UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – UNIJUI

RICARDO ZARDIN FENGLER

MÉTODO BAILEY: AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Ijuí

2015

RICARDO ZARDIN FENGLER

MÉTODO BAILEY: AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: José Antônio Santana Echeverria

Ijuí

2015

RICARDO ZARDIN FENGLER

MÉTODO BAILEY: AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 09 de novembro de 2015

Prof. José Antônio Santana Echeverria

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Orientador

Prof. Lia Geovana Sala

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Antônio Santana Echeverria (UNIJUÍ)

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. André Luiz Bock (UNIJUÍ)

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mãe e irmã, muito obrigado por todo apoio concedido, essa conquista é nossa, amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por estarem sempre ao meu lado me apoiando, mas em especial, a minha mãe Marilene e a minha irmã Vanessa, que durante esses longos meses até o momento me apoiaram incondicionalmente, não medindo esforços quando necessitava algo e, acima de tudo, sempre me motivando. Sem vocês o caminho teria sido muito mais árduo, a vocês, todo meu amor.

Ao meu orientador e professor, José Antônio Santana Echeverria, pela orientação prestada ao longo deste trabalho de conclusão de curso, pelas sábias palavras disferidas para meu melhor entendimento dos mais diversos assuntos envolvidos e, acima de tudo, pela amizade e por sempre exigir o meu máximo empenho, colaborando com a grande absorção de conhecimento obtida, essenciais para a conclusão com êxito de todas as tarefas propostas.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ: Túlio e Roberto, por sempre estarem presentes e dispostos colaborando na execução de procedimentos, além da amizade, contribuindo para uma harmoniosa convivência durante todas as manhãs. Em especial, agradeço ao laboratorista Luiz Donato, pela ajuda na interpretação de resultados e na execução de ensaios, além dos "puxões de orelha" dados para manter sempre tudo em ordem, facilitando a vida de todos que trabalhavam no ambiente.

A empresa Construbrás – Construtora de Obras Rodoviárias Ltda., pela doação dos materiais pétreos e do ligante asfáltico utilizados neste estudo, muito obrigado.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, pela disponibilidade de equipamentos para a realização de ensaios pertinentes a este estudo, em especial ao Maurício e ao Lucas, pelo auxílio na execução dos procedimentos, meu muito obrigado.

Ao mestrando Pedro Júnior da Universidade Federal de Santa Maria, pelo grande auxilio na compreensão e elaboração das misturas asfálticas pelo Método Bailey, além da amizade, mostrando-se sempre disposto a me ajudar quando necessitava, meu muito obrigado, sem tua ajuda esse trabalho não atingiria seus objetivos.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil pelo conhecimento adquirido durante os cinco anos de convivência, com a certeza de que terei todos como exemplos de profissionais, tão dedicados a sanar as duvidas apresentadas.

Às secretárias Cassiana e Rosane, por todos os momentos de descontração nas conversas durante os dias e pelo excelente serviço prestado quando solicitadas, ajudando com questões burocráticas.

Ao MEC/Sesu, pela disponibilidade da bolsa PET durante quatro anos, desenvolvendo pesquisas importantes para o meio acadêmico.

A todo o grupo PET desde minha inserção no programa no início de 2012 até o dia de hoje, por serem companheiros inseparáveis durante as manhãs no decorrer do período e pela grande amizade adquirida. Em especial, gostaria de agradecer aos ex-petianos e colegas de trabalho, Carlos Filipe, Eduardo Pasche e Emmanuelle Garcia, por toda a experiência adquirida nos anos de convivência e por me "adotarem", fazendo com que eu seguisse seus passos academicamente, tomando-os como inspiração. Além disso, gostaria de agradecer especialmente ao João e a Janaína, que desde o início colaboraram com a realização dos ensaios deste estudo, com a certeza de que sem a ajuda de vocês, jamais este trabalho teria sido concluído e, ao Giovanni e ao Diego, que acabaram por fazer parte do grupo na reta final, não fugindo do temido cheiro de gasolina quando dá limpeza dos materiais. Muito obrigado por tudo, mesmo.

Por fim, dedico este último parágrafo a agradecer todos meus amigos, os que conheço há muitos anos e os mais recentes, que conheci durante a graduação. Tenho a certeza que direta ou indiretamente, todos me apoiaram durante esse longo período de cinco anos. Em especial, agradeço aos mais próximos, que durante o ano de 2015 estiveram sempre comigo me apoiando, Cristiano, Fausto, Felipe, Fernanda, Gabriela, José, Mariana, Ricardo, Tatiane, espero que possamos compartilhar muitas alegrias ainda nessa vida, a amizade de todos vocês é essencial para que eu continue buscando meus objetivos, de coração, meu muito obrigado.

RESUMO

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.

Devido ao grande aumento de solicitações às quais pavimentos são submetidos, buscam-se continuamente métodos capazes de elaborarem misturas asfálticas mais resistentes às patologias. Baseado nisso, apresenta-se como proposta a elaboração de misturas asfálticas a quente através de dois métodos distintos de seleção granulométrica, que são o método de tentativas e o Método Bailey. A caracterização granulométrica dos materiais utilizados (brita 1" britador cônico, brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra provenientes do britador VSI, cal dolomítica classe II) seguiu o que preconizam as normas brasileiras para pavimentos flexíveis, sendo as misturas elaboradas estabilizadas para as faixas B e C do DNIT. Para cada faixa foi realizada uma mistura pelo método de tentativas e duas pelo Método Bailey, sendo utilizados valores de massa específica escolhida de 95% e 105%, assim, para facilmente serem identificadas, receberam distintas nomeações (REFB, REFC, MBB95, MBB105, MBC95 e MBC105). A moldagem das misturas procedeu-se pela metodologia Marshall, sendo encontrado os parâmetros considerados e, adotando-se como teor de ligante de projeto o valor referente a um volume de vazios fixado em 4%. Com o objetivo de comparar as misturas elaboradas para os dois métodos, foram realizados procedimentos laboratoriais a fim de caracteriza-las, sendo adotados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e perda de massa – desgaste cantabro. Além disso, algumas relações foram adotadas, como a relação módulo de resiliência x resistência à tração por compressão diametral e, a relação estabilidade x fluência. Referente ao Método Bailey, foram analisadas as proporções consideradas (proporção AG, proporção GAM e proporção MAM) para todas as misturas realizadas, incluindo as elaboradas pelo método de tentativas. Todos os procedimentos foram realizados com o que preconizam as normas brasileiras, possuindo veracidade nos resultados apresentados.

Palavras-chave: Métodos distintos. Seleção granulométrica. Revestimento asfáltico. Dosagem Marshall.

ABSTRACT

FENGLER, RICARDO ZARDIN. **Bailey Method: laboratory evaluation of hot asphalt mixtures**. 2015. Final Paper. Civil Engineering Course, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

Due to the large increase in the requests which pavements are subjected to, it has become necessary to continuously seek for methods to develop asphalt mixtures more resistant to diseases. Based on this, is presented as a proposal the elaboration of hot asphalt mixtures through two distinct methods of particle size selection, which are the Method of Trial and Bailey Method. The particle size characteristics of the materials used (crushed stone 1" cone crusher, crushed stone 3/4", crushed stone 3/8" and stone dust from the VSI crusher, dolomitic lime class II) following the prescribing Brazilian standards for flexible pavements, the elaborate mixtures were stabilized for bands B and C of DNIT. For each track was held a mixture by the method of trial and two by Bailey method being used density values chosen 95% and 105%, thus, to be easily identified, received separate nominations (REFB, REFC, MBB95, MBB105, MBC95 and MBC105). The molding of the mixtures were conducted by the Marshall methodology, being found the parameters considered and, adopting as project binder content the amount referring to a void volume set at 4%. In order to compare the mixtures prepared by both methods, laboratory procedures were performed in order to characterized them, being adopted the tensile strength tests by diametrical compression, resilient modulus and weight loss - cantabro wear. Also, some links have been adopted as regards the resilient modulus vs. tensile strength by diametrical compression, and the ratio fluency vs. stability. Referring to Bailey Method, the considered prepositions were analyzed (AG proportion, proportion and GAM proportion MEM) for all blends made, including those prepared by the trial method. All procedures were performed with the prescription of the Brazilian standards, possessing veracity in the results.

Keywords: Different methods. Particle size selection. Asphalt coating. Marshall dosage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição dos esforços nas camadas do pavimento 23
Figura 2: Dissipação de cargas nos pavimentos 24
Figura 3: Camadas constituintes do pavimento 25
Figura 4: Classificação dos agregados para pavimentação 27
Figura 5: Curvas granulométricas das diferentes graduações 29
Figura 6: Curvas granulométricas típicas de misturas asfálticas 30
Figura 7: Divisão realizada pela Peneira de Controle Primário (PCP)..... 45
Figura 8: Seleção da massa específica escolhida para agregados graúdos..... 48
Figura 9: Esquema de divisão de frações para análise de uma graduação contínua 51
Figura 10: Aspectos dos agregados pétreos..... 58
Figura 11: Aparência da cal..... 59
Figura 12: Obtenção da densidade real do pó de pedra com auxílio de um picnômetro... 62
Figura 13: Soquete Marshall sobre base de compactação e prensa Marshall..... 63
Figura 14: Rompimento de corpo de prova na prensa Marshall..... 64
Figura 15: Corpo de prova posicionado na prensa de compressão diametral de carga repetida 65
Figura 16: Tambor da máquina Los Angeles 66
Figura 17: Compactação realizada para obtenção da massa unitária compactada 67
Figura 18: Distribuição granulométrica dos materiais 70
Figura 19: Recipiente utilizado para obtenção das massas unitárias..... 72
Figura 20: Enquadramento da mistura na faixa B 74
Figura 21: Enquadramento da mistura na faixa C 75
Figura 22: Posição da mistura MBB95 em relação aos limites da faixa B 77
Figura 23: Posição da mistura MBB105 em relação aos limites da faixa B 78
Figura 24: Posição da mistura MBC95 em relação aos limites da faixa C 80
Figura 25: Posição da mistura MBC105 em relação aos limites da faixa C 81
Figura 26: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Referência Faixa B (REFB). 84
Figura 27: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Referência Faixa C (REFC). 85

Figura 28: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa B com MEE 95% (MBB95)..... 86
Figura 29: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa B com MEE 105% (MBB105) 87
Figura 30: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa C com MEE 95% (MBC95)..... 88
Figura 31: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa C com MEE 105% (MBC105) 89
Figura 32: Resistência à tração por compressão diametral média das misturas..... 91
Figura 33: Módulo de resiliência médio das misturas..... 93
Figura 34: Perda de massa das misturas 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas recomendadas para as três proporções 52
Tabela 2: Peneiras de controle para diferentes diâmetros máximos nominais (DMN) 52
Tabela 3: Número de corpos de prova 57
Tabela 4: Proporções dos materiais em cada mistura 60
Tabela 5: Faixas e peneiras adotadas para análise 61
Tabela 6: Densidades e absorção dos materiais 71
Tabela 7: Densidades e absorção das misturas 71
Tabela 8: Massas unitárias e volume de vazios dos materiais 72
Tabela 9: Porcentagens dos materiais na mistura referência B 73
Tabela 10: Porcentagens dos materiais na mistura referência C 75
Tabela 11: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 95% (MBB95) . 76
Tabela 12: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 105% (MBB105) 78
Tabela 13: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 95% (MBC95) . 79
Tabela 14: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 105% (MBC105) 81
Tabela 15: Teor de ligante de projeto das misturas 82
Tabela 16: Resumo dos parâmetros Marshall para cada mistura 90
Tabela 17: Valores de RT para cada CP das misturas e desvio padrão encontrado 90
Tabela 18: Valores encontrados de MR para cada corpo de prova 92
Tabela 19: Valores médios obtidos para cada mistura 93
Tabela 20: Relação MR/RT 95
Tabela 21: Relação estabilidade x fluência das misturas 98
Tabela 22: Peneiras de controle das misturas 99
Tabela 23: Proporções das misturas 99

LISTA DE SIGLAS

A	Absorção
AG	Agregados Graúdos
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm	Centímetro
CMHB	*Coarse Matrix High Binder*
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
CV	Coeficiente de Variação
D	Diâmetro
Da	Densidade Aparente
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
Def	Densidade Efetiva
DMN	Diâmetro Máximo Nominal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT	Departamento de Transporte da Califórnia
Dr	Densidade Real

ES	Especificação de Serviço
ESAL	*Equivalent Axle Loads*
EUA	Estados Unidos da América
GAM	Graúdo do Agregado Miúdo
G/cm³	Grama por Centímetro Cúbico
H	Altura
IDOT	*Illinois Department of Transportation*
Kg	Quilograma
Kg/cm	Quilograma por Centímetro
Kgf	Quilogramaforça
Kg/m³	Quilograma por Metro Cúbico
Km	Quilômetro
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MAM	Miúdo do Agregado Miúdo
MBB95	Mistura Bailey Faixa B 95% de Massa Específica Escolhida
MBB105	Mistura Bailey Faixa B 105% de Massa Específica Escolhida
MBC95	Mistura Bailey Faixa C 95% de Massa Específica Escolhida
MBC105	Mistura Bailey Faixa C 105% de Massa Específica Escolhida
ME	Método de Ensaio
MEC	Ministério da Educação
MEE	Massa Específica Escolhida

Mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
nº	Número
NBR	Norma Brasileira
NM	Normalização do Mercosul
PCP	Peneira de Controle Primário
PCS	Peneira de Controle Secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PET	Programa de Educação Tutorial
PM	Peneira Média
PRO	Procedimento
RBV	Relação Betume Vazios
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
REFB	Referência Faixa B
REFC	Referência Faixa C
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SGC	Compactador Giratório SUPERPAVE
SHRP	*Strategic Highway Research Program*
SMA	*Stone Matrix Asphalt*

SUPERPAVE *Superior Performing Asphalt Pavements*

UNIJUÍ Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

UFSM Universidade Federal de Santa Maria

VAG Vazios no Agregado Graúdo

VAM Vazios no Agregado Mineral

VSI Britador de Impacto de Eixo Vertical

Vv Volume de Vazios

ºC Graus Celsius

ºF Graus Fahrenheit

σ Desvio Padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

1.1 **Contexto** 20

1.2 **Problema** 21

1.2.1 Questões de pesquisa 22

1.2.2 Objetivos de pesquisa 22

2 REVISÃO DA LITERATURA 23

2.1 **Características dos pavimentos** 23

2.1.1 Camadas do pavimento asfáltico 25

2.1.1.1 Revestimentos asfálticos *25*

2.1.1.2 Bases e sub-bases *26*

2.1.1.3 Reforços de subleitos *26*

2.1.1.4 Subleito *26*

2.1.2 Materiais granulares para pavimentação 26

2.1.2.1 Classificação dos agregados *27*

2.1.3 Distribuição granulométrica de misturas asfálticas 29

2.1.3.1 Distribuição densa *30*

2.1.3.2 Distribuição descontínua *31*

2.1.3.3 Distribuição Bailey *31*

2.1.4 Ligantes asfálticos 32

2.1.4.1 Características de ligantes *32*

2.1.4.2 Ensaios realizados para caracterização de ligantes *33*

2.1.4.3 Cimento asfáltico de petróleo (CAP) *33*

2.2 **Revestimentos asfálticos** 34

2.2.1 Concreto asfáltico (CA) 35
2.2.2 SMA – *Stone Matrix Asphalt* 35
2.2.3 CPA – Camada Porosa de Atrito 36
2.3 **Dosagem de misturas asfálticas** 36
2.3.1 Método de Hubbard-Field 37
2.3.2 Método de Triaxial Smith 37
2.3.3 Método de Hveem 37
2.3.4 Método SUPERPAVE 38
2.3.5 Método de dosagem Marshall 40
2.4 **Método Bailey** 43
2.4.1 Considerações iniciais 43
2.4.2 Arranjo de agregados 43
2.4.3 Agregados graúdos e miúdos no método Bailey 44
2.4.4 Combinação volumétrica dos agregados 46
2.4.5 Compactação de agregados 46
2.4.5.1 Massa unitária solta do agregado graúdo 46
2.4.5.2 Massa unitária compactada do agregado graúdo 47
2.4.5.3 Escolha da massa específica do agregado graúdo 47
2.4.5.4 Massa unitária compactada do agregado miúdo 49
2.4.6 Determinação de uma mistura asfáltica 49
2.4.7 Análise do cálculo da mistura 51
2.4.7.1 Proporção de agregados graúdos (proporção AG) 52
2.4.7.2 Proporção graúda do agregado miúdo (proporção GAM) 53
2.4.7.3 Proporção miúda do agregado miúdo (proporção MAM) 53
2.4.7.4 Resumo dos conceitos de proporções 54

2.4.7.5 Recomendações de misturas pelo método Bailey *54*

2.4.8 Considerações finais 55

3 MÉTODO DE PESQUISA 56

3.1 **Estratégia de pesquisa** 56

3.2 **Planejamento da pesquisa** 56

3.3 **Materiais utilizados** 57

3.3.1 Agregados pétreos 57

3.3.2 Cal 58

3.3.3 Ligante asfáltico 59

3.4 **Misturas realizadas** 60

3.5 **Procedimentos laboratoriais utilizados** 60

3.5.1 Análise granulométrica 60

3.5.2 Massas específicas e absorção dos materiais 61

3.5.3 Dosagem Marshall 63

3.5.4 Resistência à tração por compressão diametral 64

3.5.5 Módulo de resiliência 65

3.5.6 Perda de massa – desgaste Cantabro 66

3.5.7 Método Bailey 67

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 69

4.1 **Caracterização dos materiais** 69

4.1.1 Análise granulométrica 69

4.1.2 Densidade e absorção dos materiais e misturas 70

4.1.3 Massas unitárias e vazios dos materiais 71

4.2 **Misturas realizadas** 72

4.2.1 Mistura referência faixa B (REFB) 73

4.2.2 Mistura referência faixa C (REFC) 74
4.2.3 Mistura Bailey com MEE de 95% faixa B (MBB95) 76
4.2.4 Mistura Bailey com MEE de 105% faixa B (MBB105) 77
4.2.5 Mistura Bailey com MEE de 95% faixa C (MBC95) 79
4.2.6 Mistura Bailey com MEE de 105% faixa C (MBC105) 80
4.3 **Caracterização das misturas asfálticas** 82
4.3.1 Teor de ligante das misturas 82
4.3.2 Dosagem Marshall 83
4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral (RT) 90
4.3.4 Módulo de resiliência (MR) 92
4.3.5 Módulo de resiliência x resistência à tração por compressão diametral 94
4.3.6 Perda de massa – desgaste Cantabro 95
4.3.7 Relação estabilidade x fluência 97
4.3.8 Método Bailey 98
5 CONCLUSÃO 101
REFERÊNCIAS 104

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso tem como tema a dosagem de misturas asfálticas a quente selecionadas granulometricamente por dois métodos distintos, sendo o Método Bailey e o método de tentativas. Foram realizadas seis misturas asfálticas, avaliando-se posteriormente as propriedades referentes a seus desempenhos.

1.1 Contexto

Segundo dados do Sistema Nacional de Viação de 2014, no Brasil existem 1.691.522 km de rodovias, dos quais apenas 203.599 km são pavimentados, abrangendo 12% da malha. Das rodovias que são pavimentadas, 65.930 km são federais. Destas, apenas 8,2% são duplicadas (5.446 km) e 1,9% (1.316 km) estão em fase de duplicação; os restantes (89,9%) são de pista simples (CNT, 2014).

Misturas asfálticas a quente são de uso corrente no país para a execução de revestimentos para pavimentos. Um grande problema encontrado é o custo elevado, que somado ao das outras camadas de um pavimento, acaba acarretando em valores elevados para cada quilômetro executado, o que pode ser um indicativo da pequena quantidade de rodovias pavimentadas existentes.

No ano de 2014, a Pesquisa CNT de Rodovias avaliou um total de 98.475 km de rodovias pavimentadas no Brasil. Em 62,1% da extensão total pesquisada foram detectadas alguns tipos de deficiências, sendo estas no pavimento, na sinalização ou na geometria da via (CNT, 2014).

Pavimentos apresentam irregularidades na superfície que podem acarretar em acidentes, sendo que buracos, trechos destruídos e ausência de acostamento elevam o risco para que estes ocorram. Além disso, a qualidade do pavimento é determinante na qualidade do desempenho de usuários durante viagens.

A Pesquisa CNT apontou que 50,1% da extensão total avaliada apresentou estado ótimo (42,4%) e bom (7,7%). Porém, 49,9% apresentaram algum tipo de deficiência, o que é um dado um tanto quanto alarmante. Sendo que 36,7% do pavimento é classificado como regular, 9,8%

como ruim e 3,4% como péssimo. Os trechos considerados críticos apresentam extensão de 13.017 km, sendo estes ruins ou péssimos (CNT, 2014).

Com o conhecimento dos dados apresentados, é considerado plausível o estudo de diferentes métodos de seleção granulométrica de misturas asfálticas e a avaliação destes. Sabe-se que a condição da camada de rolamento dos pavimentos depende e muito do intertravamento de agregados que apresenta uma mistura, da quantidade de ligante envolvida e dos vazios de ar presentes. Logo, se avaliou qual método, dentre os adotados, apesentou melhores resultados, estimando assim o possível comportamento das misturas caso fossem submetidas a um tráfego intenso.

1.2 Problema

Altas temperaturas, volume excessivo de tráfego, pressão de enchimento dos pneus e carga por eixo de veículos são prejudiciais a um pavimento, sendo que os três últimos vêm aumentando consideravelmente com o passar dos anos, com isso, tornam-se necessárias mudanças nas misturas que vem sendo executadas no país com o intuito de adequarem-se às atuais solicitações, tendo a capacidade de resistir a desgastes e deformações, por exemplo. Em seu trabalho, Cunha (2004) obteve resultados mais satisfatórios com misturas realizadas pelo Método Bailey de seleção granulométrica em relação ao método de tentativas, sendo que as misturas Bailey obtiveram valores maiores de vazios no agregado mineral e de relação betume vazios, indicando misturas menos propensas a deformações e desgaste.

O tema abordado apresenta poucos dados e estudos realizados no Brasil, além disso, os encontrados apresentam na maioria das vezes materiais, métodos de dosagem e avaliações de desempenho diferentes. Mendes (2011) concluiu em seu trabalho que misturas dosadas pelo método de tentativas apresentaram valores inferiores no que diz respeito à resistência à tração do que as que utilizaram o Método Bailey. Estes resultados eram esperados, pois um dos benefícios do método é proporcionar um melhor intertravamento dos agregados das misturas. Para módulo de resiliência os maiores valores foram obtidos para misturas cujo esqueleto foi elaborado através do Método Bailey, evidenciando, assim, os resultados encontrados para resistência, pois quanto maior for à resistência, maior é o seu módulo de resiliência. Isto comprova o melhor intertravamento das misturas que utilizaram este método.

1.2.1 Questões de pesquisa

Questão principal:

- O método de seleção granulométrica por tentativas ou o Método Bailey resultou em misturas asfálticas mais eficientes?

Questão secundária:

- O método de seleção granulométrica por tentativas ou o Método Bailey resultou em misturas asfálticas com menor consumo de cimento asfáltico de petróleo?

1.2.2 Objetivos de pesquisa

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral comparar e avaliar misturas asfálticas dosadas a partir de dois métodos de seleção granulométrica distintos. Os objetivos específicos são:

- Análise da Resistência à Tração (RT) das misturas;
- Análise do Módulo de Resiliência (MR) das misturas;
- Análise da Perda de Massa – Metodologia Cantabro das misturas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

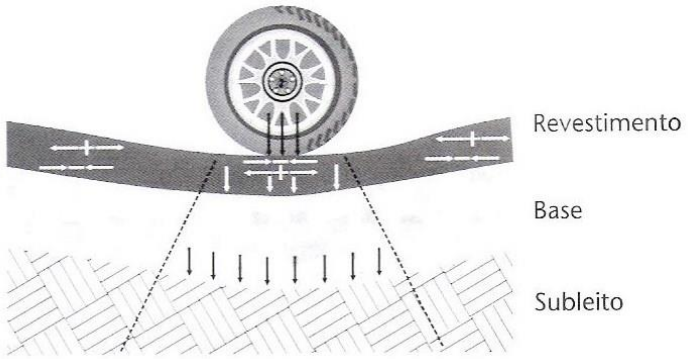
Nesta revisão serão abordados distintos assuntos ligados ao tema deste trabalho, com base em fundamentações teóricas encontradas na literatura nacional e internacional, sendo estes: caracterização do pavimento, materiais granulares para pavimentação, métodos de dosagem e seleção granulométrica de misturas asfálticas, ligantes asfálticos, entre outros.

