	69,56	
h4 (mm)	64,19	63,4	68,66	
<b>H (mm):</b>	64,02	63,37	68,45	65,28
d1	99,84	100,82	101,29	
d2	100,98	100,8	100,61	
d3	101,93	101,77	101,19	
<b>D (mm):</b>	100,9167	101,13	101,03	101,0256
Par (g)	1224,8	1114,53	1243,9	1194,41
Pim (cm <sup>3</sup> )	493,7	475,9	513,8	494,4667
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,480859	2,341942	2,420981	2,414594

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 25 – Dimensões e Dap do CP 5,5%

<b>CAP 5,5%</b>				
	CP1	CP2	CP3	Média
h1 (mm)	62,21	64,52	65,17	
h2 (mm)	62,79	63,94	66,04	
h3 (mm)	63,29	64,05	62,5	
h4 (mm)	62,81	64,37	64,73	
<b>H (mm):</b>	62,78	64,22	64,61	63,87
d1	101,56	101,75	101,84	
d2	98,69	101,18	101,5	
d3	100,84	101,22	99,71	
<b>D (mm):</b>	100,3633	101,3833	101,0167	100,9211
Par (g)	1168,17	1173,97	1154,12	1165,42
Pim (cm <sup>3</sup> )	479,2	480,5	477,9	479,2
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,43775	2,443226	2,414982	2,431986

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 26 – Dimensões e Dap do CP 6%

<b>CAP 6%</b>				
	CP1	CP2	CP3	Média
h1 (mm)	64,56	65,03	64,37	
h2 (mm)	66,01	64,98	65,92	
h3 (mm)	63,89	63,75	63,19	
h4 (mm)	65,48	65,22	65,58	
<b>H (mm):</b>	64,99	64,75	64,77	64,83
d1	101,44	100,9	101,33	
d2	101,41	101,25	101,36	
d3	101,12	100,87	100,95	
<b>D (mm):</b>	101,3233	101,0067	101,2133	101,1811
Par (g)	1156,8	1153,95	1156,42	1155,723
Pim (cm <sup>3</sup> )	482,6	480,2	482,3	481,7
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,397016	2,403061	2,397719	2,399266

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 27 – Dimensões e Dap do CP 4%

<b>CAP 4%</b>				
	CP1	CP2	CP3	Média
h1 (mm)	66,68	68,27	67,81	
h2 (mm)	68,85	65,57	68,06	
h3 (mm)	68,48	68,04	64,53	
h4 (mm)	67,9	67,7	67,51	
<b>H (mm):</b>	67,98	67,40	66,98	67,45
d1	100,62	100,94	101,63	
d2	99,43	101,04	100,37	
d3	101,15	101,12	98,54	
<b>D (mm):</b>	100,4	101,0333	100,18	100,5378
Par (g)	1204,15	1197,3	1202,54	1201,33
Pim (cm <sup>3</sup> )	488,6	485	486,7	486,7667
<b>Dap (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,46449	2,46866	2,470803	2,467985

Fonte: Autoria própria (2017).

## APÊNDICE G – PARÂMETROS E CÁLCULOS DA MISTURA BAILEY

Quadro 28 – Porcentagens passantes nas peneiras de controle

Materiais	%pass PM	%pass PCP	%pass PCS	%passPCT
M.B.	60,9	32,81	12,62	7,705

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 29 – Proporções de agregados

	PAG	GAM	MAM
Proporções	0,72	0,38	0,61
Faixas recomendadas	0,6 - 0,75	0,35 - 0,5	0,35 - 0,5

Fonte: Autoria própria (2017).

Quadro 30 – Cálculos para definição do traço Bailey

B1				B0		PÓ		VOL. AGR. GRAUDO		
M.E. SOLTA (kg/m <sup>3</sup> )	1657,292	1608,712	-					B1	B0	
M.E. COMP (kg/m <sup>3</sup> )	1745,549	1713,826	1957,95455					45%	55%	
								45	55	
M.E. ESCOLHIDA (KG/M <sup>3</sup> )	102%									
B1	B0	PÓ						DENS.	B1	B0
1690,4375	1640,886	1997,114						(G/CM <sup>3</sup> )	2,7167	2,748
CONTRIBUICAO DOS AGREGADOS (%)				B1	B0	PÓ				
				760,6969	902,4875	766,735				
VAZIOS NO AGR. GRAÚDO (%)				B1	B0	TOTAL				
				16,9992316	22,15839	39,15762				
MASSA ESP. TOTAL DA MISTURA (KG/M <sup>3</sup> )				2429,91938						
% INICIAL MITURA				B1	B0	PÓ				
				31,30544	37,1406356	31,55393				
% AGR MIÚDO	%AG GRAUDO									
B1	B0	PO								
0,064	17,16	2,79								
%A. MIÚDO NO GRAÚDO	% A.GRAÚDO NO MIÚDO									
B1	B0	PÓ								
0,02003548	6,373333	0,88035458								
TOTAL	6,393369									

CORREÇÃO PORCENTAGENS				TOTAL	
B1	B0	PÓ			
30,923	43,036	26,041			100
				TMN (mm)	19
% CONTRIBUINTE DA #200 P/ CADA UM				PCP	4,75      4,18
PASSANTE	B1	B0	PÓ	PCS	1,18      1,045
0,075	0%	0,17%	3,60%	PCT	0,3      0,2596
CONTRIB.	0	0,073162	0,93747289	PM	9,5
QUANT. DE FILER				% FILER DESEJADA	
3,40%				4	
% FINAL DE AGREGADO MIUDO NA MISTURA					
%AJUST.	%F	RESULTADO			
26,041	3,40	22,64390742			
TRAÇO FINAL					
B1	B0	PÓ	FILER		
30,92	43,04	22,64	3,40		
TOTAL	100,000				

Fonte: Autoria própria (2017).