2.1 Características dos pavimentos

Pavimento é uma estrutura que engloba inúmeras camadas que apresentam espessuras finitas, construídas sobre a terraplenagem, tendo destino técnico e econômico para resistir aos esforços provenientes do clima e do tráfego de veículos e, além disso, propiciar aos usuários melhores condições de rolamento, com segurança, conforto e economia (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Balbo (2007), a estrutura do pavimento, em seu sentido estrutural, é concebida para receber e transmitir esforços aliviando pressões sobre as camadas inferiores, que em geral apresentam uma menor resistência, embora isso não seja considerado como padrão. Para funcionar de maneira adequada, todas as camadas que a constituem 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, a Figura 1 demonstra a distribuição dos esforços nas camadas.

Figura 1: Distribuição dos esforços nas camadas do pavimento



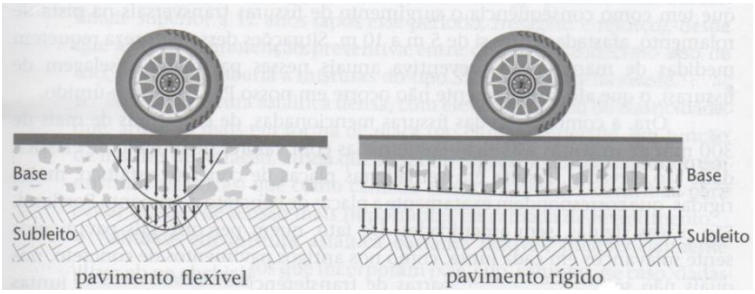
Fonte: Balbo (2007)

As cargas provenientes dos veículos e do ambiente, geralmente de maneira transitória e distintas magnitudes, são transferidas à fundação de forma aliviada e criteriosa, impedindo com que ocorram deformações incompatíveis devido à utilização da estrutura ou mesmo de rupturas na fundação, que acabam por gerar estados de tensão que não foram previstos inicialmente induzindo toda a estrutura a um comportamento mecânico inapropriado e à degradação acelerada ou precoce. Cada camada apresenta uma ou mais funções específicas, proporcionando condições adequadas de suporte e rolamento aos veículos, independente das condições ambientais encontradas. De maneira geral, diz-se que as cargas externas reproduzem esforços solicitantes verticais e horizontais. Reduzem-se os verticais a solicitações de compressão e cisalhamento e, os horizontais, podendo solicitar alguns materiais específicos à tração ou apenas atuar com tensões de confinamento (BALBO, 2007).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, que fica sobreposta a uma camada de sub-base, reforço do subleito e subleito, sucessivamente. Esta ordem não necessariamente precisa ser respeitada, sendo a mesma estipulada em projeto. Já pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos, basicamente. Estes são constituídos por quatro camadas principais, sendo o revestimento asfáltico a superior, que fica sobre uma camada de base, sub-base e reforço do subleito, respectivamente (BERNUCCI et al., 2008).

O que diferencia, basicamente, um pavimento do outro, é sua coloração, suas camadas constituintes e a maneira que se da à distribuição das cargas aplicadas. Conforme Figura 2, se pode observar a maneira de dissipação das cargas em ambos os pavimentos.

Figura 2: Dissipação de cargas nos pavimentos

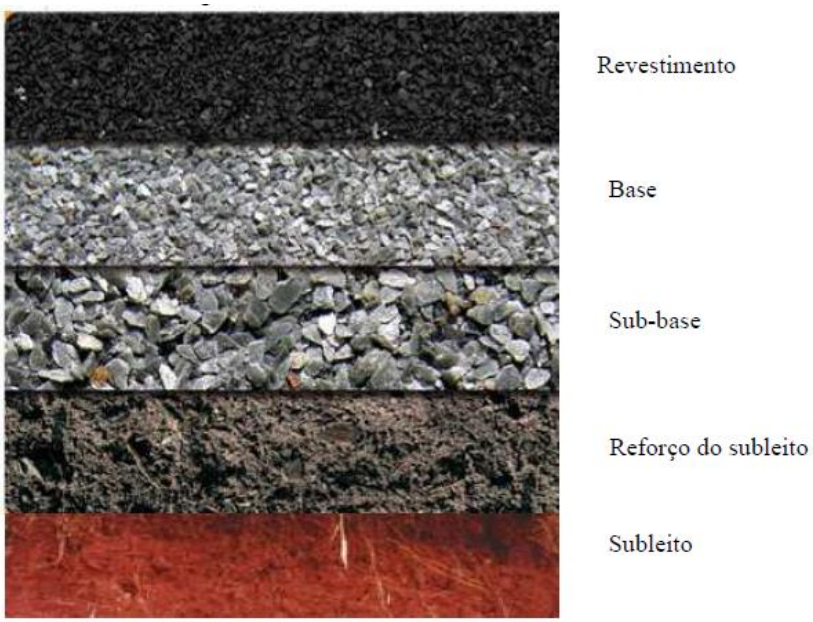


Fonte: Adaptada de Balbo (2007, p. 47)

2.1.1 Camadas do pavimento asfáltico

Um pavimento é composto pelas seguintes camadas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito e, além destas, há ainda a presença do subleito, que não faz parte do pavimento, porém, como é a camada já existente do local, apresenta a funcionalidade de servir como fundação do pavimento asfáltico e, acaba passando a integrar toda a estrutura. Estas camadas estão demonstradas na Figura 3 e são descritas a seguir (BALBO, 2007).

Figura 3: Camadas constituintes do pavimento



Fonte: Pasche (2013)

2.1.1.1 Revestimentos asfálticos

O revestimento asfáltico é a camada destinada a receber as ações do tráfego e também do ambiente, sendo esta a responsável por resistir diretamente às mesmas e transmiti-las para as camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento e melhorando as condições de rolamento (segurança e conforto). Os materiais que o compõem são basicamente agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

2.1.1.2 Bases e sub-bases

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).

2.1.1.3 Reforços de subleitos

Esta camada é empregada geralmente quando o subleito (fundação do pavimento) 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).

2.1.1.4 Subleito

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).

2.1.2 Materiais granulares para pavimentação

Agregado é um termo vinculado genericamente para designar areais, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas no seu estado de processamento, além de considerar, também, os agregados artificiais, sendo definidos posteriormente. A escolha deste para certa utilização deve apresentar propriedades capazes de suportar as cargas impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O desempenho das partículas vai depender de fatores como a maneira de sua produção, se elas são mantidas unidas ou não e, das condições sob as quais irão atuar. A escolha é realizada em laboratório, após uma bateria de ensaios para caracterizar seu comportamento (BERNUCCI et al., 2008).

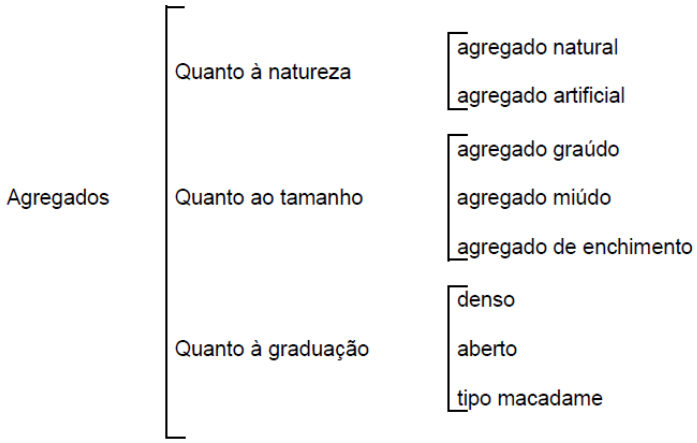
Para o uso em misturas asfálticas os agregados, independentemente da maneira a qual são concebidos, espera-se que sejam resistentes (duros e duráveis), e que o esqueleto mineral resista à

aplicação constante de cargas repetidas. Aqueles que apresentam formato cúbico e tem textura áspera proporcionam um maior intertravamento do que agregados lisos e redondos (seixos rolados). Mesmo que ambos os agregados (cúbicos e arredondados) possuam a mesma dureza intrínseca, agregados cúbicos tendem a travar entre si, resultando em uma massa de material mais forte. Os agregados arredondados, ao invés de intertravarem-se, apresentam tendência a deslizar uns sobre os outros (MOTTA et al., 1996).

2.1.2.1 Classificação dos agregados

Os agregados utilizados na pavimentação podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles usados no estado em que se encontram na natureza, já os segundos abrangem todos os que necessitam de alguma transformação em relação ao material natural, podendo esta ser física ou química. Estes materiais podem ser classificados segundo a natureza, tamanhos e distribuição dos grãos (Figura 4) (DNIT, 2006).

Figura 4: Classificação dos agregados para pavimentação



Fonte: DNIT (2006)

- Quanto à natureza das partículas:

a) Agregados naturais são aqueles provenientes de grãos oriundos da alteração das rochas devido a processos de intemperismo ou produzidos através de processos de britagem: seixos, pedregulhos, britas, areais, etc.

b) Agregados artificiais são aqueles em que as partículas são produtos ou subprodutos de processos industriais devido a transformações físicas ou químicas do material: argila calcinada, escória de alto forno, sílica da cinza da casca do arroz, argila expandida.

- Quanto ao tamanho individual dos grãos:

a) Agregado graúdo é aquele cujo material fica retido na peneira nº 10 (2,0 mm): cascalhos, seixos, britas, etc.

b) Agregado miúdo é o material passante na peneira nº 10 (2,0 mm) e retido na peneira nº 200 (0,075 mm): areia, pó-de-pedra, etc.

c) Agregado de enchimento ou material de enchimento (fíler) é aquele que passa pelo menos 65% na peneira de nº 200 (0,075 mm): cimento Portland, cal extinta, pó de chaminé, etc.

O material de enchimento, agregados miúdos e graúdos são materiais não-plásticos e inertes em relação aos demais componentes de uma mistura.

- Quanto à distribuição ou graduação dos grãos (Figura 5):

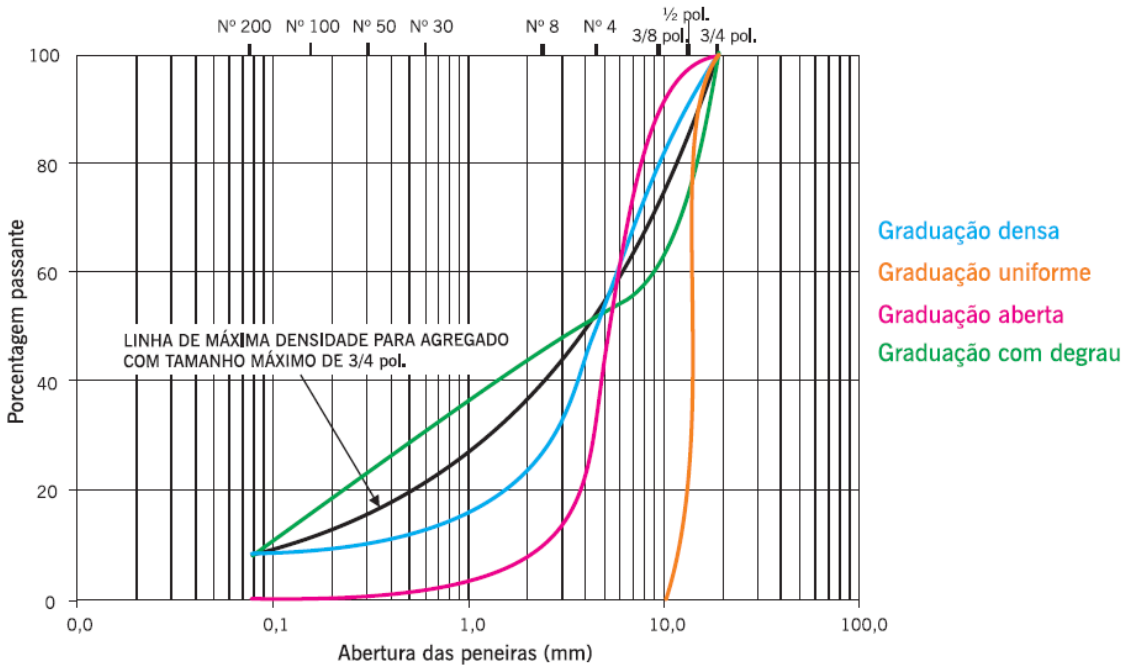
a) Agregado de graduação densa é aquele que apresenta curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com material fino suficiente para preencher os vazios criados pelas partículas maiores.

b) Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta curva granulométrica de material bem graduado e contínua, porém apresenta quantidade de material fino insuficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

c) Agregado tipo macadame é aquele que possuí grãos de um único tamanho. É um agregado de granulometria uniforme onde o seu diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

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).

Figura 5: Curvas granulométricas das diferentes graduações



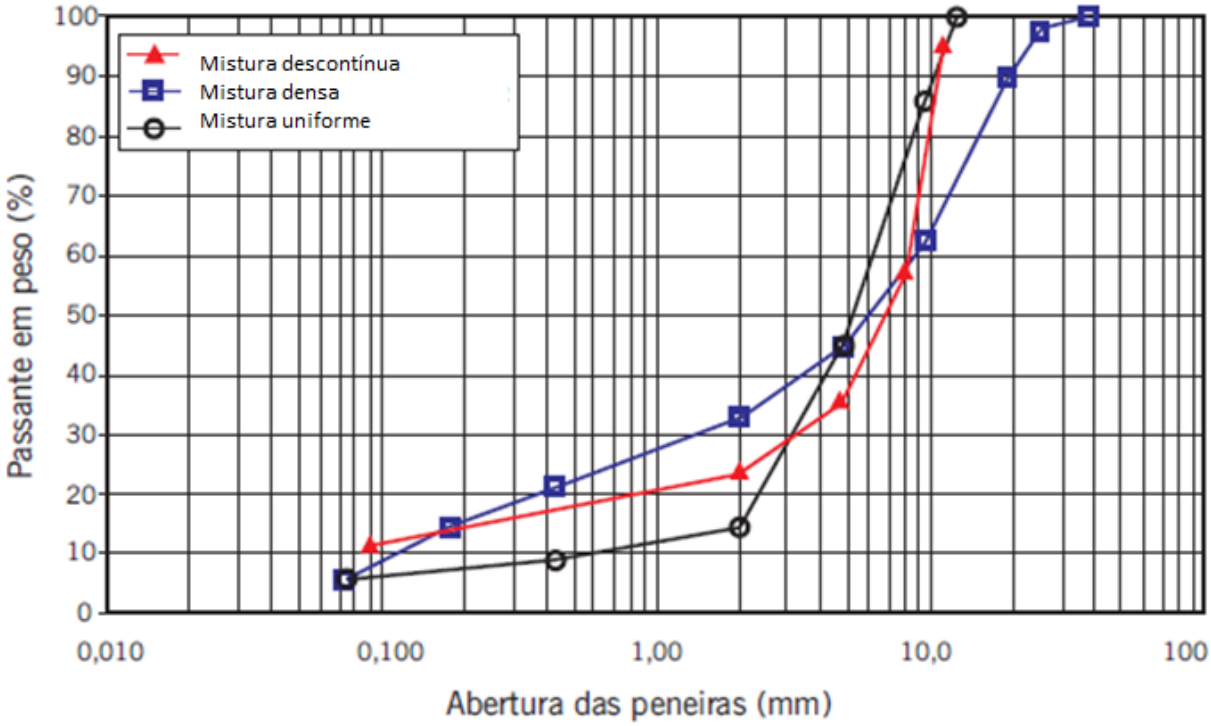
Fonte: Bernucci et al. (2008)

2.1.3 Distribuição granulométrica de misturas asfálticas

A graduação de agregados é a maneira pela qual suas partículas estão distribuídas, por tamanho, sendo expressa em função da porcentagem em volume ou peso total da mistura. A graduação por volume é mais útil, porém é a em peso que acaba por ser mais utilizada, devido a sua praticidade (CUNHA, 2004).

O desempenho de uma mistura asfáltica a curto, médio e longo prazo está vinculado diretamente com sua graduação. Esta acaba por afetar quase todas as propriedades importantes de uma mistura como a estabilidade, a permeabilidade, a durabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à deformação permanente, a resistência à fadiga e a resistência aos danos decorrentes da umidade. Desta forma, a graduação deve ser considerada o passo inicial para a elaboração de uma mistura asfáltica. Analisando as porcentagens passantes ou retidas de agregados em determinado conjunto de peneiras, este sendo estipulado de acordo com a especificação ou norma utilizada, é realizada a distribuição granulométrica de um determinado material. Através das porcentagens encontradas, a graduação pode ser representada graficamente por uma curva granulométrica, fazendo destaque para misturas com graduações densa, descontínua e uniforme (Figura 6) (CUNHA, 2004).

Figura 6: Curvas granulométricas típicas de misturas asfálticas



Fonte: Adaptada de Bernucci et al. (2008, p. 160)

2.1.3.1 Distribuição densa

A melhor mistura 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 (CUNHA, 2004).

Segundo Roberts et al. (1991 apud CUNHA, 2004), para se alcançar um volume de vazios no agregado mineral (VAM) adequado, órgãos rodoviários tentam estabelecer graduações que fiquem paralelas à linha de máxima densidade, apresentando também alguns pontos abaixo e outros acima. No caso de materiais de origem natural que foram britados, tendo suas partículas

características cúbicas e angulares, a curva granulométrica deveria passar acima desta linha, para que seus benefícios sejam aproveitados ao máximo.

2.1.3.2 Distribuição descontínua

Conforme Izzo et al. (1997 apud CUNHA, 2004), uma mistura asfáltica descontínua resiste aos esforços provenientes do tráfego através de uma grande quantidade de partículas graúdas de agregados, estas formando 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 do tipo CMHB (*Coarse Matrix High Binder*) ou SMA (*Stone Matrix Asphalt*) apresentam graduação descontínua, sendo características destas uma grande quantidade de material graúdo e material de enchimento (fíler), tendo uma proporção pequena de agregados médios.

Misturas descontínuas do tipo SMA e CMHB apresentam uma maior quantidade de ligante asfáltico. Devido a essa maior quantidade de asfalto e a grande quantidade de fíler, há a formação de mástique, que preenche os vazios deixados pelas partículas de agregados graúdos, contribuindo, assim, para a resistência 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 tem um valor ainda mais significativo, devido ao fato de que é o esqueleto formado pela fração graúda o responsável por resistir aos esforços provenientes do tráfego. Esta deve apresentar resistência elevada, isto, pelo fato de seu intertravamento ser o responsável pela resistência a deformação permanente (CUNHA, 2004).

> Uma mistura de graduação descontínua, como SMA ou CMHB, pode ter um melhor desempenho que uma mistura densa, pois a grande quantidade de agregado graúdo aumenta a resistência à deformação permanente, enquanto a grande quantidade de fíler e asfalto aumenta a resistência ao desgaste (CUNHA, 2004, p. 21).

2.1.3.3 Distribuição Bailey

O Método Bailey de seleção granulométrica tem por objetivo a tentativa de unir os benefícios encontrados em misturas densas 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,

estas últimas fornecem as características de compactação de cada fração de agregados em uma mistura. Com isto, o que se busca é assegurar uma boa resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos agregados graúdos e a resistência ao desgaste por apresentar um maior teor de ligante asfáltico devido ao volume de vazios adequado (VAVRIK et al., 2002).

2.1.4 Ligantes asfálticos

O uso intensivo do asfalto na pavimentação se deve a razões distintas, sendo as principais: proporciona uma união consistente dos agregados, agindo como ligante e permitindo o controle da flexibilidade; é impermeabilizante, durável e resistente à ação da maioria dos sais, dos ácidos e dos álcalis, podendo ser utilizado de diversas maneiras em diferentes proporções de agregados minerais. Referente ao material, o betume é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono. O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos que deriva do petróleo de maneira natural ou através de destilação, sendo seu principal componente o betume, mas podendo conter ainda outros gases em proporções inferiores. Ainda há o alcatrão, que é um produto composto por hidrocarbonetos, sendo obtido através da queima ou destilação de carvão, madeira, entre outros (BERNUCCI et al., 2008).

O asfalto pode se enquadrar em determinada classificação particular, que geralmente é baseada nas propriedades físicas que pretendem garantir o bom desempenho do material na obra, sendo o termo técnico utilizado a sigla CAP – cimento asfáltico de petróleo, seguida de algum identificador numérico (BERNUCCI et al., 2008).

2.1.4.1 Características de ligantes

Para projeto ou construção, os ligantes asfálticos apresentam três características ou propriedades importantes, sendo elas consistência (também conhecida como viscosidade), pureza e segurança, que serão descritas a seguir (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989?).

- Consistência:

A consistência é o termo utilizado para descrever o grau de fluidez ou a viscosidade do asfalto a qualquer temperatura considerada. Esta é variável, assim, deve-se adotar uma temperatura padronizada quando há comparação entre consistências de distintos cimentos

asfálticos. A graduação destes é empregada com base na faixa de consistência a uma temperatura padrão.

- Pureza:

A composição do cimento asfáltico é quase que inteiramente de betume, este, por definição, tem sua totalidade solubilizada no bissulfeto de carbono. Os asfaltos refinados são betumes quase puros e normalmente mais de 99,5% solúveis no bissulfeto de carbono. Quando existem impurezas, estas são inertes.

- Segurança:

A espuma do asfalto é um risco para a segurança, devido a isso as especificações requerem que o asfalto não espume em temperaturas de até 175ºC. Quando aquecido a temperaturas bastante elevadas, este desprenderá vapores que irão chamejar por ação de centelha ou exposição de chama. A temperatura que ocorrerá isto é denominada ponto de fulgor, esta, sendo muito superior as utilizadas nas operações de pavimentação, normalmente. Para assegurar uma margem de segurança adequada, o ponto de fulgor é medido e controlado.

2.1.4.2 Ensaios realizados para caracterização de ligantes

Para a caracterização de ligantes asfálticos, vários procedimentos laboratoriais devem ser realizados, assim, consegue-se observar as propriedades apresentadas e seu enquadramento perante a norma. Os ensaios para caracterizá-los são os seguintes: ensaio de penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade, durabilidade, solubilidade, ponto de fulgor, espuma, massa específica e densidade relativa, ponto de ruptura Fraass e, por fim, ensaio de suscetibilidade térmica (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989?).

2.1.4.3 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Os asfaltos ou Cimentos Asfálticos de Petróleo (simplesmente denominados por CAP) são gerados através do refinamento do petróleo cru, para finalidades distintas, incluindo as especificas de pavimentação. Este material atua como ligante ou aglutinante, possuindo boa aderência aos agregados (com algumas exceções), além de apresentar propriedades impermeabilizantes, tornando seu uso bastante diverso e popular na engenharia civil. Sua

utilização normalmente é atribuída a favoráveis condições que proporciona, como flexibilidade, relativa durabilidade, grande resistência à maior parte dos ácidos, álcalis e sais, insolúvel em água e dependente da temperatura devido a sua viscosidade (BALBO, 2007).

No Brasil, os CAPs são classificados de acordo com sua consistência (medida pelo ensaio de penetração). Estes podem ser considerados duros, médios e moles, sendo eles CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. O emprego destes em misturas asfálticas depende de sua temperatura, devido a ele ser um material termosensível. 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).

2.2 Revestimentos asfálticos

Revestimentos asfálticos realizados por mistura são aqueles em que os agregados são pré-envolvidos por material betuminoso, antes de sua compactação. Quando este é realizado em usinas, resultam os “Pré-misturados Propriamente Ditos”, já quando executado em pista, têm-se os “Pré-misturados na Pista” (road mixes). Ainda, conforme seus respectivos processos construtivos são adotadas as seguintes designações: Pré-misturado a Frio e Pré-misturado a Quente (DNIT, 2006).

> 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, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (BERNUCCI et al., 2008, p. 157).

Segundo Bernucci et al. (2008), no Brasil um dos tipos mais empregados de revestimento é o concreto asfáltico (CA), que é conhecido também como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Este é produto da mistura adequadamente proporcionada de agregados de diversos tamanhos e ligante asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, devido à característica viscosidade-temperatura do ligante.

2.2.1 Concreto asfáltico (CA)

Concreto asfáltico (CA) é uma mistura flexível, que resulta de um processo a quente, em usina apropriada, móvel ou fixa, de agregado mineral graúdo, miúdo e material de enchimento (fíler) quando necessário e ligante asfáltico, sendo espalhados e compactados a quente (DAER/RS, 1998).

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 – fíler (pó-de-pedra, cimento Portland ou finos calcários) 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.

O fíler, além de ser o material de enchimento do CA, acaba por formar uma massa de CAP + minerais finos dispersos denominada mástique asfáltico. Além de preencher os vazios de uma mistura, os fíleres ajudam no aumento de viscosidade do CAP, gerando incremento no ponto de amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura, tendo cuidado com o teor adicionado de fino, pois essas características podem não ser observadas quando de teores muito elevados (BALBO, 2007).

2.2.2 SMA – *Stone Matrix Asphalt*

O SMA – *Stone Matrix Asphalt* – surgiu na Alemanha, na década de 1960, com o objetivo de dar escoamento à água sem sobreposição dos agregados. Além disso, este colabora com a aderência superficial e, principalmente, melhora a questão da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas para revestimentos (BALBO, 2007).

Uma mistura SMA, considerada um concreto asfáltico usinado a quente, apresenta várias diferenças do CA convencional, sendo preparada com um conjunto de partículas com distribuição mais uniforme, apresentando agregados mais graúdos e pouca quantidade de finos, sendo necessária uma cubicidade maior dos agregados britados para que assim, após compactação,

apresentem grande contato entre eles, gerando um bom intertravamento do esqueleto estrutural (BALBO, 2007).

2.2.3 CPA – Camada Porosa de Atrito

Misturas do tipo CPA – Camada Porosa de Atrito – são consideradas abertas, apresentando grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de material de enchimento, de agregado miúdo e ligante asfáltico. Normalmente, estas misturas a quente apresentam entre 18% e 25% de vazios com ar – DNER-ES 386/99. É empregada como camada de rolamento com a finalidade de aumentar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Este tipo de revestimento tem características importantes, causando os seguintes efeitos: reduz a 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. Além de todos esses benefícios, outro fator importante é a redução de ruído ao rolamento (BERNUCCI et al., 2008).

2.3 Dosagem de misturas asfálticas

A dosagem de misturas asfálticas consiste na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito "ótimo" de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. Sua definição não é simples. Sendo, para uma definição mais conveniente, utilizar o teor de ligante dosado como teor de projeto, ressaltando de uma maneira mais convencional (BERNUCCI et al., 2008).

O teor de projeto de ligante asfáltico apresenta variações de acordo com o método de dosagem adotado, além de ser função de parâmetros como energia de compactação, temperatura, tipo de mistura, entre outros. O método mais utilizado é o denominado método de dosagem Marshall, que tem sua compactação através de impacto e seu nome faz referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940 (BERNUCCI et al., 2008).

2.3.1 Método de Hubbard-Field

Este método consiste em medir a resistência à extrução de corpos de prova, moldados com a mistura betuminosa. Este é considerado um dos primeiros ensaios para avaliar as propriedades mecânicas de misturas, surgindo na década de 1920. Quando proposto, havia uma grande necessidade de medir a estabilidade de distintos tipos de misturas betuminosas, pois a utilização de pavimentos asfálticos estava evoluindo com extrema rapidez, sendo que na época, o projeto era baseado apenas em critérios e experiências pessoais (SENÇO, 2001).

O ensaio de Hubbard-Field consiste em encontrar um valor de estabilidade para uma mistura, ou seja, a carga máxima que a mesma resiste. O procedimento utilizado acarreta em um tipo de ruptura que corresponde ao cisalhamento. Devido às condições de tráfego da época a qual foi desenvolvido, que consistiam em automóveis com rodas de aço, o ensaio realmente deveria representar rupturas por cisalhamento (SENÇO, 2001).

2.3.2 Método de Triaxial Smith

Dos ensaios triaxiais utilizados, o de Smith é o que correlaciona melhor o confinamento lateral que uma quantidade determinada de material recebe na natureza, sendo as condições de confinamento aplicadas em laboratório, onde se exerce incialmente uma pressão lateral aos corpos de prova e, posteriormente, estes são submetidos a pressões verticais (SENÇO, 2001).

Os métodos empíricos para determinação de misturas apresentam seu ponto fraco no fato de se limitarem quanto às considerações para as quais se fizeram correlações iniciais entre resultados obtidos em laboratório e os obtidos no comportamento no campo. Devido a essas sérias restrições, milhares de quilômetros de pavimentos foram projetados e executados utilizando métodos empíricos, não deixando de prestar os serviços esperados, porém, sempre há a necessidade de projetar misturas através de processos racionais (SENÇO, 2001).

2.3.3 Método de Hveem

A metodologia Hveem foi criada por Francis Hveem, engenheiro de Materiais e Pesquisa do Departamento de Transporte (DOT) da Califórnia (EUA). A dosagem da mistura asfáltica com este método é baseada em parâmetros volumétricos e de estabilidade. As vantagens apresentadas no método são a compactação pulsante e a estabilidade Hveem, porém, o grande problema

verificado é que os equipamentos (compactador e o estabilômetro) são mais caros que os do método Marshall, além da dificuldade de transporte, o que gera obstáculos no controle da mistura em campo (NASCIMENTO, Maria., 2011).

O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Neste também é determinada a resistência da mistura através do inchamento em água. Este apresenta duas vantagens significantes segundo técnicos, que é a compactação pulsante, melhor representando o adensamento do CA em campo e, o parâmetro de resistência, onde a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência ao cisalhamento. Este mede a capacidade resistente de um corpo de prova quando deformado lateralmente através da aplicação de uma carga vertical (MOTTA et al., 1996).

Segundo Pinheiro (2004), a compactação da metodologia Hveem realizada em laboratório da uma boa aproximação da compactação efetuada no campo, enquanto que a estabilidade simula consideravelmente a resistência do revestimento à deformação lateral. Apesar de ser difundido de forma significante nos Estados Unidos, alguns autores apontam que o método Hveem pode apresentar misturas não duráveis devido ao baixo teor de CAP.

O primeiro estudo onde se faz evidência a deformabilidade dos materiais utilizados na pavimentação foi realizado por Francis Hveem, no ano de 1938, no estado da Califórnia, Estados Unidos. Este introduziu o conceito de resiliência, pois entendia que o trincamento dos revestimentos asfálticos dava-se devido à deformação resiliente das camadas subjacentes. O termo em questão foi utilizado em detrimento ao de deformação elástica sob o argumento de que as deformações que ocorrem nos pavimentos são superiores do que as encontradas em materiais usualmente utilizados na engenharia, como o aço e o concreto, que geralmente se apresentam como sólidos elásticos. De maneira sucinta, o termo resiliência nada mais é do que energia que fica armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando as tensões que causam as deformações se encerram (MEDINA, 1997).

2.3.4 Método SUPERPAVE

Em 1987, com o objetivo de melhorar o desempenho, durabilidade, segurança e eficiência de misturas asfálticas, o congresso americano propôs a formação do *Strategic Highway Research*

Program (SHRP). Após cinco anos de trabalho (Outubro de 1987 até Março de 1993), US$ 150 milhões foram investidos no SHRP, sendo o produto final deste o denominado *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE). Este sistema obteve avanços significativos em procedimentos de ensaios para caracterização de ligantes e dosagem de misturas asfálticas. Além disso, também podem ser definidas por este sistema as propriedades de consenso e de origem de agregados (PAZOS, 2015).

Segundo Marques (2004), o sistema SUPERPAVE específica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas e prevê o desempenho de pavimentos. Incluindo equipamentos de ensaios, métodos e critérios. Foram desenvolvidos três níveis de projetos de mistura, sendo que estes dependem do volume de tráfego ou de outra maneira de classificação funcional de uma rodovia. A seguir seguem algumas especificações que cada nível considera:

- Nível 1: Este é projetado para tráfego de eixo equivalente (ESAL – Equivalent Axle Loads) abaixo de 10^6. Apenas é requerido o projeto volumétrico.
- Nível 2: Este faz referência para tráfegos com ESAL entre 10^6 e 10^7. Utiliza-se o projeto geométrico como ponto de partida e uma bateria de testes para prever o desempenho do pavimento.
- Nível 3: Este faz referência para tráfegos com ESAL superiores a 10^7. Faz-se uso dos níveis 1 e 2 e alguns testes adicionais, tendo a previsão de desempenho parâmetros mais confiáveis, devido a uma bateria de ensaios maior.

Para a escolha da granulometria dos agregados de uma mistura asfáltica, o método SUPERPAVE estabelece a determinação por tentativas, onde se representa a mistura em um gráfico de potência 0,45 contendo pontos de controle, zonas de restrição e linha de densidade máxima. Os pontos de controle e zona de restrição são definidos de acordo com o diâmetro máximo nominal dos agregados (GOUVEIA, 2006).

Os métodos de controle da granulometria tiveram sua escolha bastante controversa devido a não clareza dos motivos que levaram a zona restrita a tornar-se parte das especificações SUPERPAVE, com vistas a sua pontuação baixa que reflete a desacordos de opiniões a respeito desta. Posteriormente, muitas controvérsias foram e vêm sendo levantadas em referência as especificações granulométricas do método, principalmente em relação à zona restrita. O motivo

principal é que misturas asfálticas densas, que transpõem a zona restrita, apresentam bom desempenho em campo (KANDHAL & COOLEY JR., 2002; HAND & EPPS, 2001 apud GOUVEIA, 2006).

O método SUPERPAVE considera o tráfego e o clima na seleção dos materiais, sendo o uso do compactador giratório SUPERPAVE (SGC) no preparo dos corpos de prova o principal diferencial. Segundo Mohammad e Shamsi (2007 apud NASCIMENTO, Luis., 2008), o SGC é normalmente utilizado para fazer a medição das propriedades volumétricas como densidade e volume de vazios de acordo com o número de giros, não sendo analisadas a estabilidade ou resistência com os dados adquiridos da compactação giratória (NASCIMENTO, Luis., 2008).

Este método consiste na dosagem de misturas asfálticas, através de especificações pré-estabelecidas e ensaios para ligantes e misturas asfálticas, incluindo procedimentos de avaliação e desenvolvimento de modificadores, como borracha de pneus ou polímeros, propondo ainda um sistema de controle de qualidade na execução (BARDINI, 2008).

> O programa SHRP visou, principalmente, a avaliação de ligantes asfálticos, projeto de misturas e sua análise. Não foram feitas, a princípio, pesquisas específicas para os agregados, pois a idéia era analisá-los através da análise das misturas. Mais tarde, os pesquisadores perceberam que era necessário avaliar os agregados separadamente dos outros componentes da misturas e, para isso, um grupo de especialistas fez uma abordagem consensual, estabelecendo recomendações para as propriedades necessárias aos agregados em função dos vários níveis de tráfego (BARDINI, 2008, p. 73 & 74).

2.3.5 Método de dosagem Marshall

O método Marshall de dosagem de misturas asfálticas foi desenvolvido por Bruce Marshall, que foi Engenheiro de Betumes do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Mississippi. Os engenheiros militares americanos (“U.S. Corps of Engineers”), após extensas pesquisas e estudos de correlação, melhoraram o procedimento do ensaio Marshall e acrescentaram a ele alguns itens, desenvolvendo critérios de dosagem da mistura (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989?).

Este método é aplicável a misturas de pavimentação, sendo utilizados ligantes asfálticos graduados por penetração ou viscosidade e contendo agregados com diâmetro máximo nominal de 25 mm ou menos. Destina-se à dosagem de misturas asfálticas a quente em laboratório (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989?).

A partir de um grande número de pistas experimentais, nas quais se variavam as porcentagens de ligante e a granulometria dos agregados, se foi possível determinar um método de compactação para a avalição dos critérios de misturas Marshall. Após inúmeras passagens de veículos de diferentes tipos de cargas nos eixos, a U.S. Corps of Engineers 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 (SENÇO, 2001).

Para haver equilíbrio entre a estabilidade e a durabilidade se foi fixado que o volume de vazios correspondentes ao ar (vazios não preenchidos) na mistura total seriam limitados entre 3% e 5%, em peso. Já os vazios preenchidos por ligante tiveram seus limites fixados entre 75% e 85% dos vazios do agregado mineral. Sendo estes valores, a posteriori, adaptados às unidades em uso no Brasil (SENÇO, 2001).

A preparação dos corpos de prova para o ensaio envolve a mistura do ligante asfáltico com os agregados, onde ambos são aquecidos previamente separados, até determinada temperatura especificada. Após isto, a mistura é colocada em um molde aquecido e compactada com soquete de 10 libras de peso (4,54 kg) caindo de uma altura de 18 polegadas (45,72 cm), dando-se 75 golpes em cada face, para revestimentos submetidos a tráfego pesado (SENÇO, 2001).

> O ensaio de Marshall é executado com corpos-de-prova cilíndricos de 4 polegadas (10,16 cm) de diâmetro e 2 ½ polegadas (6,35 cm) de altura. Após as medidas para determinação do volume e da pesagem, são colocados em banho-maria a 60ºC (140ºF), por 20 a 30 minutos. Imediatamente após a retirada do banho-maria, os corpos-de-prova são levados à prensa do aparelho Marshall, sendo a carga aplicada continuamente ao longo da superfície do cilindro (compressão diametral), à média de 2 polegadas (50,8 mm) por minuto, até o rompimento. A carga máxima aplicada que provoca o rompimento é o valor da estabilidade Marshall. A deformação sofrida pelos corpos-de-prova durante a aplicação da carga até o valor máximo é medida pelo medidor de fluência e anotada como valor de fluência. A unidade de fluência é 0,01" (um centésimo de polegada = 0,254 mm) (SENÇO, 2001, p. 175 e 176).

O procedimento tradicional de dosagem Marshall define o traço da mistura asfáltica baseando-se quase que exclusivamente em critérios volumétricos. Os parâmetros que são empregados no mesmo (estabilidade e fluência) não dão informações referentes às características resilientes da mistura (MARQUES, 2004).

O compactador Marshall que faz a compactação através do impacto quebra os agregados mais frequentemente que outros métodos e equipamentos utilizados para compactar misturas asfálticas. Porém, este fenômeno aparenta pouco efeito na medida das propriedades que são encontradas em misturas compactadas (MARQUES, 2004).

Existem diversos métodos de dosagem de misturas asfálticas, sendo o mais utilizado no Brasil o método Marshall. Esta metodologia apresenta o ensaio de estabilidade e fluência, sendo estes os únicos parâmetros mecânicos encontrados, com seus limites admitidos de maneira totalmente empírica (NASCIMENTO, Luis., 2008).

A estabilidade Marshall é uma medida indireta da pseudo-viscosidade da massa asfáltica, sendo afetada de maneira significante pelo atrito interno da mistura e pela viscosidade do cimento asfáltico na temperatura de ensaio (ROBERTS et al., 1996 apud NASCIMENTO, Luis., 2008). Entretanto, a estabilidade e o comportamento da mistura em campo não estão necessariamente relacionados (NASCIMENTO, Luis., 2008).

Este método consiste em produzir corpos de prova com densidades similares às das misturas compactadas em campo e determinar o volume de vazios, estabilidade e fluência Marshall. O controle nos parâmetros volumétricos visa exclusivamente garantir misturas asfálticas duráveis. A grande deficiência do método está na compactação por impacto, que acaba por não representar de maneira adequada o que se é observado em campo. Outro problema encontrado é devido à estabilidade Marshall, que também acaba por não representar o fenômeno ocorrente em campo (PINHEIRO, 2004).

A dosagem Marshall de misturas asfálticas tem como objetivo atender especificações como a estabilidade, fluência e parâmetros volumétricos. Acredita-se que a compactação por impacto realizada em laboratório não simula de forma adequada o que ocorre no pavimento em campo. Além disso, a prensa Marshall também não simula adequadamente através da estabilidade a resistência ao cisalhamento do CA (NASCIMENTO, Maria., 2011).

> No Brasil, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER ME 043/95) ainda é o mais utilizado, porém este sofreu algumas alterações, como a exclusão dos parâmetros estabilidade e fluência como pré-requisitos na dosagem das misturas. Atualmente o teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem Marshall para misturas a quente é determinado baseado em parâmetros volumétricos, geralmente volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV) (VASCONCELOS, 2004, p. 43).

2.4 Método Bailey

2.4.1 Considerações iniciais

O Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), que vem sendo usado e aprimorado desde a década de 1980. Vavrik et al. (2002) vem refinando o método, para que o mesmo se torne aplicável a qualquer mistura asfáltica, independente do tamanho máximo que os agregados apresentam.

O concreto asfáltico é um material cuja composição é realizada através de agregados com tamanhos distintos, diferentes tipos de ligantes e também quantidade de vazios, sendo o desempenho, em relação a trincas por fadiga, deformação permanente e desgaste, quando submetidos ao tráfego e as condições climáticas, dependentes das propriedades e proporções de cada um dos materiais que o constituem (CUNHA, 2004).

O agregado em um CA pode ser considerado como o esqueleto da mistura, pois ele é o responsável pela maior parte da resistência às cargas referentes ao tráfego. Suas propriedades estão relacionadas normalmente com a dureza, textura superficial, a forma e distribuição granulométrica (CUNHA, 2004).

O Método Bailey é uma forma de seleção granulométrica que se propõe a escolher uma composição de agregados de uma mistura asfáltica buscando um esqueleto mineral que leva em consideração curvas densas e descontínuas. A partir da graduação dos agregados, de suas massas específicas e da massa unitária solta e compactada, o método visa avaliar a seleção de uma distribuição granulométrica que busca um esqueleto “ideal”, assegurando a resistência à deformação permanente devido ao intertravamento dos agregados graúdos e a durabilidade pela maior quantidade de ligante devido a uma quantidade adequada de vazios (VAVRIK et al., 2002).

2.4.2 Arranjo de agregados

Os vazios presentes em uma mistura de agregados nunca serão preenchidos totalmente, estes dependem de alguns fatores (VAVRIK et al., 2002):

- Tipo e quantidade de energia de compactação: há diferenças entre as energias de compactação, podendo levar a uma maior ou menor compactação das misturas, além de ocorrer à distinção na quantidade de energia empregada.
- Forma das partículas: as misturas que apresentam agregados com formato cúbico tendem a apresentar e gerar misturas mais estáveis do que as que utilizam materiais mais lamelares em sua realização.
- Textura superficial das partículas: as partículas que apesentam superfície lisa tendem a se deslocar e mudar sua orientação mais facilmente do que as rugosas, que resistem mais ao deslizamento entre si.
- Distribuição das partículas: quando a mistura tiver sua composição por agregados de diferentes tamanhos, os vazios gerados pelo esqueleto de agregados graúdos poderão ser preenchidos por aqueles de menores tamanhos.
- Resistência das partículas: a degradação é um fator estritamente dependente da resistência dos agregados, sendo que esta ocorre desde a compactação e também durante a vida do pavimento, devido às cargas oriundas do tráfego.

Estas características podem ser utilizadas para definir e caracterizar os agregados graúdos e miúdos de uma mistura. Sendo que as características individuais de cada agregado, juntamente com a quantidade utilizada na mistura, tem um impacto elevado sobre as propriedades que irão resultar de determinada mistura asfáltica (VAVRIK et al., 2002).

2.4.3 Agregados graúdos e miúdos no método Bailey

No Método Bailey a definição de agregado graúdo e miúdo varia um pouco, sendo mais específica, de modo a determinar a compactação e o intertravamento do agregado através da combinação de diversos tamanho de agregados. De acordo com este as partículas que são consideradas graúdas são aquelas em que formam volume de vazios capazes de serem preenchidos por partículas de tamanhos menores. Desta forma, todos os agregados que preenchem os vazios deixados pelos graúdos são considerados agregados miúdos (VAVRIK et al., 2002).

A partir dessa definição, para o controle entre a divisão de agregado graúdo e miúdo será necessário mais que uma peneira, estas dependendo do diâmetro máximo nominal. O DMN é definido segundo a especificação SUPERPAVE como sendo a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% de material (CUNHA, 2004).

Segundo Vavrik et al. (2002), no Método Bailey, a peneira que define a divisão entre agregado graúdo e miúdo é denominada Peneira de Controle Primário (PCP), tendo como base o diâmetro máximo nominal da mistura, como observado na Figura 7. A PCP é aquela considerada como sendo a primeira peneira com o diâmetro de abertura de malha mais próximo do resultado encontrado a partir da Equação 1.

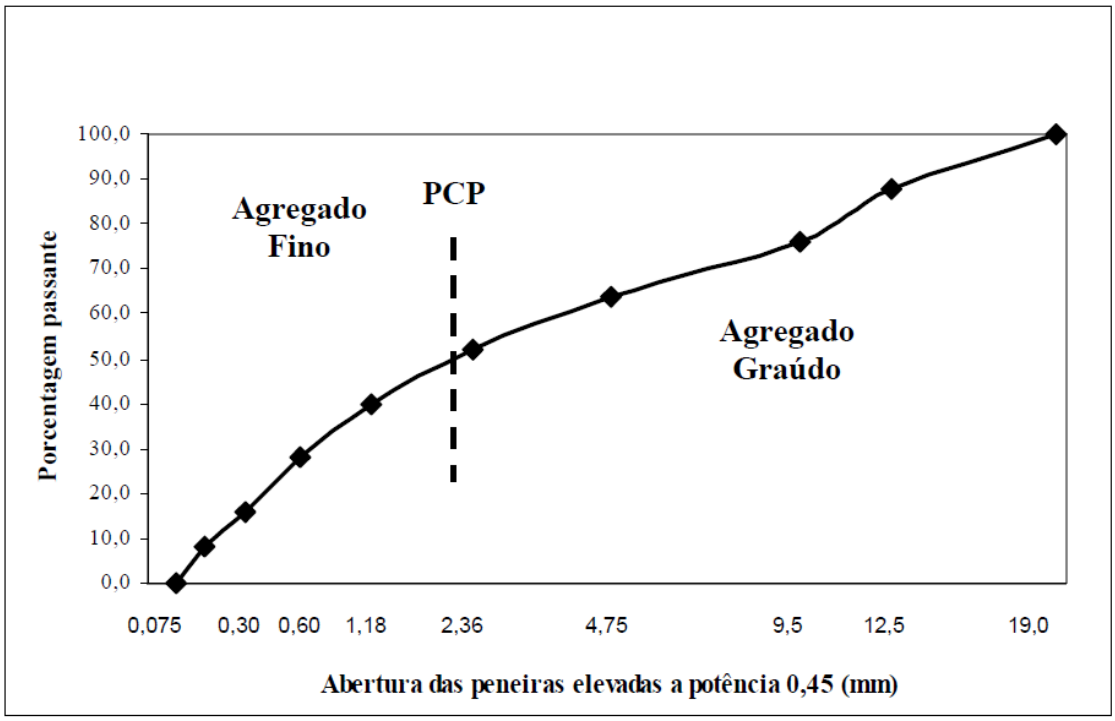
$$PCP = 0{,}22 \times DMN \tag{1}$$

Onde:

PCP = Peneira de Controle Primário

DMN = Diâmetro Máximo Nominal

Figura 7: Divisão realizada pela Peneira de Controle Primário (PCP)



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

2.4.4 Combinação volumétrica dos agregados

Misturas asfálticas apresentam volume de vazios que também são função das características de compactação destas. Na composição de uma mistura é possível identificar a quantidade de vazios deixados pelos agregados graúdos e acabar por preencher estes com agregados miúdos (VAVRIK et al., 2002).

A dosagem de misturas asfálticas é baseada em métodos volumétricos, que por simplificação são combinados em peso. A maioria dos métodos de dosagem faz a correção da porcentagem passante em peso pela porcentagem em volume, quando há uma diferença significativa entre a densidade dos materiais empregados. Para avaliar o grau de intertravamento de uma mistura, é necessário que uma mistura seja avaliada com base no seu volume (VAVRIK et al., 2002).

Para avaliar a combinação de agregados através do volume, algumas informações adicionais devem ser reunidas. Para as partículas graúdas da mistura deve ser obtida sua massa unitária compactada e solta e, para cada partícula miúda, apenas a massa compactada. 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 (VAVRIK et al., 2002).

2.4.5 Compactação de agregados

2.4.5.1 Massa unitária solta do agregado graúdo

A massa unitária solta é aquela que representa a quantidade de agregado necessária para preencher um determinado recipiente, sem qualquer esforço de compactação, representando a situação de menor contato entre as partículas. O volume deste recipiente varia de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura (VAVRIK et al., 2002).

Para determinação da massa unitária solta se faz uso da NBR NM 45:2006. A massa unitária é determinada dividindo-se o peso do recipiente preenchido pelo material pelo volume do recipiente. Já o volume de vazios para a condição solta é determinado através da massa unitária solta e da massa específica real dos grãos. A condição solta faz referência ao volume de vazios da

mistura quando as partículas dos agregados estão apenas em contato, sem haver uma solicitação de compactação.

2.4.5.2 Massa unitária compactada do agregado graúdo

A massa unitária compactada é aquela que representa a quantidade de agregado necessária para preencher um determinado recipiente, podendo variar o diâmetro nominal máximo. Através de um esforço de compactação acaba reduzindo o volume de vazios, aumentando assim, o contato entre as partículas (VAVRIK et al., 2002).

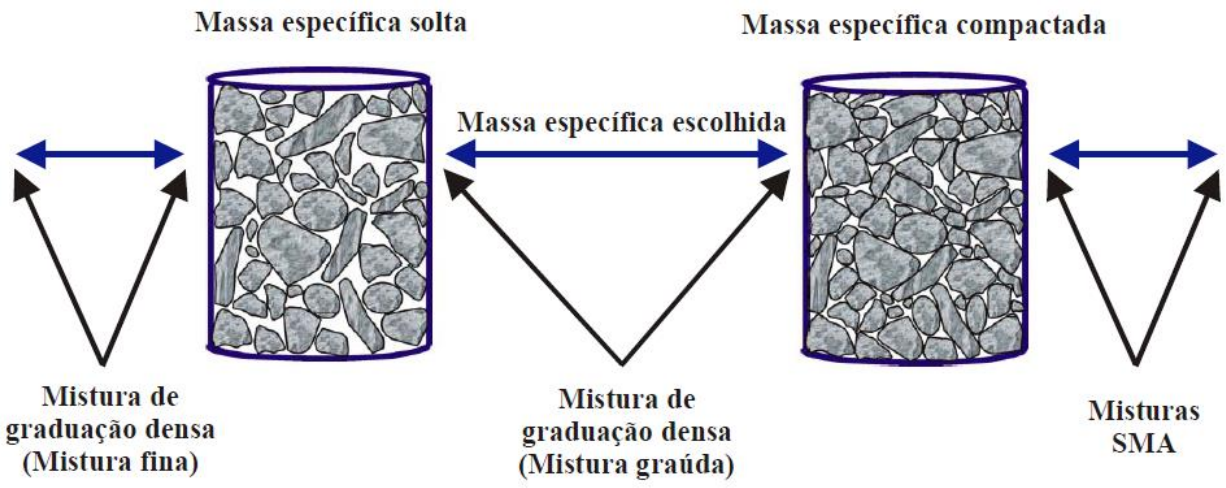
É necessária a determinação da massa unitária compactada para as frações graúdas e miúdas da mistura, conforme preconiza a NBR NM 45:2006. A massa unitária compactada é determinada através da divisão do peso do recipiente preenchido com material pelo volume do recipiente. Já o volume de vazios é encontrado através da massa unitária compactada e da massa específica real do agregado. Estes vazios são representados na condição de maior contato entre os agregados devido à compactação através de 25 golpes por uma haste, em três camadas distintas.

2.4.5.3 Escolha da massa específica do agregado graúdo

No Método Bailey é necessário fazer a escolha do grau de intertravamento do agregado graúdo desejado para a mistura, sendo este definido através da massa específica escolhida. A partir desta que são determinados o volume de agregados graúdos da mistura e seu grau de intertravamento (VAVRIK et al., 2002).

No referido método, é definido como graduação graúda aquela mistura em que o esqueleto estrutural se da pelas partículas graúdas do agregado. Já uma mistura de graduação fina não possui suficiente quantidade de agregados graúdos para que o esqueleto se forme, assim, o agregado miúdo é o responsável por resistir aos esforços aplicados sobre a mistura. O valor escolhido tem relação com a mistura desejada, conforme ilustra a Figura 8 (VAVRIK et al., 2002).

Figura 8: Seleção da massa específica escolhida para agregados graúdos



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

A massa unitária solta é a considerada como limite inferior do intertravamento do agregado graúdo. Seria a divisão entra uma mistura de graduação miúda com outra de graduação graúda. Se o valor escolhido for inferior ao limite, a mistura terá um esqueleto de agregados miúdos, assim, as propriedades deverão ser selecionadas de acordo com as características destes (VAVRIK et al., 2002).

Já a massa unitária compactada é considerada como o limite superior do intertravamento do agregado graúdo, sendo este para misturas com graduação densa. Este valor normalmente é adotado como sendo 110% da massa unitária solta. Não é aconselhável utilizar valores próximos aos da massa compactada, pois isso pode ocasionar em dificuldades de compactação em campo, exigindo maiores esforços de compactação para a obtenção da densidade desejada (VAVRIK et al., 2002).

Para misturas de graduação densa, é recomendado que os valores de massa escolhida fiquem entre 95% e 105% da massa unitária solta do agregado graúdo, para que ocorra um certo grau de intertravamento. Valores acima do limite superior devem ser evitados devido à dificuldade de compactação em campo e até para que não ocorram possíveis desagregações de agregados (VAVRIK et al., 2002).

Para massa específica escolhida com valor inferior a 90% da massa unitária solta, o esqueleto estrutural da mistura é controlado pelos agregados miúdos, originando uma mistura de graduação miúda. Já para graduação densa, não é recomendado que o valor obtido fique no intervalo entre 90% e 95%. Após a seleção da massa específica escolhida do agregado graúdo, é necessário determinar a quantidade de agregado miúdo que vai preencher os Vazios no Agregado Graúdo (VAG) (VAVRIK et al., 2002).

2.4.5.4 Massa unitária compactada do agregado miúdo

Em misturas densas, os vazios que são criados devido ao intertravamento dos agregados graúdos, função da massa específica escolhida, deverão ser preenchidos por um volume de agregados miúdos, que é determinado através da massa unitária compactada. Esta é utilizada para garantir que a estrutura de agregado miúdo tenha uma adequada resistência (VAVRIK et al., 2002).

É necessária a determinação da massa unitária compactada para as frações graúdas e miúdas da mistura, conforme preconiza a NBR NM 45:2006. A massa compactada é calculada dividindo-se o peso do recipiente preenchido com material pelo volume do recipiente. Para a compactação se utiliza uma haste onde são desferidos 25 golpes em três camadas distintas. Em uma mistura densa, esse valor é necessário para se fazer a determinação da quantidade de agregado miúdo que irá preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos, através da massa específica escolhida. Não há necessidade de seleção de massa específica para agregados miúdos, além disso, as massas soltas e compactadas não precisam ser encontradas para materiais de enchimento (fíleres).

2.4.6 Determinação de uma mistura asfáltica

Para a seleção granulométrica de misturas asfálticas, este método requer algumas informações adicionais das que usualmente são necessárias para a realização de misturas densas, sendo estas as massas unitárias dos agregados graúdos e miúdos. Para a composição de uma mistura são determinados os seguintes parâmetros (VAVRIK et al., 2002):

- Massa específica de cada agregado;
- Massa unitária solta dos agregados graúdos;

- Massa unitária compactada dos agregados graúdos e miúdos;
- Massa específica escolhida dos agregados graúdos;
- Quantidade que se deseja de agregados graúdos e miúdos na mistura;
- Quantidade de material desejado que passe na peneira de nº 200 (0,075 mm), sendo este o material de enchimento;

Para facilitar os cálculos e simular diferentes misturas, alterando-se os parâmetros, é interessante a elaboração de uma planilha eletrônica. O Método Bailey pode ser utilizado tanto para misturas de graduação graúda quanto para miúda. A seguir estão dispostos os passos que devem ser seguidos para a elaboração de uma mistura de agregados por volume (VAVRIK et al., 2002):

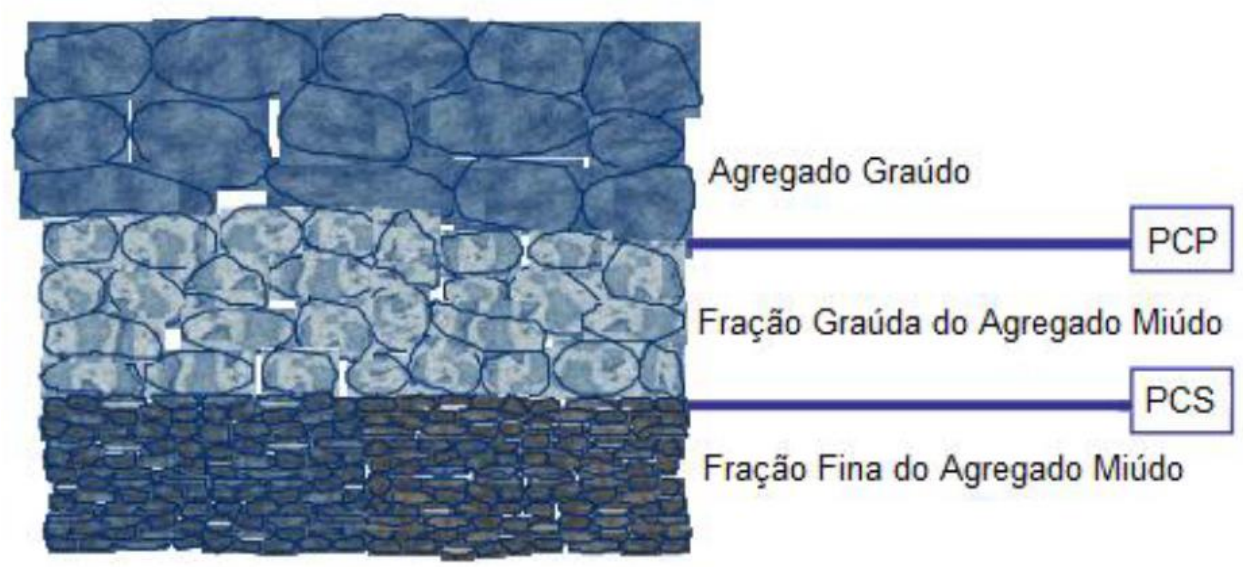
1. Determinar a massa específica escolhida dos agregados graúdos, em kg/m³.
2. Cálculo do volume de vazios dos agregados graúdos na massa específica escolhida.
3. Utilizando a massa unitária compactada dos agregados miúdos, em kg/m³, determinar a quantidade de agregados miúdos necessária para preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos;
4. Utilizando a densidade de cada agregado, determinar o peso total do conjunto e converter para porcentagens individuais na granulometria;
5. Corrigir a quantidade de agregado miúdo em função da quantidade de agregado graúdo presente na fração miúda e também corrigir a quantidade de agregado graúdo em função da quantidade de agregado miúdo que ele apresenta, para que seja garantida uma mistura adequada de agregados graúdos e miúdos;
6. Determinar as porcentagens da mistura ajustadas para cada agregado, em peso;
7. Se for realizada a utilização de materiais de enchimento (fíler), deve haver um ajuste na porcentagem de agregado miúdo em função da porcentagem desejada de agregados miúdos, para garantir uma mistura, em volume, de agregados graúdos e miúdos adequados;
8. Determinar as porcentagens revisadas de agregados, em peso, para fazer a utilização no cálculo da mistura final combinada.

2.4.7 Análise do cálculo da mistura

Após ser determinada a graduação da mistura, esta é dividida em três frações que podem ser avaliadas individualmente como ilustra a Figura 9. A fração graúda da mistura reúne desde a maior partícula até a PCP. Já o agregado miúdo é dividido e analisado em duas porções distintas. Esta divisão é realizada através da multiplicação da PCP pelo fator de 0,22, resultando na Peneira de Controle Secundário (PCS), que faz a distinção entre a fração graúda do agregado miúdo e a fração miúda deste agregado. A fração miúda do agregado miúdo é aquela que passa pela PCS (VAVRIK et al., 2002).

Existem ainda no Método Bailey outras peneiras de controle, sendo estas a Peneira Média (PM), que é a mais próxima da metade do DMN. A Peneira de Controle Terciário (PCT) é aquela que resulta da multiplicação da PCS pelo fator de 0,22 (VAVRIK et al., 2002).

Figura 9: Esquema de divisão de frações para análise de uma graduação contínua



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

Para realizar a avaliação do arranjo de agregados, são definidas três proporções: proporção de agregados graúdos (proporção AG), proporção graúda do agregado miúdo (proporção GAM) e proporção miúda do agregado miúdo (proporção MAM). A Tabela 1 apresenta as faixas recomendadas para cada proporção e a Tabela 2 apresenta uma lista com peneiras de controle para diferentes diâmetros máximos nominais (VAVRIK et al., 2002).

Tabela 1: Faixas recomendadas para as três proporções

	Diâmetro Máximo Nominal (DMN) em mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
Proporção AG	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
Proporção GAF	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50
Proporção FAF	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50

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

Tabela 2: Peneiras de controle para diferentes diâmetros máximos nominais (DMN)

	Diâmetro Máximo Nominal (DMN) em mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
PM	19,0	12,5	9,5	*	4,75	2,36
PCP	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,3
PCT	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	0,075

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

2.4.7.1 Proporção de agregados graúdos (proporção AG)

Esta proporção é utilizada para avaliar o arranjo dos agregados graúdos presentes nela e os vazios que acabam por serem gerados, sendo calculada de acordo com a Equação 2.

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\%\,passantena PM - \%\,passantena PCP)}{(100\% - \%\,passantena PM)} \qquad (2)$$

> O grau de compactação da fração de agregado graúdo, indicado pela Proporção AG, é o fator mais importante para a seleção da mistura. A diminuição da Proporção AG aumenta a compactação da fração de agregado fino, porque existem menos partículas que passam pela PM necessárias para limitar a compactação das partículas maiores de agregado graúdo (NASCIMENTO, L., 2008, p. 119).

Quando o valor da proporção AG se encontra abaixo dos valores encontrados na Tabela 1, as misturas resultantes podem apresentar maior susceptibilidade à segregação, além de ser necessária uma estrutura resistente de agregados miúdos para atender as especificações volumétricas que são solicitadas (MENDES, 2011).

Quando a proporção AG atinge valores próximos a 1,0, os vazios no agregado mineral (VAM) também aumentam com a tendência de as partículas passantes pela PM controlarem o esqueleto de agregados graúdos. Valores elevados de AG resultam em misturas com dificuldades de compactação pelo formato que se apresenta a sua distribuição granulométrica (MENDES, 2011).

2.4.7.2 Proporção graúda do agregado miúdo (proporção GAM)

A PCP é um delimitador entre a fração graúda do agregado miúdo e a fração miúda do agregado miúdo, podendo estas ser analisadas separadamente. A porção graúda deste acaba por formar vazios que serão preenchidos pela porção miúda (MENDES, 2011). A Equação 3 apresenta a fórmula com a qual é encontrada a proporção GAM.

$$\text{Proporção GAM} = \frac{(\%\, passante na PCS)}{(\%\, passante na PCP)} \tag{3}$$

Aumentando a proporção GAM, o agregado miúdo, abaixo da PCP, apresenta uma maior compactação, devido ao aumento do volume da porção miúda do agregado miúdo. O ideal é que o valor permaneça sempre abaixo de 0,50, pois valores mais elevados indicam um excesso de porção miúda do agregado. Quando acontece isso, se verifica num gráfico de potência 0,45 que as misturas se apresentam de maneira potencialmente fraca (VAVRIK et al., 2002).

Segundo Mendes (2011), valores inferiores aos encontrados na Tabela 1 resultam em distribuições não uniformes, indicando dificuldade de compactação em campo e certo grau de instabilidade. Tem influência direta sobre o VAM da mistura, visto que ocorrendo a redução o VAM terá um incremento em seu valor.

2.4.7.3 Proporção miúda do agregado miúdo (proporção MAM)

Esta proporção é a responsável por fazer o preenchimento dos vazios gerados pela proporção graúda do agregado miúdo, valendo a ressalva de que é necessário que haja certo volume de vazios para ser preenchido pelo ligante e ainda vazios para o bom desempenho da mistura. Além disso, a proporção indica como a porção miúda do agregado miúdo é compactada. A Equação 4 apresenta a fórmula com a qual é encontrada a proporção MAM (MENDES, 2011).

$$\text{Proporção MAM} = \frac{(\%\,passantena PCT)}{(\%\,passantena PCS)} \quad (4)$$

Para misturas densas seu valor deve ser inferior a 0,50, como é indicado na Tabela 1. Além disso, como acontece na proporção GAM, ocorrendo um decréscimo haverá acréscimo no VAM da mistura (MENDES, 2011).

2.4.7.4 Resumo dos conceitos de proporções

Conforme Cunha (2004), as proporções podem ser resumidas da seguinte maneira:

- Proporção AG (Agregados Graúdos): É esta que indica o comportamento da mistura quanto à compactação dos agregados graúdos e como a porção miúda se apresenta para preencher os vazios deixados pela porção maior;
- Proporão GAM (Graúda do Agregado Miúdo): É esta que indica o comportamento da mistura quanto à compactação da fração graúda dos agregados miúdos e como a porção miúda dos agregados miúdos se apresenta para preencher os vazios deixados pela porção graúda;
- Proporção MAM (Miúda do Agregado Miúdo): É esta que indica o comportamento da mistura quanto à compactação da fração miúda dos agregados miúdos e como os vazios deixados por esta fração serão preenchidos.

2.4.7.5 Recomendações de misturas pelo método Bailey

O Método Bailey apresenta quatro parâmetros (Massa Específica Escolhida, Proporção AG, Proporção GAM, Proporção MAM) que influenciam na determinação de uma mistura asfáltica. A partir disso, é recomendada a realização de três misturas modificando os parâmetros adotados inicialmente em uma mistura dosada pelo método (VAVRIK et al., 2002):

- Aumento de 5% na Massa Específica Escolhida (MEE): há um aumento na quantidade de agregado graúdo da mistura, aumentando o intertravamento entre estes e dificultando mais a compactação, devido ao aumento da resistência da mesma;
- Aumento de 0,2 na Proporção AG: misturas que apresentam proporção AG muito baixa são mais propensas à segregação e valores muito elevados para esta podem indicar desequilíbrio nas misturas;

- Redução de 0,05 na Proporção MAM: acaba influenciando diretamente as propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica.

2.4.8 Considerações finais

> O Método Bailey avalia ou melhora uma mistura existente, fazendo uma revisão da mistura através de seus procedimentos, visando definir uma faixa de trabalho aceitável para os agregados escolhidos. Existem várias misturas que não possuem um bom desempenho tanto na produção quanto na aplicação, enquanto outras são difíceis de reproduzir e/ou aplicar no campo. O Método Bailey determina uma massa específica escolhida aceitável, fatores de controle e suas faixas de trabalho, visando descobrir porque uma determinada mistura não possui um bom desempenho (CUNHA, 2004, p. 53).

O Método Bailey está ligado diretamente às características de compactação de cada fração de agregados presentes na mistura, com o VAM e com os vazios com ar. Ele permite a seleção de uma estrutura de agregados buscando o maior intertravamento entre as frações graúdas e, para a realização da dosagem, qualquer método existente pode ser utilizado, sendo os mais comuns o Marshall e o SUPERPAVE (NASCIMENTO, Luis., 2008).

Segundo Cunha (2004), misturas realizadas de acordo com o que preconiza o Método Bailey apresentam valores maiores de vazios no agregado mineral e de relação betume-vazios do que as realizadas de maneira convencional, o que é um indicativo de menor deformação permanente e maior resistência ao aparecimento de trincas por fadiga. Além disso, os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral apresentam resultados melhores, demonstrando os benefícios que o método busca.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste item serão apresentados os procedimentos laboratoriais realizados, necessários para a caracterização e a avaliação dos materiais estudados, bem como das misturas asfálticas elaboradas com estes. As análises de laboratório serão descritas de uma maneira resumida, sendo que os detalhes da realização se encontram nas normas que serão apresentadas em seus respectivos tópicos.

3.1 Estratégia de pesquisa

Esta pesquisa se classifica do ponto de vista da sua natureza como básica. De acordo com a forma da abordagem do problema esta se classifica como quantitativa. Conforme seus objetivos a pesquisa é experimental, tendo enfoque em procedimentos laboratoriais. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos a pesquisa é bibliográfica e experimental.

A classificação deve-se ao fato de que amostras foram coletadas em campo para posterior análise em laboratório. Os resultados encontrados a partir das avaliações serão analisados por meio de gráficos. Os métodos utilizados serão apresentados posteriormente.

3.2 Planejamento da pesquisa

Os materiais pétreos utilizados no estudo são provenientes da empresa Construbrás – Construtora de Obras Rodoviárias Ltda., com jazida localizada na cidade de São Luiz Gonzaga - RS. A cal utilizada é a dolomítica, que é de uso corrente no estado do Rio Grande do Sul, esta proveniente do munícipio de Caçapava do Sul. O CAP utilizado é proveniente da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), que se localiza na cidade de Canoas – RS.

Com todos os materiais já coletados e caracterizados, deu-se início a preparação de misturas asfálticas. As misturas foram definidas a partir de dois métodos distintos de seleção granulométrica, que são o método por tentativas e o Método Bailey. Após a definição e moldagem das mesmas, procedimentos mecânicos foram realizados para a avaliação de seus comportamentos perante diferentes parâmetros.

Depois de determinados os parâmetros referentes à dosagem Marshall, que foi a adotada para a execução dos corpos de prova, foram estudadas seis misturas asfálticas que serão discriminadas a seguir:

- REFERÊNCIA FAIXA B DNIT (REFB);
- REFERÊNCIA FAIXA C DNIT (REFC);
- MISTURA BAILEY FAIXA B DNIT – MEE 95% (MBB95);
- MISTURA BAILEY FAIXA B DNIT – MEE 105% (MBB105);
- MISTURA BAILEY FAIXA C DNIT – MEE 95% (MBC95);
- MISTURA BAILEY FAIXA C DNIT – MEE 105% (MBC105).

Os procedimentos laboratoriais adotados para avaliação das misturas foram os de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, utilizados para verificação do comportamento mecânico destas e, para a verificação da adesividade realizou-se o procedimento denominado de Desgaste Cantabro. A Tabela 3 deixa explícita a quantidade de corpos de prova que foram executados, assim como, a quantidade necessária para a realização de cada ensaio mecânico e de adesividade considerado.

Tabela 3: Número de corpos de prova

Ensaios/Misturas	REFB	REFC	MBB95	MBB105	MBC95	MBC105
Dosagem Marshall	15	15	15	15	15	15
Resistência à Tração	3	3	3	3	3	3
Módulo de Resiliência	3	3	3	3	3	3
Cantabro	3	3	3	3	3	3
TOTAL	24	24	24	24	24	24
TOTAL GERAL	144					

Fonte: Autoria própria

3.3 Materiais utilizados

3.3.1 Agregados pétreos

A coleta dos materiais é de importância fundamental para a representatividade dos ensaios, tomando-se a precaução para que os agregados da amostra coletada representem a sua natureza e condição em que se encontram. A amostra com a qual os ensaios serão realizados deve

ser formada por diversas amostras parciais, tomadas em vários pontos do lote, em quantidade suficiente para representar as características dos materiais (DNER-PRO 120, 1997).

Os agregados utilizados neste estudo foram: brita 1” proveniente da britagem com britador cônico e, brita 3/4”, brita 3/8” e pó de pedra provenientes da britagem com britador de impacto de eixo vertical (VSI). Estes agregados foram doados pela empresa Construbrás – Construtora de Obras Rodoviárias Ltda., com jazida localizada na cidade de São Luiz Gonzaga – RS. A Figura 10 demonstra os aspectos de cada material a ser utilizado nas misturas. Estes foram submetidos a procedimentos laboratoriais para caracterização no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UNIJUÍ.

Figura 10: Aspectos dos agregados pétreos

Fonte: Autoria própria

3.3.2 Cal

> As modificações produzidas pela adição de cal hidratada podem acrescentar anos à vida das misturas asfálticas. Essas modificações podem melhorar a adesividade ligante-agregado, reduzir a formação de afundamentos de trilhas de roda, bem como reduzir o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica (NÚÑEZ et al., 2007 apud BUDNY, 2009, p. 24).

Segundo Budny (2009), a adição de cal hidratada em misturas asfálticas apresenta um conjunto de benefícios, em especial o de obter como resultado produtos superiores e de elevado desempenho. Todos os benefícios apresentados por esta trabalham complementando-se, visando e contribuindo para melhorias do produto final resultante da mistura.

Um dos fatores a ser considerado na incorporação de cal é a maneira que esta é adicionada a uma mistura. De acordo com estudos realizados por Bock (2009), a melhor forma de incorporar a cal em uma mistura asfáltica é misturando-a com os agregados graúdos secos utilizados, pois se constatou uma melhora nas propriedades coeso-adesivas quando assim realizado.

A cal incorporada nas misturas asfálticas deste estudo é a cal hidratada dolomítica de classe II da marca FIDA, proveniente do município de Caçapava do Sul - RS, que é de uso corrente no estado. A Figura 11 ilustra a aparência física deste material.

Figura 11: Aparência da cal

Fonte: Autoria própria

3.3.3 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50/70 que é produzido na Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), sendo localizada na cidade de Canoas – RS. Este CAP é

normalmente o mais utilizado em obras de pavimentação do estado do Rio Grande do Sul e do Brasil.

3.4 Misturas realizadas

Para a elaboração das seis misturas asfálticas propostas pelo presente estudo, todos os materiais foram dispostos conjuntamente nas mesmas, porém em proporções distintas. Como foram utilizados dois métodos diferentes para a seleção granulométrica, as proporções encontradas variaram bastante de um para outro, sendo estas discriminadas na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Proporções dos materiais em cada mistura

Misturas/Materiais	Brita 1	Brita 3/4	Brita 3/8	Pó de Pedra	Cal hidratada dolomítica CII
REFB	10,0%	24,0%	14,0%	50,5%	1,5%
REFC	1,5%	11,0%	35,5%	50,5%	1,5%
MBB95	21,4%	22,7%	18,1%	36,7%	1,1%
MBB105	23,2%	24,6%	19,7%	31,5%	1,0%
MBC95	12,2%	19,6%	34,7%	30,8%	2,7%
MBC105	13,3%	21,3%	37,6%	25,6%	2,2%

Fonte: Autoria própria

Por tratar-se de seleções granulométricas de misturas asfálticas por dois métodos distintos, buscou-se utilizar a proporção de cal dolomítica classe II igual para ambos, porém, o que se verifica é que nas misturas obtidas através do Método Bailey a proporção de cal varia bastante. Este fato ocorre devido ao método em questão obter as misturas a partir de porcentagens de cada material inicialmente escolhidas, que para a cal foi o mesmo valor utilizado de 1,5% como nas misturas realizadas pelo método por tentativas. A partir dos valores adotados inicialmente, o Método Bailey realiza ponderações devido às considerações do mesmo, assim, as porcentagens encontradas acabaram por modificar-se em relação a que foi adotada.

3.5 Procedimentos laboratoriais utilizados

3.5.1 Análise granulométrica

Misturas asfálticas são compostas por materiais que apresentam diferentes tamanhos de grãos e proporções. Para suas composições é necessário que se tenha todas as curvas granulométricas dos constituintes, estas sendo definidas a partir de procedimentos laboratoriais.

Neste estudo a análise granulométrica dos agregados e da cal utilizados foi realizada de acordo com o que preconiza a norma DNER – ME 080/94 (Solos – análise granulométrica por peneiramento). Foi adotado o peneiramento manual de todos os materiais envolvidos, garantindo assim a não discrepância de dados das amostras.

Com a análise realizada, misturas asfálticas foram elaboradas com os materiais descritos previamente. Estas se enquadraram totalmente ou parcialmente nas faixas de trabalho determinadas pela norma DNIT - ES 031/2006 (Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço). As faixas escolhidas foram a B e a C, onde também constam as peneiras adotadas para realização da granulometria, conforme explícito na Tabela 5.

Tabela 5: Faixas e peneiras adotadas para análise

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
N° 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT – ES 031 (2006)

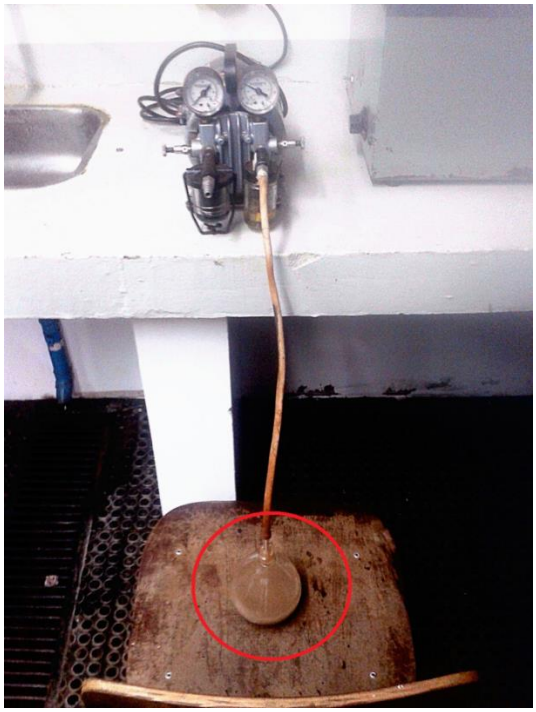
3.5.2 Massas específicas e absorção dos materiais

As massas específicas dos materiais e a absorção são dados importantes necessários para as misturas asfálticas, pois estes influenciam na massa específica das mesmas, influenciando consequentemente na quantidade de ligante asfáltico utilizado (PASCHE, 2013). Estes ensaios foram realizados para os agregados pétreos utilizados e para a cal dolomítica.

A massa específica é a relação entre a massa e o volume do material. Destaca-se a importância da obtenção da densidade real (Dr), da densidade aparente (Da) e da densidade efetiva (Def), sendo para a última a necessidade do conhecimento da absorção do material, pois sua determinação dependerá da absorção ser maior ou menor que 2%. A absorção (A) é a quantidade de água que o material absorve quando imerso. Outro fato importante para a verificação dos valores é de que a Dr deve ser maior que a Def e esta, maior que a Da.

Para a obtenção das massas específicas dos agregados graúdos e da absorção foi utilizada a norma DNER – ME 081/98 (Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo). Já para os agregados miúdos a norma utilizada foi a DNER – ME 084/95 (Agregado miúdo – determinação da densidade real). Para a determinação da massa específica da cal, a normativa utilizada foi a NBR NM 23:2000 (Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica). A Figura 12 demonstra a realização do procedimento para obtenção da densidade real do pó de pedra, que é um agregado miúdo, com auxílio de um picnômetro.

Figura 12: Obtenção da densidade real do pó de pedra com auxílio de um picnômetro



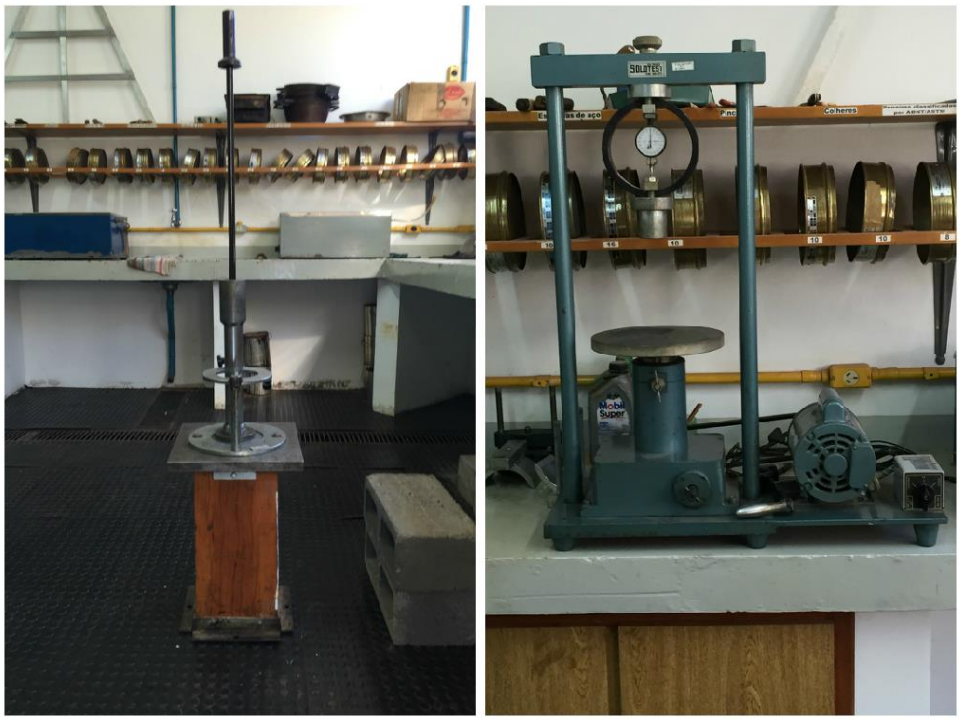
Fonte: Autoria própria

3.5.3 Dosagem Marshall

Os procedimentos realizados para a dosagem Marshall seguiram-se conforme especificados na norma DNER – ME 043/95 (Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall). A Figura 13 ilustra o soquete Marshall utilizado para as compactações dos corpos de prova e a prensa Marshall onde os mesmos são ensaiados para obtenção de suas estabilidades e fluência.

> Em síntese, a moldagem dos corpos de prova decorrerá da seguinte forma: Se aquece os agregados até que atinjam a temperatura de mistura, quando atingir, misturam-se os agregados com ligante asfáltico, este sendo previamente aquecido na temperatura da mistura. Feito isso, a mistura é colocada em uma estufa calibrada na temperatura de compactação, onde repousará por 2 horas. Após moldam-se os de corpos de prova (CP´s) por compactação a quente, dentro de moldes cilíndricos metálicos. Depois os CP´s ficam ao ar livre durante 24 horas, após esse período são desmoldados, medidos e pesados. Na prensa, rompem-se os CP´s e se obtêm os valores mecânicos de estabilidade e fluência, que são necessários para verificar se as misturas estão dentro dos parâmetros exigidos pelo DNIT e para verificar o teor de ligante das misturas (PASCHE, 2013, p. 39).

Figura 13: Soquete Marshall sobre base de compactação e prensa Marshall



Fonte: Autoria própria

3.5.4 Resistência à tração por compressão diametral

Este método de ensaio é utilizado para a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, através da compressão diametral. Para este estudo, os procedimentos adotados estão descritos na norma DNIT – ME 136/2010 (Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio).

O corpo de prova que será submetido ao ensaio poderá ser obtido diretamente no campo por extração com sonda rotativa ou moldado em laboratório (Marshall). Ele terá formato cilíndrico, com altura variando entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de 10 ± 0,2 cm. Para execução do ensaio devem ser tomadas as medidas do corpo de prova, após isso os mesmos são condicionados a temperatura de 25ºC, ficando em repouso por duas horas e, por fim, estes são rompidos na prensa Marshall e anota-se o valor da carga de ruptura (DNIT – ME 136, 2010). A Figura 14 demonstra um corpo de prova moldado pela metodologia Marshall sendo rompido na prensa.

Figura 14: Rompimento de corpo de prova na prensa Marshall

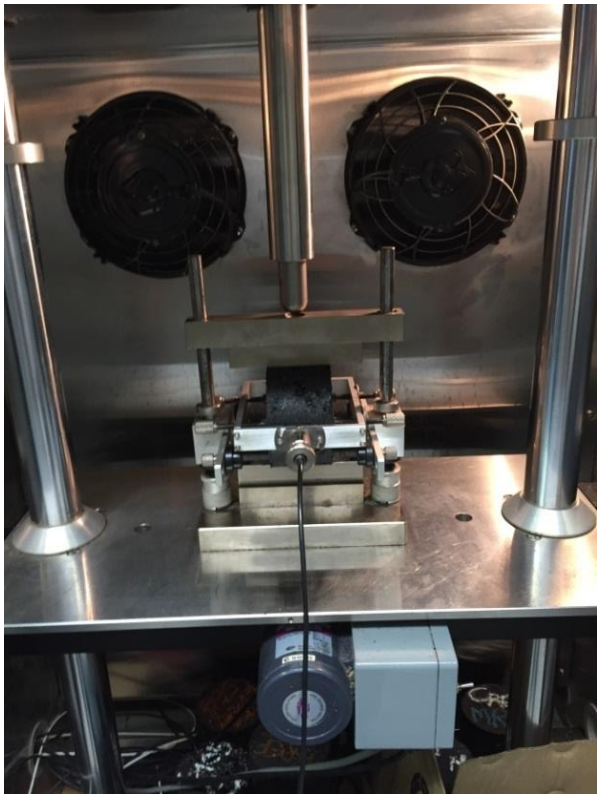
Fonte: Autoria própria

3.5.5 Módulo de resiliência

Este método visa determinar o módulo de resiliência de misturas asfálticas, a uma temperatura de 25ºC, utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida. Neste estudo os procedimentos adotados para a determinação são preconizados pela norma DNIT – ME 135/2010 (Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio). As amostras submetidas ao ensaio foram obtidas da mesma maneira que para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, citado anteriormente.

Segundo a norma DNIT – ME 135 (2010), o módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração aplicada de maneira repetida no plano diametral vertical da amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável, referente à tensão aplicada. A prensa onde se realiza o ensaio normalmente aplica uma força vertical pulsante no corpo de prova. A Figura 15 ilustra um corpo de prova posicionado no equipamento de compressão diametral de carga repetida para realização do ensaio.

Figura 15: Corpo de prova posicionado na prensa de compressão diametral de carga repetida



Fonte: Autoria própria

3.5.6 Perda de massa – desgaste Cantabro

Devido ao grande tráfego que os revestimentos estão submetidos, uma propriedade importante para se analisar em misturas asfálticas é a resistência à desagregação decorrente do atrito pneu-pavimento. Para a realização do ensaio foram adotados os procedimentos preconizados na norma DNER – ME 383/99 (Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro).

O procedimento adotado para obtenção do desgaste de uma mistura basicamente se resume a pesagem do corpo de prova após este ser moldado através da metodologia Marshall, depois disso ele é submetido a 300 revoluções no tambor da máquina Los Angeles e, por fim, pesa-se o corpo de prova após a submissão no tambor. A diferença encontrada entre as pesagens resulta no desgaste da mistura. Para a realização do ensaio foram utilizados 3 corpos de prova para cada mistura asfáltica. Na Figura 16 se pode observar o tambor da máquina Los Angeles.

Figura 16: Tambor da máquina Los Angeles

Fonte: Autoria própria

3.5.7 Método Bailey

Para a seleção da composição granulométrica das misturas asfálticas realizadas pelo método Bailey foi necessária à execução de um ensaio complementar, além dos usualmente utilizados para a seleção através do método por tentativas. O ensaio necessário é preconizado pela NBR NM 45:2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios). Este consiste basicamente na obtenção da massa unitária solta e compactada dos agregados que foram utilizados e, também, do volume de vazios dos mesmos sob essas condições. A Figura 17 ilustra a realização do ensaio para obtenção da massa unitária compactada de um agregado utilizado.

Figura 17: Compactação realizada para obtenção da massa unitária compactada

Fonte: Autoria própria

Foram realizadas quatro misturas asfálticas através da seleção granulométrica por este método. O que indica que a partir de uma primeira mistura realizada é importante que sejam alterados três parâmetros utilizados, porém, o único parâmetro que foi alterado é o da massa específica escolhida. Duas das misturas foram efetuadas para a faixa B do DNIT e outras duas

para a faixa C. Para cada faixa obteve-se uma mistura com MEE de 95% e outra de 105%. A moldagem foi executada com o que preconiza a metodologia Marshall.

Em seu trabalho, Cunha (2004) demonstra em anexo um roteiro para os cálculos a serem realizados para a seleção granulométrica de misturas asfálticas através do Método Bailey. O autor utiliza para isso dois tipos de agregados graúdos, um agregado miúdo e um material de enchimento.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos laboratoriais realizados para os materiais utilizados e para as misturas asfálticas elaboradas. Os procedimentos adotados para caracterizar os materiais e avaliar as misturas, assim como a execução destes, seguem prescrições das normas brasileiras citadas anteriormente no capítulo 3.

4.1 Caracterização dos materiais

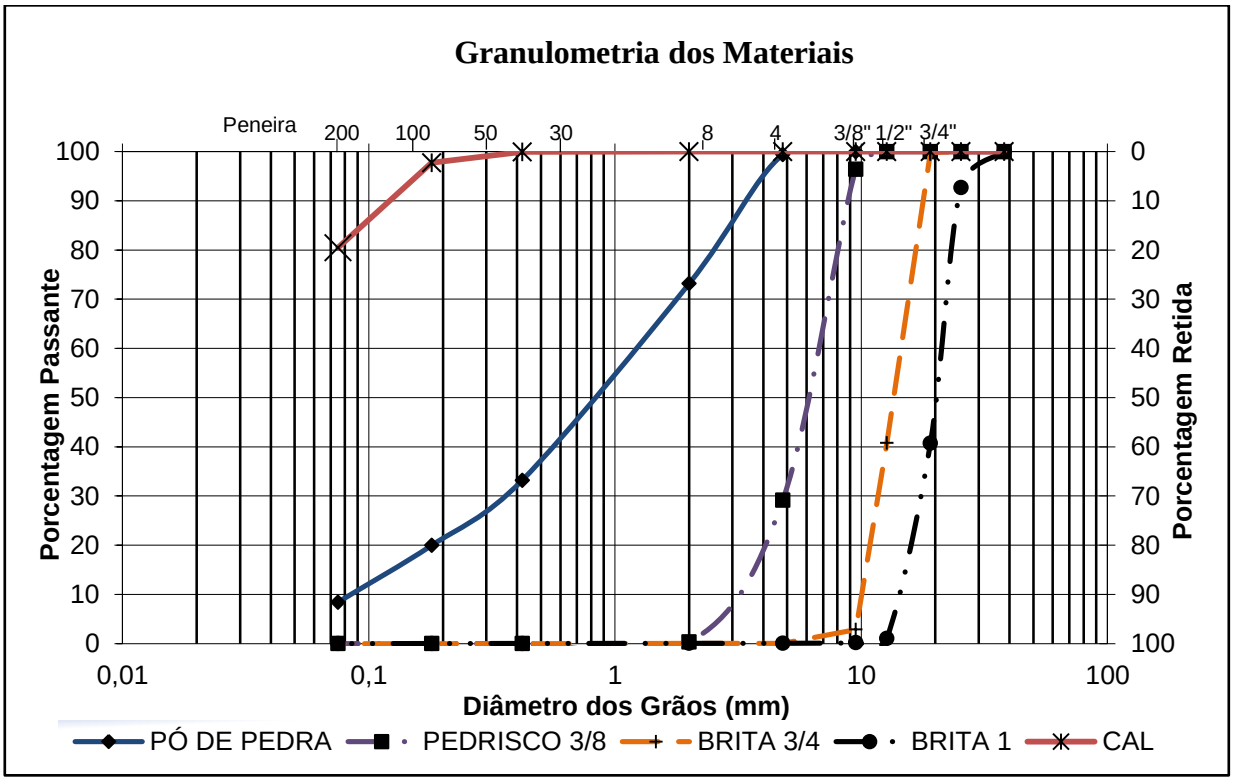
4.1.1 Análise granulométrica

Segundo a metodologia descrita, as malhas das peneiras utilizadas na dosagem seguiram a especificação da norma DNIT – ES 031/2006 (Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço). Para a execução, seguiu-se o procedimento preconizado pela norma DNER – ME 080/94 (Solos – análise granulométrica por peneiramento), que cita que a granulometria dos materiais deve ser realizada através de um procedimento com lavagem, fazendo com que seja eliminado o pó existente entre as partículas de agregados maiores e, garantindo, desta maneira, uma maior aderência ao ligante asfáltico. O peneiramento da cal procedeu-se de maneira seca, pois não se aplica o método de lavagem, devido ao material ser muito fino, acabando por passar quase que em sua totalidade pela peneira nº 200 (0,075 mm).

Após a realização do peneiramento da brita 1”, brita 3/4”, brita 3/8”, pó de pedra e da cal, tratou-se de analisar a curva granulométrica apresentada por estes. A Figura 18 apresenta as características encontradas para cada um dos materiais, evidenciando que os mesmos diferem quanto a sua graduação. A brita 1” caracteriza-se como um material graúdo, tendo distribuição uniforme, com suas partículas retidas entre as malhas das peneiras com abertura de 25,4 mm a 12,7 mm. A brita 3/4” e a brita 3/8” também apresentam partículas graúdas e distribuição uniforme, porém o que as diferem da brita anterior é que estas ficam retidas entre as malhas de abertura 19,1 mm a 9,5 mm e 9,5 mm a 2,0 mm, respectivamente. O pó de pedra apresenta granulometria miúda, tendo uma graduação contínua e suas partículas ficando distribuídas entre uma gama maior de peneiras, sendo este material totalmente passante na de malha com abertura de 9,5 mm, passando a ficar retido a partir da abertura de 4,8 mm. É importante ressaltar que a granulometria sofreu pequenas alterações nas peneiras de aberturas 0,18 mm e 0,075 mm,

reduzindo-se do valor encontrado 13,06% e 50% de material passante, respectivamente, para melhor adequar as misturas realizadas nas faixas do DNIT consideradas. Essa redução ocorreu, pelo fato de que o objetivo do estudo é avaliar as misturas asfálticas elaboradas e, não prioritariamente o material, assim, para se conseguir uma quantidade considerada ideal de material passante na peneira nº 200, optou-se por tal procedimento. A cal, de todos os materiais utilizados, é o mais fino, caracterizando-se como um material de enchimento, pois apresenta porcentagem passante na peneira de abertura 0,075 mm superior a 65%, tendo a distribuição de partículas uniforme.

Figura 18: Distribuição granulométrica dos materiais



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Densidade e absorção dos materiais e misturas

Para a realização dos ensaios foram adotados procedimentos distintos devido ao tamanho das partículas de cada material. Para as misturas elaboradas, os valores encontrados derivam de ponderações realizadas através das proporções de cada um dos materiais. É importante ressaltar que a densidade aparente e a absorção das misturas foram obtidas através dos valores encontrados

para os agregados graúdos. Na Tabela 6 estão explicitados os valores encontrados para cada material, bem como o procedimento adotado e na Tabela 7 encontram-se os valores referentes às diferentes misturas.

Tabela 6: Densidades e absorção dos materiais

Procedimentos	**Agregados Graúdos - DNER - ME 081/98**			**Agregados Miúdos - DNER - ME 084/95**	**Materiais em Pó - NBR NM 23:2000**
Materiais	**Brita 1"**	**Brita 3/4"**	**Brita 3/8"**	**Pó de Pedra**	**Cal**
Densidade Real	2,930	2,946	2,918	2,947	2,483
Densidade Aparente	2,901	2,927	2,883	-	-
Densidade Efetiva	2,915	2,936	2,901	-	-
Absorção	0,98%	0,65%	1,19%	-	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 7: Densidades e absorção das misturas

Misturas	**REFB**	**REFC**	**MBB95**	**MBB105**	**MBC95**	**MBC105**
Densidade Real	2,933	2,933	2,932	2,931	2,922	2,923
Densidade Aparente	2,919	2,917	2,914	2,913	2,900	2,900
Densidade Efetiva	2,926	2,925	2,923	2,922	2,911	2,912
Absorção	0,81%	0,81%	0,86%	0,86%	0,93%	0,93%

Fonte: Autoria própria

4.1.3 Massas unitárias e vazios dos materiais

Para a realização dos ensaios onde se encontram as massas unitárias soltas e compactadas dos materiais, bem como os vazios destes, utilizou-se o procedimento preconizado pela norma NBR NM 45:2006. Para os agregados graúdos foi necessário encontrar, tanto a massa unitária solta, quanto à compactada e, para os agregados miúdos, apenas a massa unitária compactada. A compactação para encontrar a massa compactada deu-se em três camadas distintas, onde, com auxilio de uma haste, disferiu-se 25 golpes em cada uma. Para a condição solta, o material apenas foi inserido no recipiente até o mesmo encher, sem a necessidade de compacta-lo, apenas o rasando para ficar nivelado com a superfície. A Figura 19 demonstra o recipiente utilizado para realização dos procedimentos e na Tabela 8 estão explicitados os valores encontrados para cada material.

Figura 19: Recipiente utilizado para obtenção das massas unitárias

Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Massas unitárias e volume de vazios dos materiais

Materiais	Brita 1"	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra	Cal
Massa Unitária Solta (kg/m³)	1449,07	1580,32	1569,55	-	-
Massa Unitária Compactada (kg/m³)	1606,57	1679,25	1677,04	2055,06	2095,73
Volume de Vazios Solta (%)	50,54	46,35	46,21	-	-
Volume de Vazios Compactada (%)	45,17	42,99	42,52	30,29	-

Fonte: Autoria própria

4.2 Misturas realizadas

Com os materiais já caracterizados, o passo seguinte foi a realização das misturas asfálticas propostas pelo presente estudo. Estas foram elaboradas para as faixas B e C do DNIT, destinadas à camada de rolamento, conforme especificadas na norma DNIT – ES 031/2006. Foram propostas seis diferentes misturas, que serão discriminadas a seguir.

4.2.1 Mistura referência faixa B (REFB)

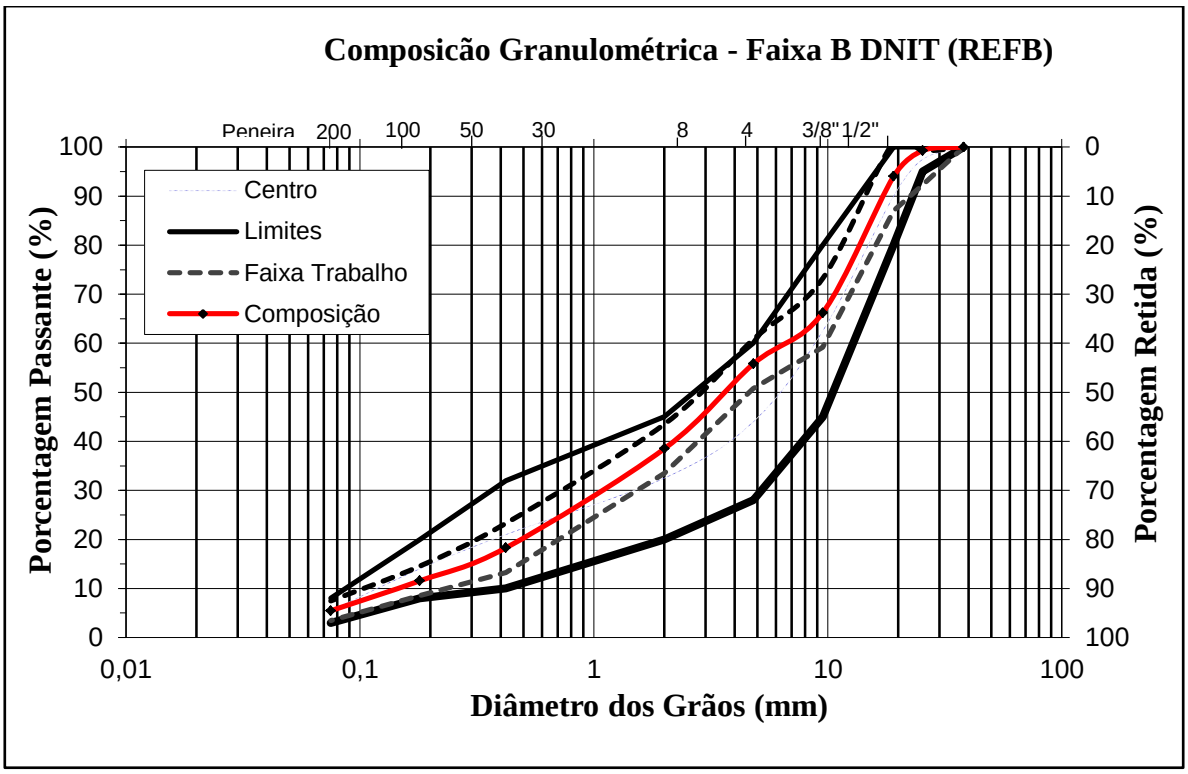
Esta mistura foi realizada a partir do método de seleção granulométrica por tentativas, o qual objetivou enquadra-la, por meio de tentativas, o mais próximo possível do centro da faixa B do DNIT. A mistura em questão tem a função de ser a base para a comparação de resultados referentes às misturas elaboradas para esta faixa. A Tabela 9 demonstra a proporção de cada material utilizado e a mistura gerada e, a Figura 20 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa B.

Tabela 9: Porcentagens dos materiais na mistura referência B

COMPOSIÇÃO DA MISTURA REFERÊNCIA B (REFB)							
% mistura		**10,0%**	**24,0%**	**14,0%**	**50,5%**	**1,5%**	**100%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**MISTURA**
1 1/2"	**38,1**	10,0	24,0	14,0	50,5	1,5	**100,0**
1	**25,4**	9,3	24,0	14,0	50,5	1,5	**99,3**
3/4"	**19,1**	4,1	23,9	14,0	50,5	1,5	**94,0**
3/8"	**9,5**	0,0	0,7	13,5	50,5	1,5	**66,2**
n 4	**4,8**	0,0	0,0	4,1	50,2	1,5	**55,8**
n 10	**2**	0,0	0,0	0,0	37,0	1,5	**38,5**
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	16,8	1,5	**18,3**
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	10,1	1,5	**11,6**
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	4,3	1,2	**5,5**
frações		**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%		10%	24%	14%	50,5%	1,5%	100%

Fonte: Autoria própria

Figura 20: Enquadramento da mistura na faixa B



Fonte: Autoria própria

4.2.2 Mistura referência faixa C (REFC)

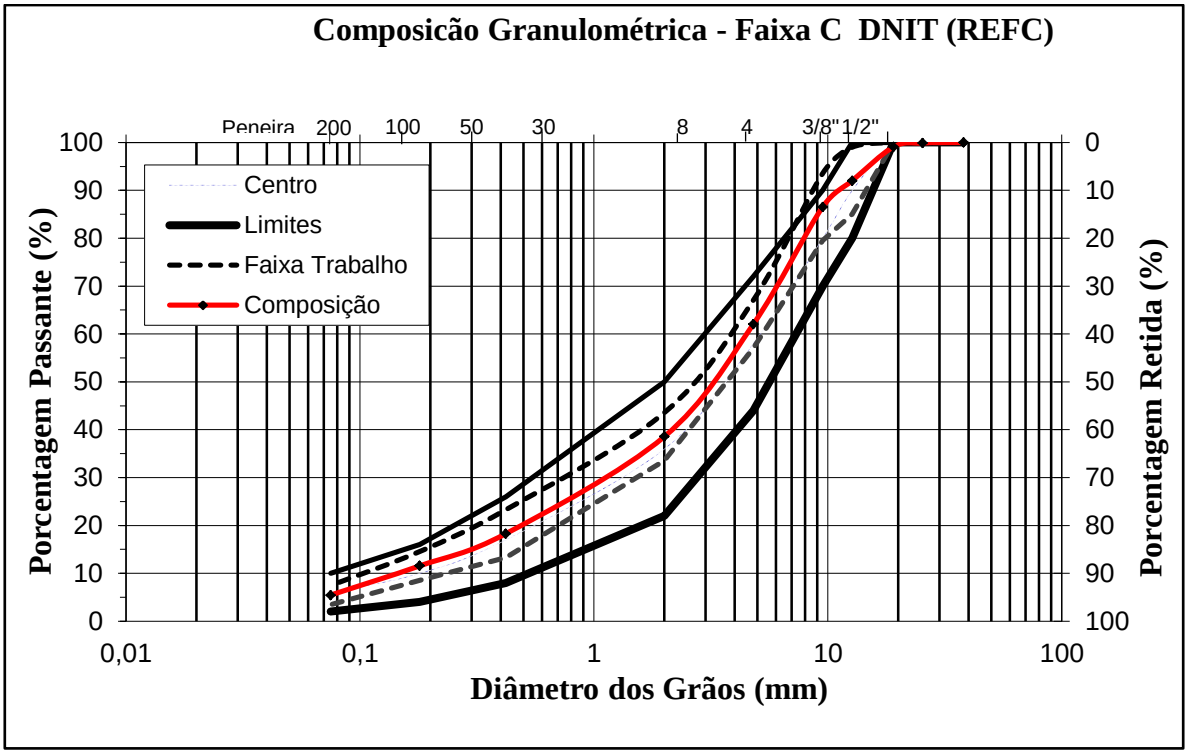
Esta mistura foi realizada a partir do método de seleção granulométrica por tentativas, o qual objetivou enquadra-la, por meio de tentativas, o mais próximo possível do centro da faixa C do DNIT. A mistura em questão tem a função de ser a base para a comparação de resultados referentes às misturas elaboradas para esta faixa. A Tabela 10 demonstra a proporção de cada material utilizado e a mistura gerada e, a Figura 21 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa C.

Tabela 10: Porcentagens dos materiais na mistura referência C

COMPOSIÇÃO DA MISTURA REFERÊNCIA C (REFC)							
% mistura		1,5%	11,0%	35,5%	50,5%	1,5%	100%
PENEIRA	mm	BRITA 1	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ DE PEDRA	CAL	MISTURA
1 1/2	38,1	1,5	11,0	35,5	50,5	1,5	100,0
1	25,4	1,4	11,0	35,5	50,5	1,5	99,9
3/4"	19,1	0,6	11,0	35,5	50,5	1,5	99,1
1/2"	12,7	0,0	4,5	35,5	50,5	1,5	92,0
3/8"	9,5	0,0	0,3	34,2	50,5	1,5	86,5
n 4	4,8	0,0	0,0	10,3	50,2	1,5	62,0
n 10	2	0,0	0,0	0,1	37,0	1,5	38,6
n 40	0,42	0,0	0,0	0,0	16,8	1,5	18,3
n 80	0,18	0,0	0,0	0,0	10,1	1,5	11,6
n 200	0,075	0,0	0,0	0,0	4,3	1,2	5,5
frações		BRITA 1	BRITA 3/4	PEDRISCO 3/8	PÓ DE PEDRA	CAL	TOTAL
%		1,5%	11,0%	35,5%	50,5%	1,50%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Figura 21: Enquadramento da mistura na faixa C



Fonte: Autoria própria

4.2.3 Mistura Bailey com MEE de 95% faixa B (MBB95)

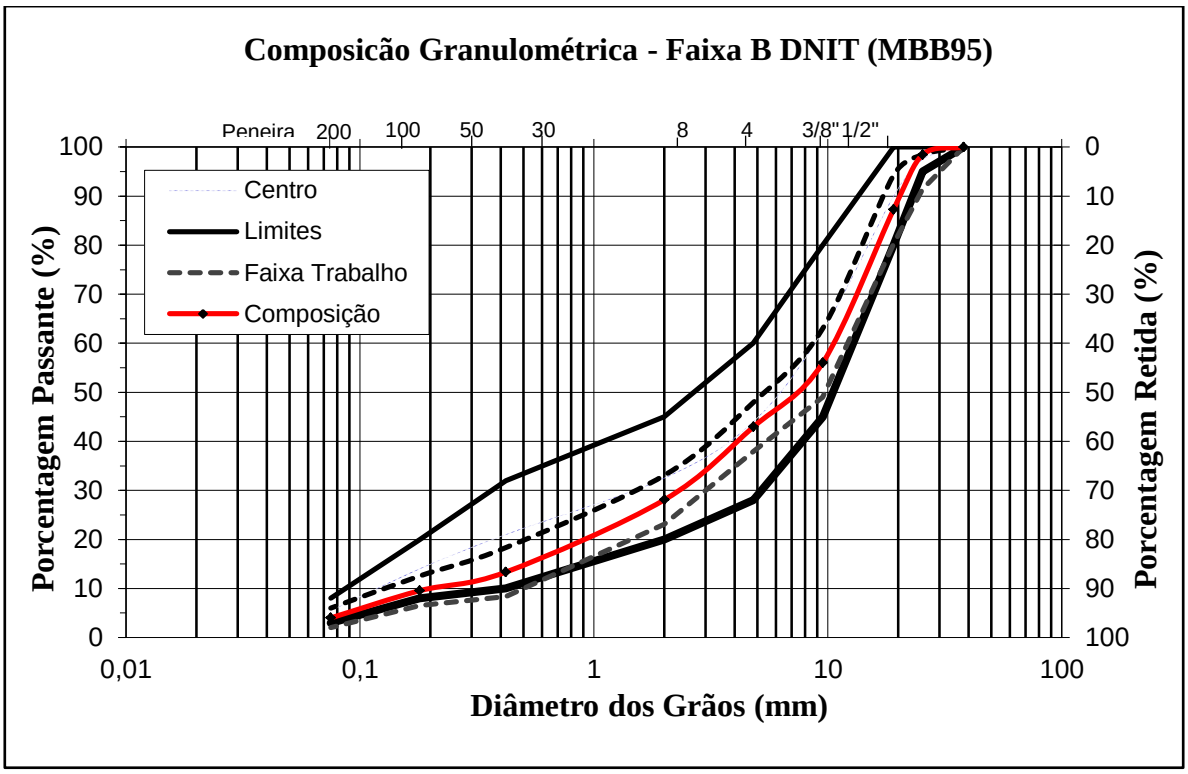
A mistura em questão foi realizada a partir do Método Bailey de seleção granulométrica. Este visa escolher, inicialmente, a porcentagem de cada material que se deseja na mistura, a partir disso, e através de suas ponderações, chega-se a mistura final ajustada. As porcentagens iniciais adotadas visaram o enquadramento da mistura na faixa B do DNIT. Sua denominação deu-se devido à massa específica escolhida dos agregados graúdos ser de 95%. A Tabela 11 demonstra a proporção de cada material ajustado e a mistura gerada e, a Figura 22 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa B.

Tabela 11: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 95% (MBB95)

COMPOSIÇÃO DA MISTURA BAILEY COM MEE DE 95% (MBB95)							
% mistura		**21,4%**	**22,7%**	**18,1%**	**36,7%**	**1,1%**	**100%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**MISTURA**
1 1/2"	**38,1**	21,4	22,7	18,1	36,7	1,1	**100,0**
1	**25,4**	19,8	22,7	18,1	36,7	1,1	**98,4**
3/4"	**19,1**	8,7	22,6	18,1	36,7	1,1	**87,3**
3/8"	**9,5**	0,0	0,6	17,4	36,7	1,1	**56,0**
n 4	**4,8**	0,0	0,0	5,3	36,5	1,1	**42,9**
n 10	**2**	0,0	0,0	0,1	26,9	1,1	**28,1**
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	12,2	1,1	**13,3**
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	8,4	1,1	**9,6**
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	3,1	0,9	**4,0**
frações		**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%		21,4%	22,7%	18,1%	36,7%	1,1%	100%

Fonte: Autoria própria

Figura 22: Posição da mistura MBB95 em relação aos limites da faixa B



Fonte: Autoria própria

4.2.4 Mistura Bailey com MEE de 105% faixa B (MBB105)

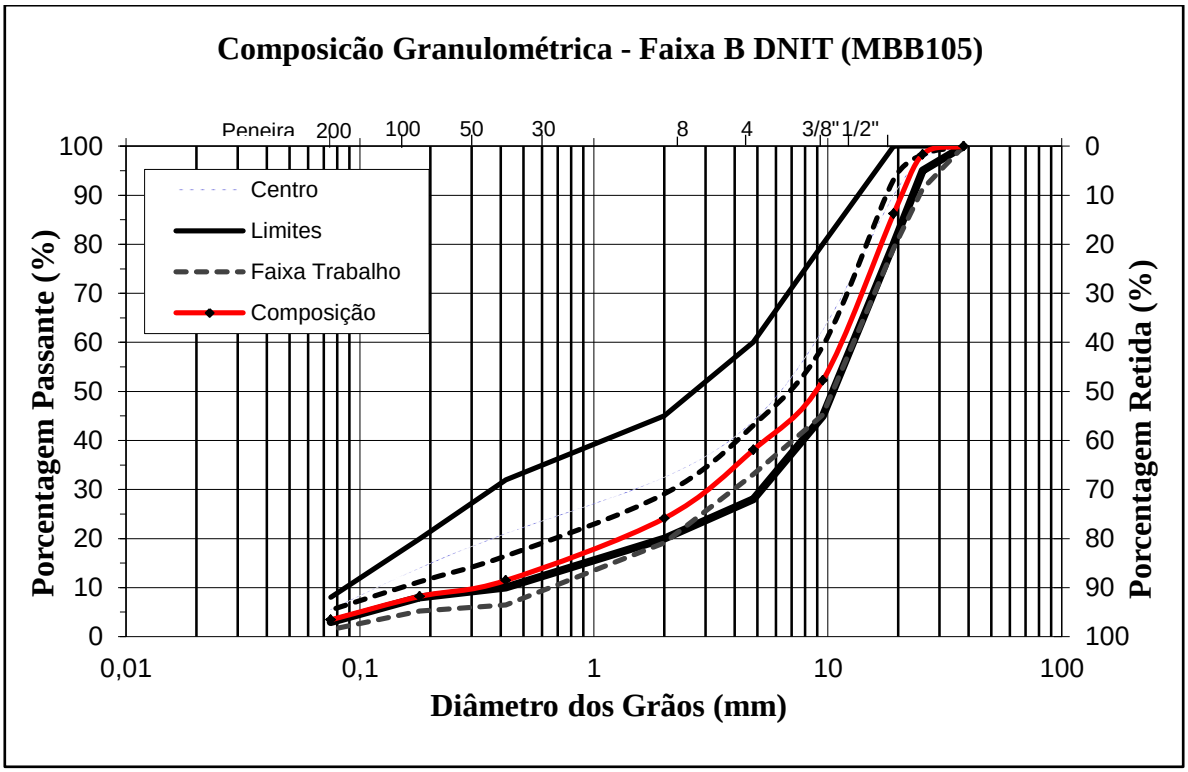
A mistura em questão foi realizada a partir do Método Bailey de seleção granulométrica. A mesma se assemelha muito a anterior, o que as difere, apenas, é a massa específica escolhida dos agregados graúdos, que para esta foi de 105%. A Tabela 12 demonstra a proporção de cada material ajustado e a mistura gerada e, a Figura 23 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa B.

Tabela 12: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 105% (MBB105)

COMPOSIÇÃO DA MISTURA BAILEY COM MEE DE 105% (MBB105)							
% mistura		**23,2%**	**24,6%**	**19,6%**	**31,5%**	**1,0%**	**100%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**MISTURA**
1 1/2"	**38,1**	23,2	24,6	19,6	31,5	1,0	**100,0**
1	**25,4**	21,5	24,6	19,6	31,5	1,0	**98,3**
3/4"	**19,1**	9,5	24,6	19,6	31,5	1,0	**86,2**
3/8"	**9,5**	0,0	0,7	18,9	31,5	1,0	**52,2**
n 4	**4,8**	0,0	0,0	5,7	31,3	1,0	**38,1**
n 10	**2**	0,0	0,0	0,1	23,1	1,0	**24,1**
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	10,5	1,0	**11,5**
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	7,2	0,9	**8,2**
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	2,7	0,8	**3,4**
frações		**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%		23,2%	24,6%	19,6%	31,5%	1,0%	100%

Fonte: Autoria própria

Figura 23: Posição da mistura MBB105 em relação aos limites da faixa B



Fonte: Autoria própria

4.2.5 Mistura Bailey com MEE de 95% faixa C (MBC95)

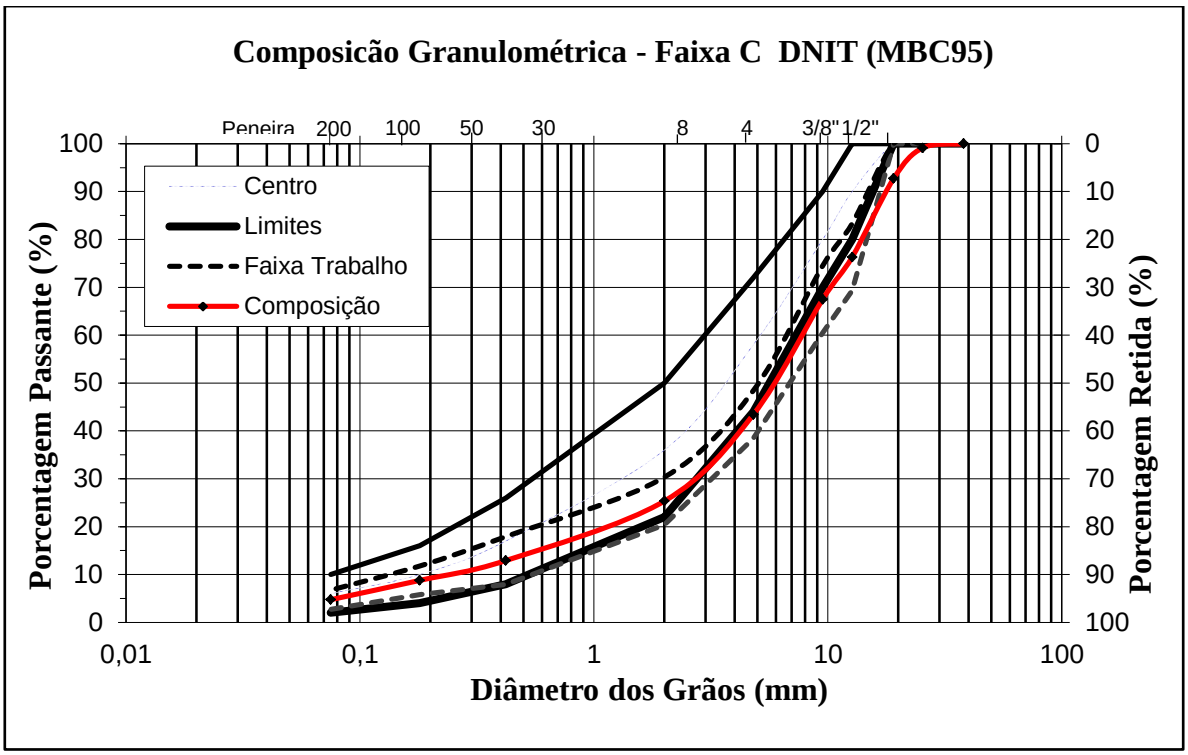
Esta mistura foi realizada a partir do Método Bailey de seleção granulométrica. O principio utilizado para a elaboração da mistura é o mesmo já citado, porém, a porcentagem inicial de cada material varia em relação às misturas anteriores e, também, a faixa do DNIT considerada. Para esta, as porcentagens adotadas inicialmente visaram o enquadramento da mistura na faixa C. A massa específica escolhida para os agregados graúdos foi de 95%. A Tabela 13 demonstra a proporção de cada material ajustado e a mistura gerada e, a Figura 24 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa C.

Tabela 13: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 95% (MBC95)

COMPOSIÇÃO DA MISTURA BAILEY COM MEE DE 95% (MBC95)							
% mistura		**12,2%**	**19,6%**	**34,7%**	**30,8%**	**2,7%**	**100%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**MISTURA**
1 1/2	**38,1**	12,2	19,6	34,7	30,8	2,7	**100,0**
1	**25,4**	11,3	19,6	34,7	30,8	2,7	**99,1**
3/4"	**19,1**	5,0	19,6	34,7	30,8	2,7	**92,7**
1/2"	**12,7**	0,1	8,0	34,7	30,8	2,7	**76,3**
3/8"	**9,5**	0,0	0,6	33,4	30,8	2,7	**67,5**
n 4	**4,8**	0,0	0,0	10,1	30,6	2,7	**43,4**
n 10	**2**	0,0	0,0	0,1	22,5	2,7	**25,3**
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	10,2	2,7	**12,9**
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	6,2	2,6	**8,8**
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	2,6	2,2	**4,8**
frações		**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%		12,2%	19,6%	34,7%	30,8%	2,7%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Figura 24: Posição da mistura MBC95 em relação aos limites da faixa C



Fonte: Autoria própria

4.2.6 Mistura Bailey com MEE de 105% faixa C (MBC105)

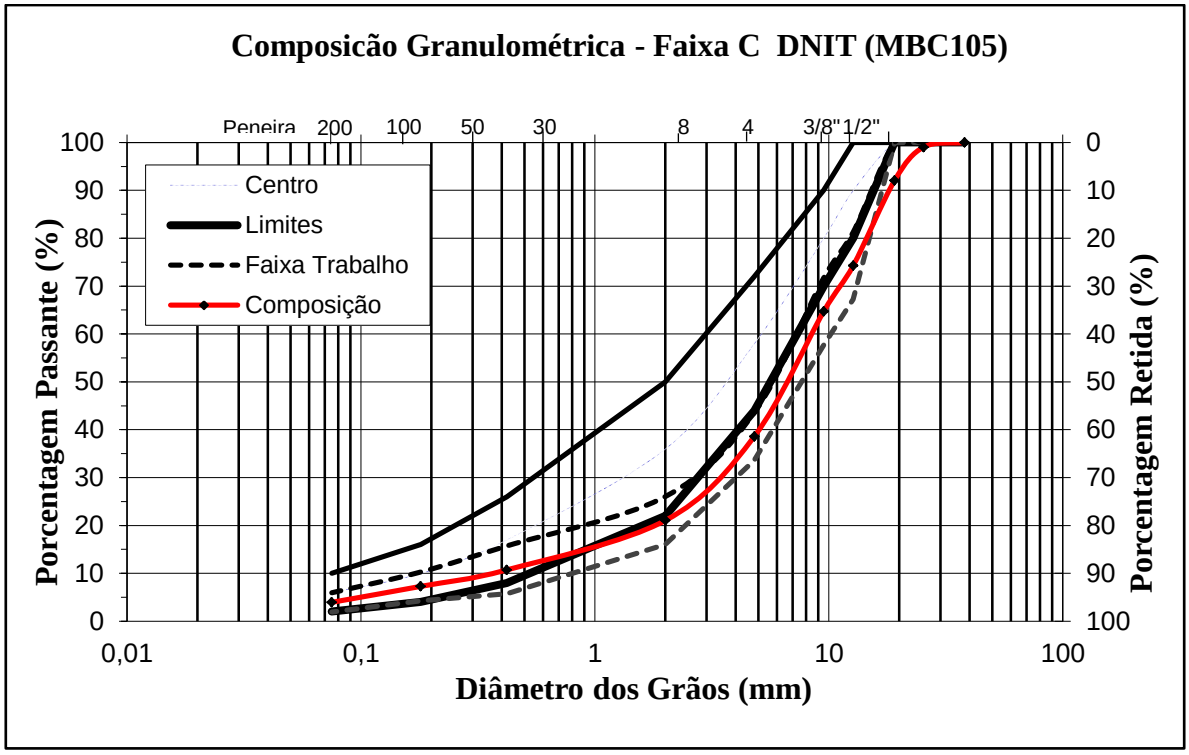
A mistura em questão foi realizada a partir do Método Bailey de seleção granulométrica. A mesma se assemelha muito a anterior, o que as difere, apenas, é a massa específica escolhida dos agregados graúdos, que para esta foi de 105%. A Tabela 14 demonstra a proporção de cada material ajustado e a mistura gerada e, a Figura 25 deixa evidente a posição desta em relação aos limites estipulados pela faixa C.

Tabela 14: Porcentagens dos materiais na mistura Bailey com MEE de 105% (MBC105)

COMPOSIÇÃO DA MISTURA BAILEY COM MEE DE 105% (MBC105)							
% mistura		**13,3%**	**21,3%**	**37,6%**	**25,6%**	**2,2%**	**100%**
PENEIRA	**mm**	**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**MISTURA**
1 1/2	**38,1**	13,3	21,3	37,6	25,6	2,2	**100,0**
1	**25,4**	12,3	21,3	37,6	25,6	2,2	**99,0**
3/4"	**19,1**	5,4	21,3	37,6	25,6	2,2	**92,1**
1/2"	**12,7**	0,1	8,7	37,6	25,6	2,2	**74,3**
3/8"	**9,5**	0,0	0,6	36,3	25,6	2,2	**64,7**
n 4	**4,8**	0,0	0,0	11,0	25,4	2,2	**38,6**
n 10	**2**	0,0	0,0	0,1	18,7	2,2	**21,0**
n 40	**0,42**	0,0	0,0	0,0	8,5	2,2	**10,7**
n 80	**0,18**	0,0	0,0	0,0	5,1	2,2	**7,3**
n 200	**0,075**	0,0	0,0	0,0	2,2	1,8	**3,9**
frações		**BRITA 1**	**BRITA 3/4**	**PEDRISCO 3/8**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**TOTAL**
%		13,3%	21,3%	37,6%	25,6%	2,2%	100,0%

Fonte: Autoria própria

Figura 25: Posição da mistura MBC105 em relação aos limites da faixa C



Fonte: Autoria própria

4.3 Caracterização das misturas asfálticas

4.3.1 Teor de ligante das misturas

O teor de ligante de projeto das misturas foi encontrado a partir do valor de volume de vazios fixo em 4%. Para obter este teor, moldaram-se 15 corpos de prova para cada mistura com teores distintos variando de 3,5% a 5,5%, sendo que para cada um foram utilizados três CP's. A partir disso, verificou-se o volume de vazios encontrado para cada teor e, então, através de interpolação de valores, chegou-se ao teor de ligante de projeto utilizado para cada mistura. Ressaltando que o teor obtido é referente à dosagem e não extraído dos corpos de prova após a moldagem. Na Tabela 15 estão explicitados os teores encontrados para cada mistura e estes, convertidos em peso, que foi a quantidade adicionada de CAP 50/70 em cada corpo de prova para os demais procedimentos avaliativos adotados.

Tabela 15: Teor de ligante de projeto das misturas

MISTURAS	REFB	REFC	MBB95	MBB105	MBC95	MBC105
Teor de Ligante (%)	4,53	4,70	3,88	3,83	4,25	4,00
Peso (g)	56,90	59,20	48,40	47,80	53,30	50,00
Passante nº 200 (%)	5,50	5,50	4,00	3,40	4,80	3,90

Fonte: Autoria própria

Com todos os valores discriminados, pode-se perceber que as misturas realizadas a partir do método de seleção granulométrica por tentativas obtiveram um teor de ligante superior às misturas elaboradas pelo Método Bailey. Isso se deve ao fato de que as misturas obtidas pelo método de tentativas apresentaram uma maior quantidade de finos, assim, estes acabam por absorver uma maior quantidade de CAP, resultando em um teor mais elevado.

Tratando-se particularmente das misturas elaboradas pelo Método Bailey, percebe-se que as misturas onde à massa específica escolhida foi de 95% obtiveram um teor de ligante superior as de 105%. Isso se deve ao fato de que as misturas com 95% de MEE apresentam uma quantidade maior de finos, assim, absorvendo uma maior quantidade de ligante.

Em relação à mistura tomada como referência para a faixa B, a mistura MBB95 apresentou redução de 14,35% no teor ligante e a mistura MBB105 apresentou redução de

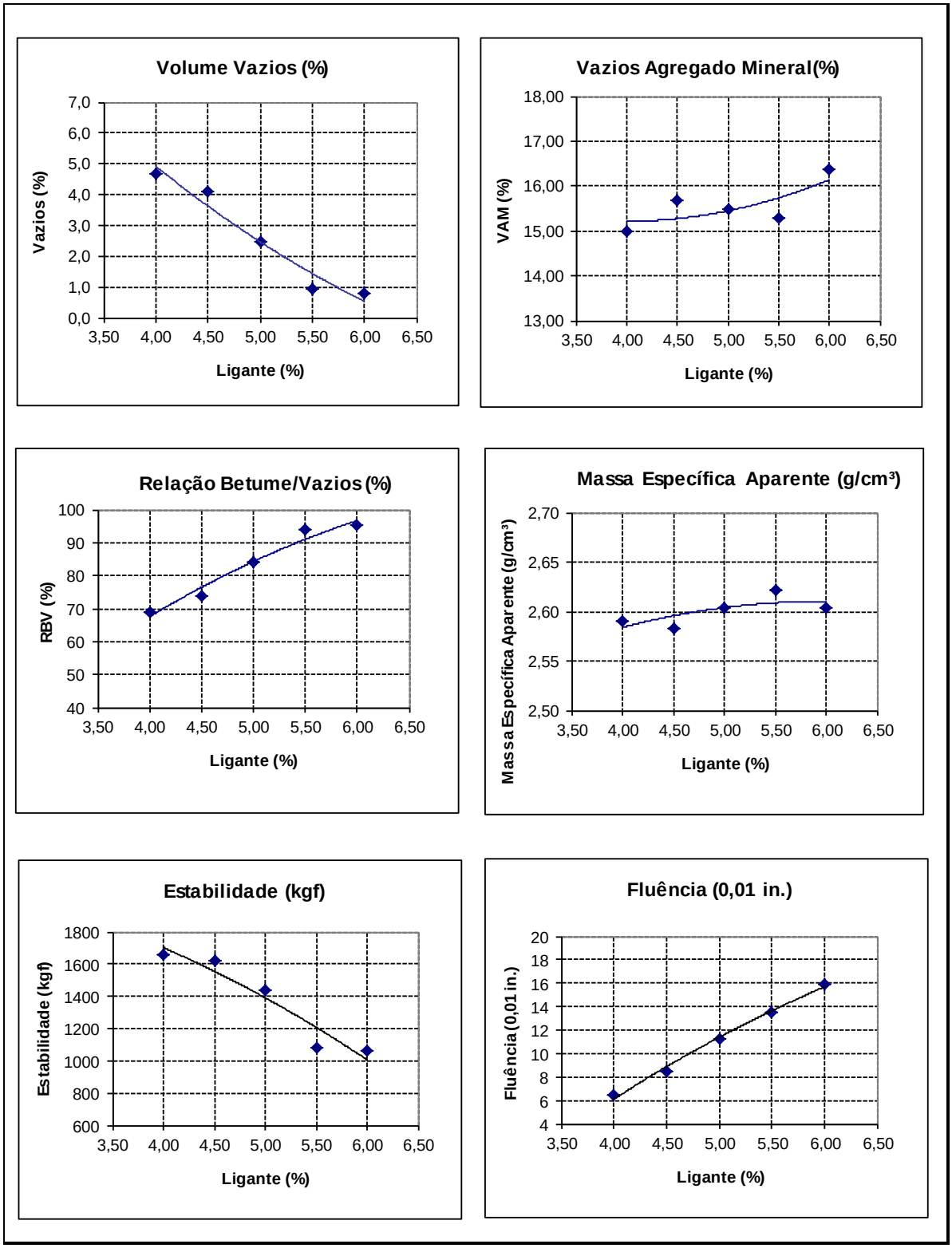
15,45%. Já se comparando as misturas MBB95 e MBB105, a redução no teor de ligante foi da ordem de 1,29%. Para a mistura tomada como referência da faixa C, a mistura MBC95 apresentou redução de 9,57% no teor de ligante e a mistura MBC105 apresentou redução de 14,89%. Fazendo a comparação entre as misturas MBC95 e MBC105, a redução no teor de ligante foi da ordem de 5,88%.

4.3.2 Dosagem Marshall

Conforme Budny (2009), a dosagem Marshall busca misturas que apresentam máxima massa específica aparente possível, garantindo, assim, máxima estabilidade; fluência entre certos limites, garantindo flexibilidade à mistura; volume de vazios entre determinados limites, garantindo a não ocorrência de oxidação da massa asfáltica devido às ações da água e/ou ar, colaborando também para que não ocorra exsudação e, relação betume vazios entre determinados limites, garantindo a existência suficiente de ligante para união dos agregados e para a não ocorrência de exsudação.

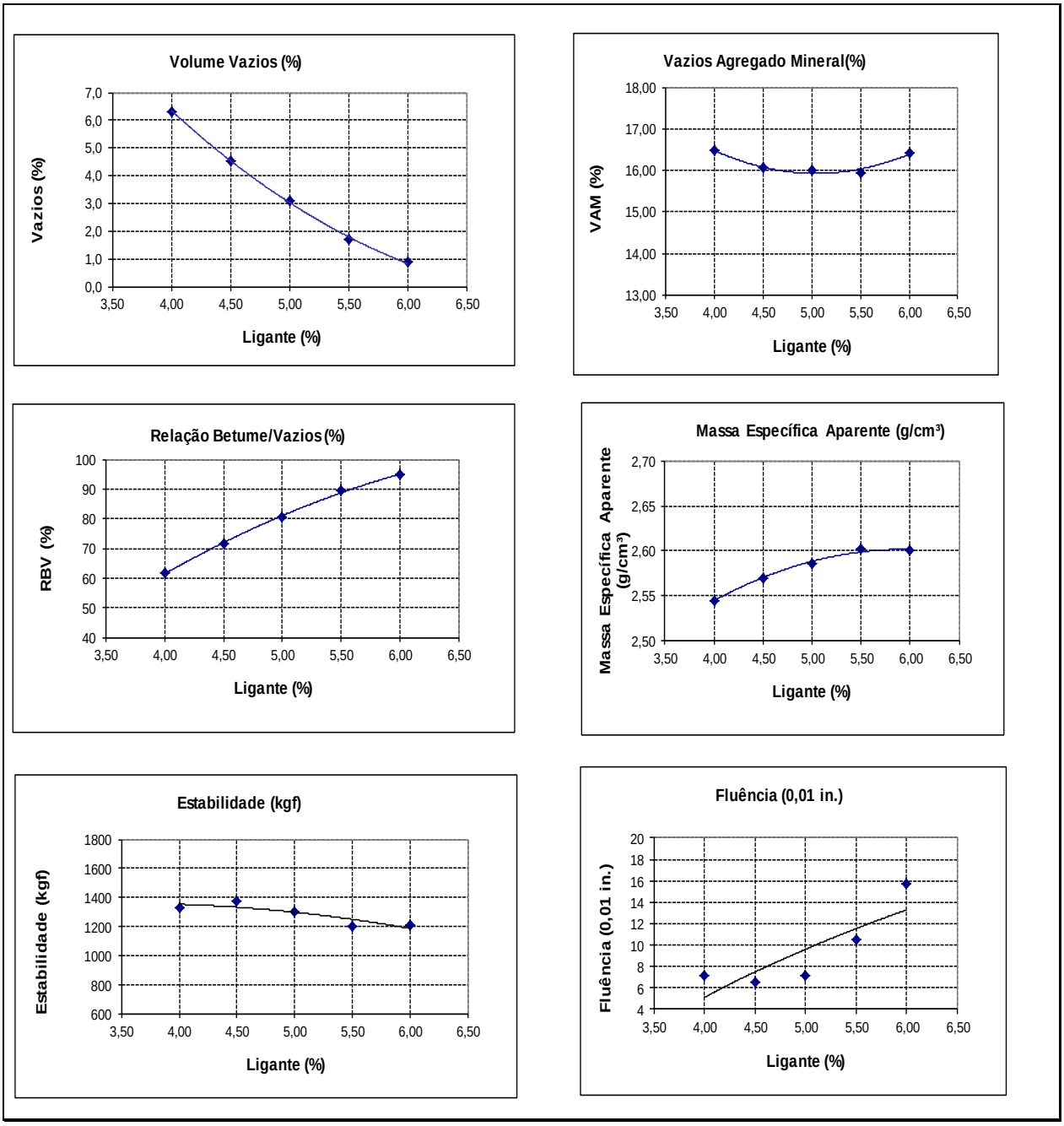
Para encontrar os parâmetros da dosagem Marshall foram utilizados três corpos de prova de cada mistura, referentes aos teores de ligante adotados, que variaram de 3,5% a 5,5%, totalizando, assim, 15 corpos de prova para cada mistura. As Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 apresentam as curvas de cada um dos parâmetros considerados pela dosagem em questão e, na Tabela 16 estes estão explicitados de maneira resumida, considerando o volume de vazios fixo em 4%.

Figura 26: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Referência Faixa B (REFB)



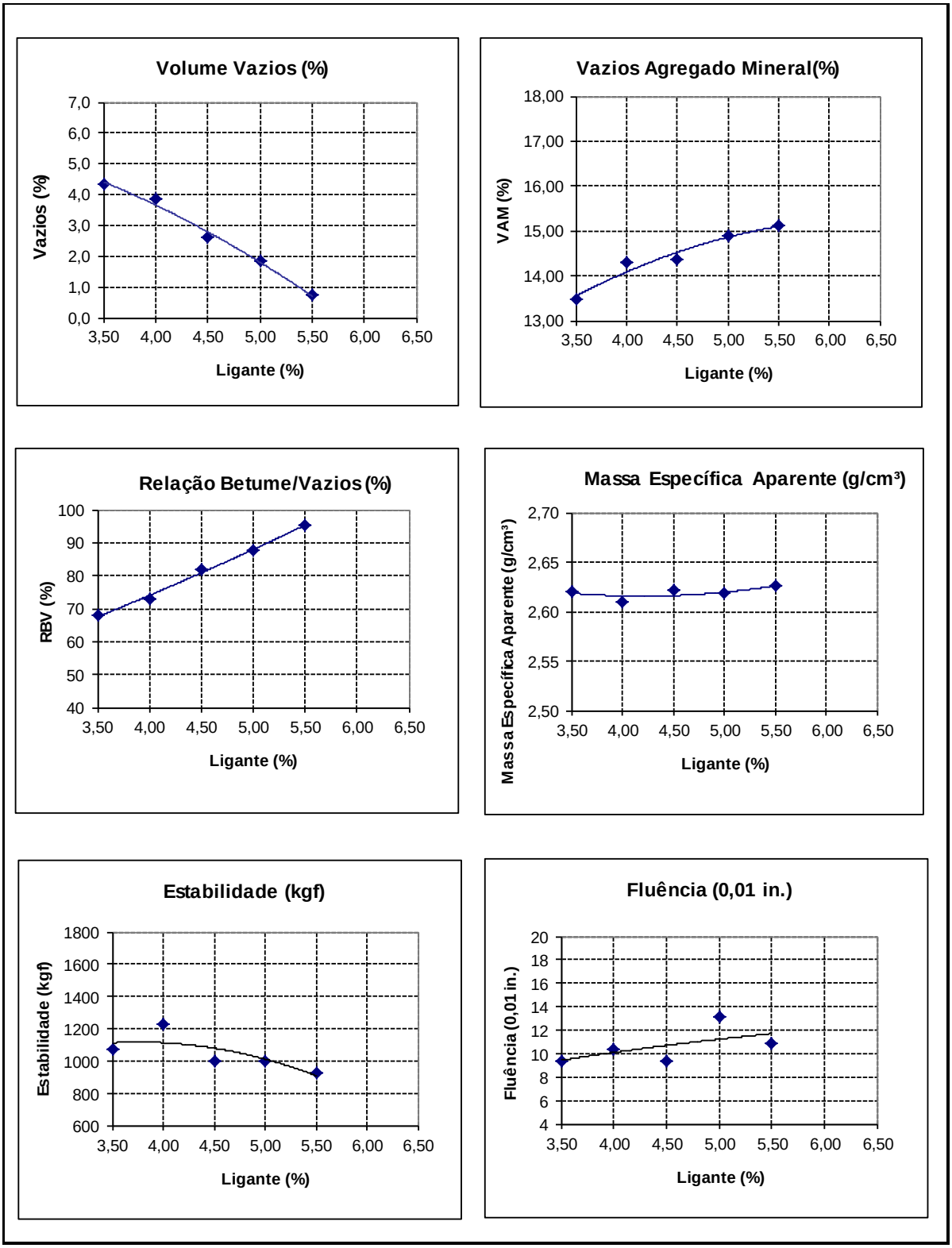
Fonte: Autoria própria

Figura 27: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Referência Faixa C (REFC)



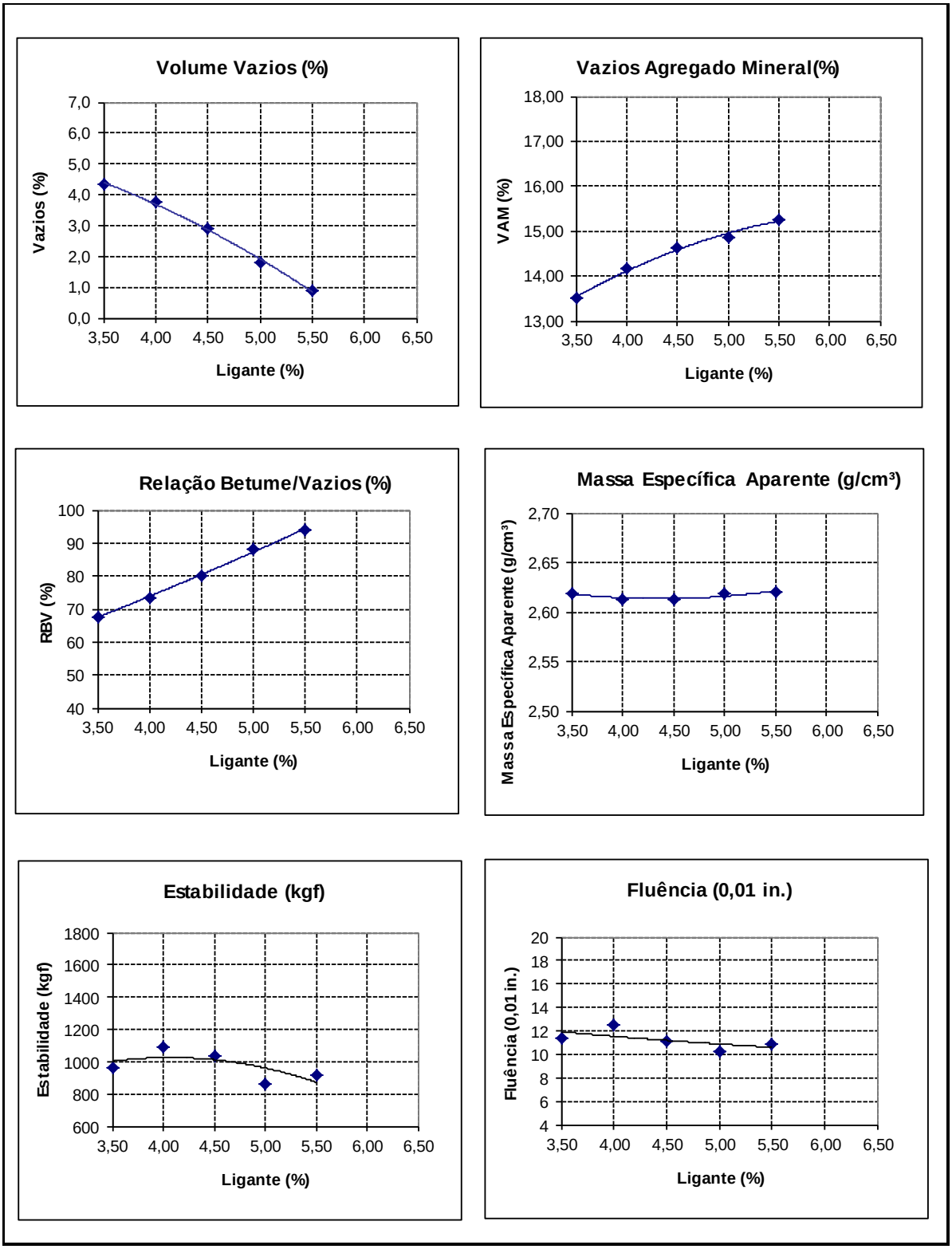
Fonte: Autoria própria

Figura 28: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa B com MEE 95% (MBB95)



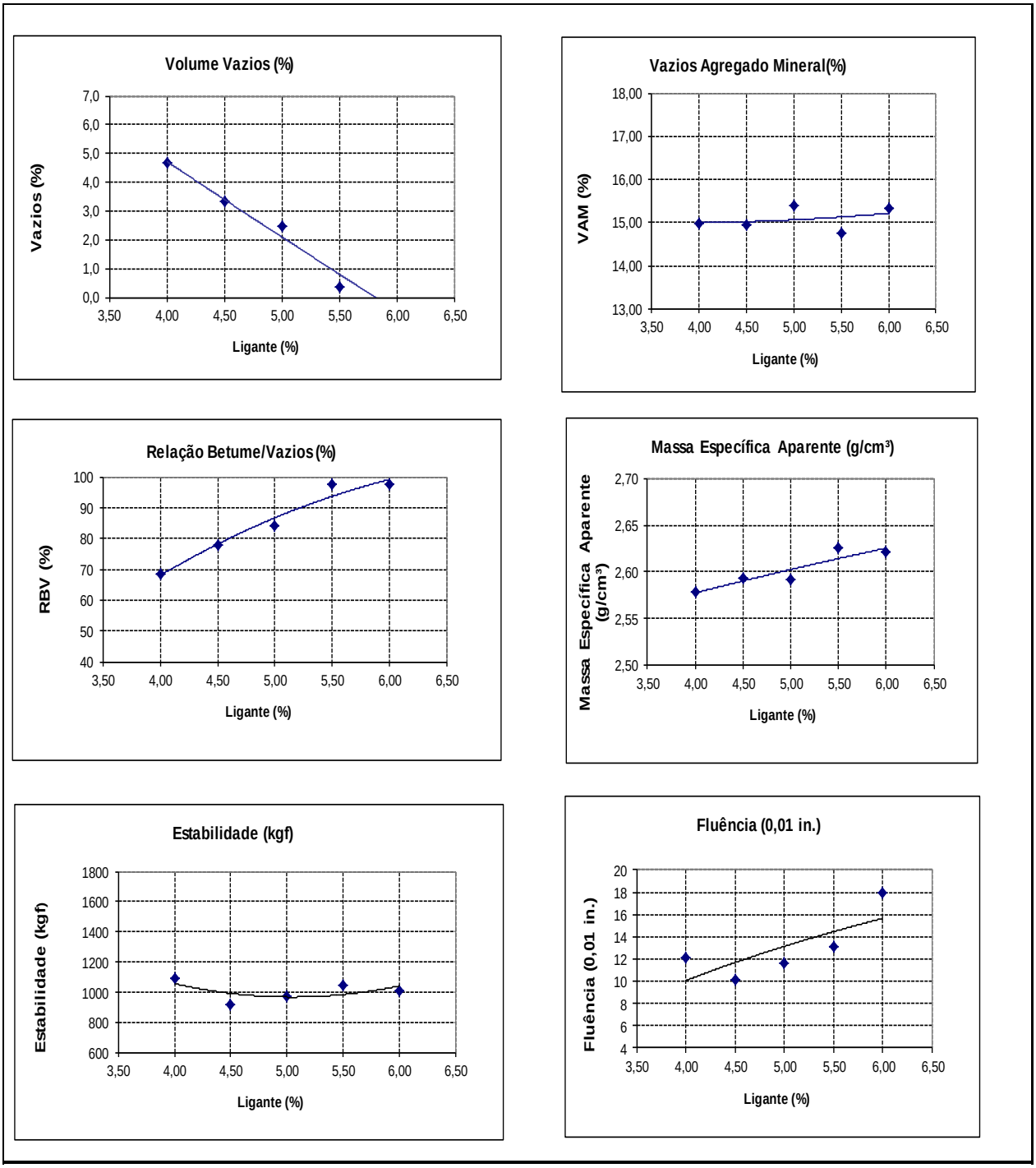
Fonte: Autoria própria

Figura 29: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa B com MEE 105% (MBB105)



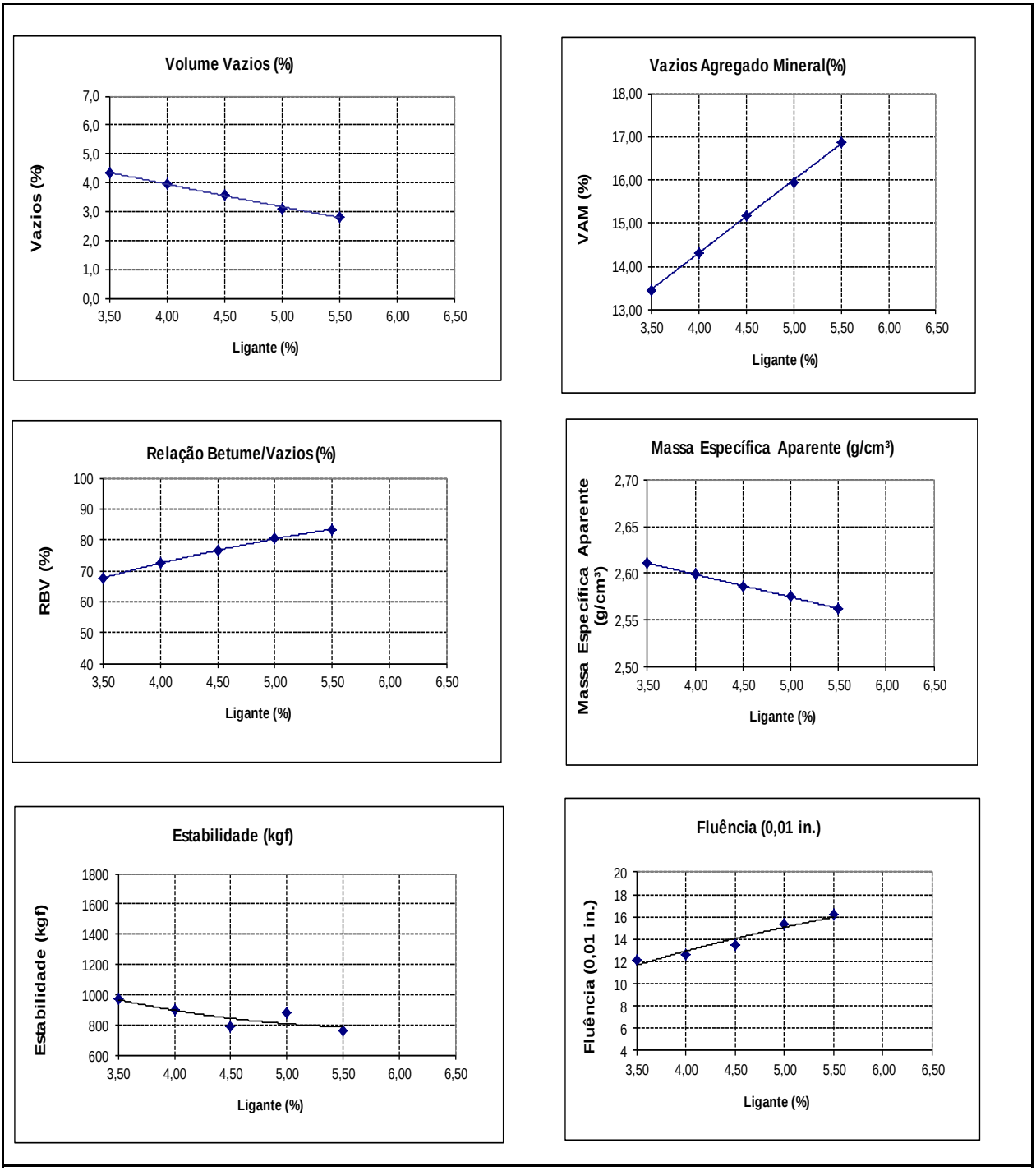
Fonte: Autoria própria

Figura 30: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa C com MEE 95% (MBC95)



Fonte: Autoria própria

Figura 31: Curvas dos parâmetros Marshall para a mistura Bailey Faixa C com MEE 105% (MBC105)



Fonte: Autoria própria

Tabela 16: Resumo dos parâmetros Marshall para cada mistura

Propriedade	DNIT - ES	REFB	REFC	MBB95	MBB105	MBC95	MBC105
Teor de Betume (%)	--	4,53	4,70	3,88	3,83	4,25	4,00
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 - 82	74,63	75,60	71,75	72,00	73,50	72,00
Vazios do Agregado Mineral para 1" (%)	> 14	15,68	16,04	14,09	13,95	14,96	14,32
Massa Específica Aparente (g/cm³)	--	2,584	2,576	2,613	2,615	2,586	2,598
Estabilidade (kgf)	> 500	1610	1345	1187	1050	1003	895
Fluência (1/100 in)	8 a 18	8	7	10	12	11	13

Fonte: Autoria própria

4.3.3 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

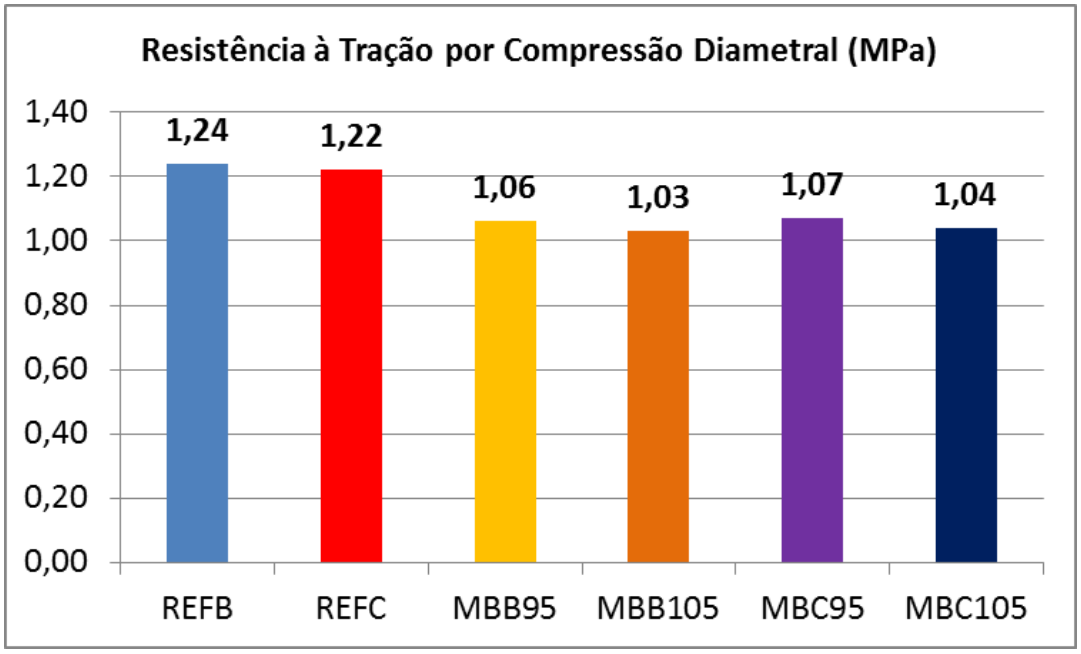
Preconizado pela norma DNIT – ME 136/2010, este ensaio consiste em encontrar a resistência à tração por compressão diametral de amostras de misturas asfálticas. Para a obtenção da RT, são analisados três corpos de prova para cada mistura moldados com o teor de ligante encontrado através da dosagem Marshall e, assim, a partir do resultado destes, faz-se uma média. A Tabela 17 apresenta os valores encontrados para cada corpo de prova ensaiado e o desvio padrão referente ao grupo de cada mistura e, a Figura 32 demonstra o valor médio da RT obtido.

Tabela 17: Valores de RT para cada CP das misturas e desvio padrão encontrado

MISTURAS	RT (MPa)	σ (MPa)
REFB 1	1,29	0,04
REFB 2	1,25	
REFB 3	1,19	
REFC 1	1,15	0,05
REFC 2	1,24	
REFC 3	1,27	
MBB95 1	1,09	0,03
MBB95 2	1,08	
MBB95 3	1,01	
MBB105 1	0,93	0,10
MBB105 2	1,00	
MBB105 3	1,17	
MBC95 1	1,00	0,06
MBC95 2	1,15	
MBC95 3	1,04	
MBC105 1	1,09	0,04
MBC105 2	1,04	
MBC105 3	1,00	

Fonte: Autoria própria

Figura 32: Resistência à tração por compressão diametral média das misturas



Fonte: Autoria própria

Comparando-se os valores encontrados, verifica-se que as misturas realizadas pelo método de seleção granulométrica por tentativas obtiveram resultados superiores às elaboradas pelo Método Bailey, o que não era esperado, pois o último deveria apresentar RT's mais elevadas, devido aos benefícios que busca, como o de conciliar misturas com graduações descontínuas com misturas contínuas.

Em relação à mistura tomada como referência para a faixa B, a mistura MBB95 apresentou uma redução de 14,52% em sua resistência à tração e a mistura MBB105 uma redução de 16,94%. Já se comparando as misturas MBB95 e MBB105, a redução na resistência à tração foi da ordem de 2,83%. O motivo das misturas realizadas pelo Método Bailey apresentarem resistências inferiores ao método de tentativas é de que estas apresentam uma menor quantidade de finos, assim, mesmo ocorrendo o intertravamento, não há uma quantidade de mástique suficiente para colaborar com a propriedade em análise. Além disso, analisando os valores encontrados de RBV, nota-se que ficaram abaixo do recomendado pela especificação, o que indica pouca quantidade de ligante nas misturas que, também acaba por ter relação com a resistência encontrada. Caso fosse utilizado mais um material com grande quantidade de finos na mistura, como outro pó de pedra, se poderia ter encontrado valores superiores de RT, ou, ainda,

caso a massa específica escolhida para as misturas Bailey tivesse sido inferior aos valores adotados.

Em relação à mistura tomada como referência para a faixa C, a mistura MBC95 apresentou uma redução de 12,30% em sua resistência à tração e a mistura MBC105 uma redução de 14,75%. Já se comparando as misturas MBC95 e MBC105, a redução na resistência à tração foi da ordem de 2,80%. Os motivos para estas reduções são os mesmos apresentados para as misturas da faixa B.

4.3.4 Módulo de resiliência (MR)

Para as misturas elaboradas, foi realizado também o ensaio que consiste em encontrar o módulo de resiliência. Este tem como objetivo verificar a rigidez apresentada pelas mesmas, sendo que parte da energia aplicada pela prensa de compressão diametral de carga repetida é absorvida e parte é recuperada. O procedimento adotado é preconizado pela norma DNIT – ME 135/2010. Para a realização do ensaio foram moldados três corpos de prova para cada mistura, sendo o valor do módulo a média encontrada para estes. O condicionamento dos CP's deu-se a uma temperatura de 25 ºC. O procedimento foi realizado no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Na Tabela 18 estão explicitados os valores encontrados para cada corpo de prova ensaiado, bem como seus coeficientes de variação e desvios padrões, na Tabela 19 constam as médias obtidas para cada mistura e, a Figura 33 demonstra o valor médio obtido para o MR.

Tabela 18: Valores encontrados de MR para cada corpo de prova

Misturas	H (mm)	D (mm)	MR (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
REFB 01	60,20	101,80	4343	190	4,37
REFB 02	60,50	101,90	3563	151	4,25
REFC 01	61,10	101,70	7261	293	4,03
REFC 02	60,30	101,80	5990	224	3,74
REFC 03	60,20	101,80	5934	212	3,57
MBB95 01	61,30	101,80	3395	158	4,65
MBB95 02	61,00	102,00	5270	177	3,36
MBB105 01	61,50	101,80	4345	205	4,71
MBB105 02	62,00	101,50	6185	225	3,64
MBB105 03	61,40	101,60	4945	219	4,44
MBC95 01	61,10	101,60	3921	141	3,50
MBC95 02	60,60	101,80	4708	152	3,25
MBC95 03	60,60	102,50	4569	495	4,27
MBC105 01	62,20	101,90	2541	566	2,23
MBC105 02	61,70	101,60	4080	195	4,77
MBC105 03	62,10	101,90	4292	209	4,86

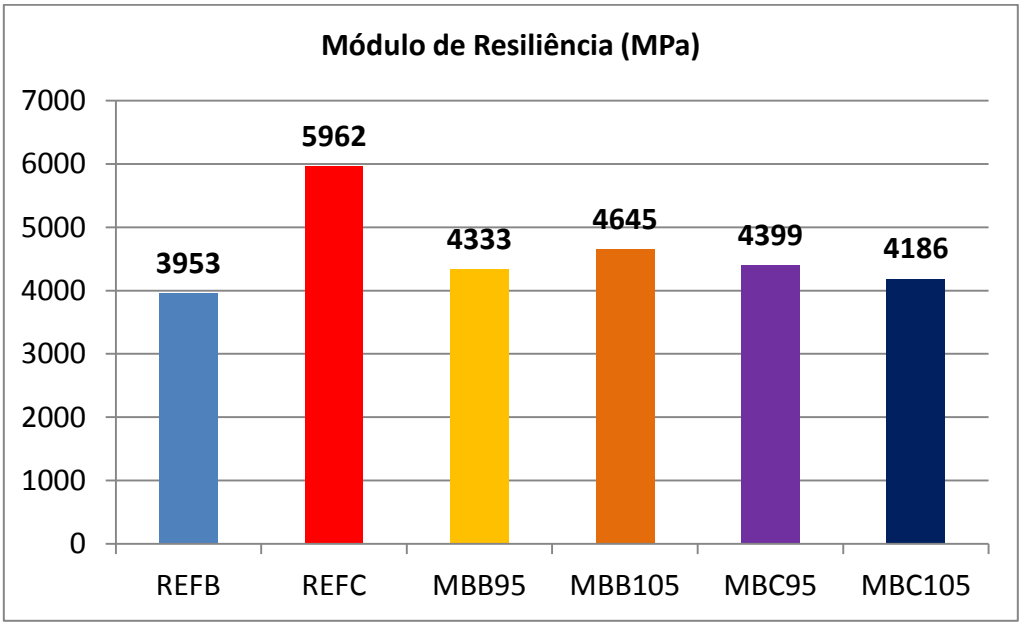
Fonte: Autoria própria

Tabela 19: Valores médios obtidos para cada mistura

Misturas	MÉDIA MR (MPa)	MÉDIA σ (MPa)	MÉDIA CV (%)
REFB	3953	171	4,31
REFC	5962	218	3,78
MBB95	4333	168	4,01
MBB105	4645	212	4,26
MBC95	4399	263	3,67
MBC105	4186	202	3,95

Fonte: Autoria própria

Figura 33: Módulo de resiliência médio das misturas



Fonte: Autoria própria

Para a obtenção da média dos módulos de resiliência das misturas, alguns corpos de prova acabaram por serem descartados. O motivo pelo qual essa decisão foi tomada foi de que estes acabavam por puxar as médias, tanto para baixo como para cima. Os CP's não utilizados foram o REFC 01, MBB105 02 e MBC105 01, explicitados na Tabela 18. Além disso, as médias das misturas REFB e MBB95 foram realizadas apenas com dois corpos de prova devido ao descarte de um CP destas, pois os mesmos acabaram por apresentar problemas na hora da execução do ensaio.

Em relação à mistura tomada como referência para a faixa B, a mistura MBB95 apresentou um acréscimo de 9,61% em seu módulo de resiliência e a mistura MBB105 um acréscimo de 17,51%. Já se comparando as misturas MBB95 e MBB105, houve um acréscimo no MR da ordem de 7,20%.

Em relação à mistura tomada como referência para a faixa C, a mistura MBC95 apresentou um decréscimo de 26,21% em seu módulo de resiliência e a mistura MBC105 um decréscimo de 29,79%. Já se comparando as misturas MBC95 e MBC105, houve um decréscimo no MR da ordem de 4,84%.

Quanto maior for o módulo de resiliência de uma mistura, mais rígida será esta, concluindo-se que há uma absorção maior de tensões, levando ao trincamento prematuro do revestimento. A mistura com maior valor encontrado foi a REFC (5962 MPa) e, a com menor foi a REFB (3953 MPa).

4.3.5 Módulo de resiliência x resistência à tração por compressão diametral

Segundo Bock (2009), a relação MR/RT transmite a ideia de compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura. Logo, misturas que apresentam elevada rigidez necessitam de uma resistência à tração também alta, isso, devido aos esforços que ficam concentrados em seu interior.

Esta relação permite inferir o comportamento de misturas asfálticas referentes ao trincamento. Quanto menor for o valor encontrado para a mesma, a mistura apresentará maior flexibilidade, unida, esta, a uma resistência à tração boa (NEVES FILHOS et al., 2004 apud BUDNY, 2009). Já de acordo com Leite et al. (2000 apud CUNHA, 2004), quanto menores os valores apresentados pela relação MR/RT, as misturas apresentarão um melhor equilíbrio entre à deformação permanente e às trincas por fadiga.

A Tabela 20 apresenta os valores encontrados para a relação MR/RT, ressaltando que estes não representam perda ou ganho no desempenho de uma mistura asfáltica. A mesma apenas faz uma representação de como a mistura poderá se comportar em campo referente ao trincamento por fadiga e à deformação permanente.

Tabela 20: Relação MR/RT

MISTURAS	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
REFB	3953	1,24	3188
REFC	5962	1,22	4887
MBB95	4333	1,06	4087
MBB105	4645	1,03	4510
MBC95	4399	1,07	4112
MBC105	4186	1,04	4025

Fonte: Autoria própria

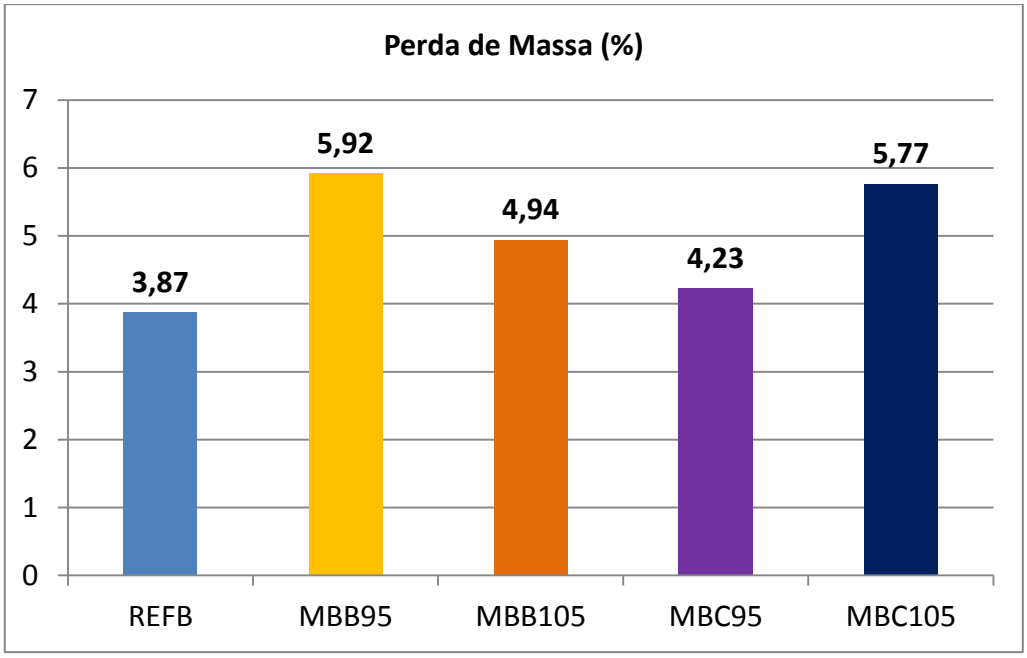
Analisando os resultados obtidos para cada mistura, percebe-se que a REFB obteve a menor relação, assim, pressupõe-se que esta apresentaria um melhor equilíbrio entre à deformação permanente e às trincas por fadiga. Já a mistura com a maior relação foi a REFC, julgando-a, assim, como a que apresentaria pior comportamento referente aos já citados.

4.3.6 Perda de massa – desgaste Cantabro

Para a realização deste procedimento, contou-se com a colaboração do laboratório de engenharia civil da UFSM, em Santa Maria. Este consiste, basicamente, em uma simulação da desagregação que a mistura sofreria referente às ações do tráfego. Para tal, os corpos de prova ensaiados são submetidos a 300 revoluções na máquina de Los Angeles. O valor da perda de massa da mistura é referente à média de três corpos de prova, sendo o resultado a diferença entre os pesos antes e após as revoluções.

Quanto maior o teor de ligante da mistura, menor desagregação sofrerá esta, devido ao elevado poder cimentício do mesmo (GARCIA, 2014). A Figura 34 apresenta a perda de massa encontrada para cada uma das misturas.

Figura 34: Perda de massa das misturas



Fonte: Autoria própria

Como o ensaio para encontrar a perda de massa das misturas não se procedeu no laboratório de engenharia civil da UNIJUÍ, ocorreu que os corpos de prova referentes à mistura REFC foram extraviados no translado até Santa Maria. Devido a este fato, todas as misturas realizadas a partir do Método Bailey, independente da faixa do DNIT considerada, foram comparadas apenas a mistura REFB.

Comparando-se as misturas, nota-se que todas apresentaram uma perda de massa superior em relação à mistura REFB. Isto se deve ao fato de que todas estas apresentaram um teor de ligante inferior, assim, diminuindo a união dos agregados da mistura, porém de maneira suave. Além disso, fazendo a comparação entre as misturas elaboradas pelo Método Bailey, apenas, nota-se certo desacordo dos resultados. A mistura MBB95, que apresenta teor de ligante superior a MBB105 e, também, maior quantidade de cal, que contribui com melhorias nas propriedades adesivas, acabou por apresentar um desgaste superior. Já a mistura MBC95, que apresenta as mesmas características citadas em relação a MBC105, apresentou uma perda de massa inferior, o que é um resultado coerente.

Mesmo não apresentando valores inferiores de perda de massa em relação à mistura REFB, todas acabaram por serem satisfatórias referentes à norma DNER – ME 383/99. Esta informa que o desgaste máximo aceitável pode chegar a 25%.

4.3.7 Relação estabilidade x fluência

A maior crítica que se tem ao ensaio Marshall é o estado de tensões indefinido, bem como a sua não aplicabilidade direta ao dimensionamento de pavimentos. Na Europa é bastante comum a utilização dos valores obtidos entre a relação da estabilidade com a fluência, não os utilizando de maneira individual. O valor da estabilidade mede, de maneira indireta, o intertravamento, coesão e atrito entre as partículas, bem como a resistência ao cisalhamento. Por sua vez, a fluência, também de maneira indireta, mede a elasticidade da mistura (SPECHT, 2004).

Ogurtsova et al. (1999 apud SPECTH, 2004), obteve a conclusão em seu trabalho de que, embora não sendo grandezas oriundas de um procedimento científico, a relação estabilidade/fluência pode traduzir condições de desempenho para camadas asfálticas. Sendo assim, valores altos de estabilidade (superiores a 500 kg), juntamente com valores de fluência inferiores a 5 mm, correspondem em misturas capazes de suportar tráfego médio, sem apresentar deformações significativas.

Nos Estados Unidos, os valores de estabilidade e fluência Marshall variam de um estado a outro e, fazendo uma média para 38 estados, chegou-se a um resultado mínimo de estabilidade de 520 kg e uma faixa de aceitação para os valores de fluência, variando entre 2,0 até 4,0 – 4,6 mm, conforme pesquisa apresentada por Kandhall e Koehler (1985 apud SPECTH, 2004).

Para este trabalho, será realizada a análise da relação estabilidade/fluência especificada conforme Dirección Nacional de Vialidad (1998), que é uma especificação Argentina, onde cita que para camadas de concreto asfáltico esta relação deve ficar entre 2100 kg/cm a 4000 kg/cm. A Tabela 21 apresenta os valores encontrados de estabilidade e fluência para cada mistura, bem como a relação entre estas.

Tabela 21: Relação estabilidade x fluência das misturas

Propriedade	**Especificações**/Misturas	REFB	REFC	MBB95	MBB105	MBC95	MBC105
Teor de Ligante (%)	**----**	4,53	4,70	3,88	3,83	4,25	4,00
Estabilidade (kg)	**> 500[1]**	1610	1345	1187	1050	1003	895
Fluência (cm)	**0,2 a 0,45[1]**	0,20	0,18	0,25	0,30	0,28	0,33
Relação Estabilidade/Fluência (kg/cm)	**2100 a 4000[2]**	8050	7686	4748	3500	3647	2754

NOTA: [1] DNIT – ES 031/2006; [2] Dirección Nacional de Vialidade (1998)

Fonte: Autoria própria

Analisando as relações encontradas, se observa que três das misturas extrapolaram os limites estipulados pela especificação e, outras três, respeitaram os limites. Além disso, observando as misturas elaboradas pelo método Bailey, se pode perceber que os valores de estabilidade diminuem quanto menor o teor de ligante e, os valores de fluência aumentam, para ambas as faixas do DNIT consideradas. Se comparadas com as misturas obtidas pelo método de tentativas, o mesmo padrão é encontrado. Desta maneira, consequentemente, quanto menor a estabilidade e maior a fluência, a relação acaba por obter valores inferiores. Ressalta-se, ainda, que a especificação indica que misturas com tendência a ter estabilidade elevada e baixa fluência devem ser evitadas.

4.3.8 Método Bailey

Segundo a revisão da literatura descrita, para avalição do arranjo de agregados de misturas elaboradas pelo Método Bailey, alguns parâmetros devem ser analisados. Estes são as proporções de agregados graúdos (AG), graúda do agregado miúdo (GAM) e, miúda do agregado miúdo (MAM). Para determina-las, são necessárias algumas informações, estas referentes às porcentagens passantes de material, conforme a malha de abertura das peneiras de controle consideradas, que dependem do diâmetro máximo nominal (DMN) das misturas.

A análise granulométrica deste estudo procedeu-se a partir das peneiras consideradas na norma DNIT – ES 031/2006. Porém, para realizarem-se as misturas através do Método Bailey, as peneiras consideradas por este acabam por diferirem um pouco das utilizadas, sendo necessária uma gama maior de aberturas de malha do que as presentes na norma. Desta maneira, realizaram-se ponderações, estimando as porcentagens passantes de material nas peneiras além das consideradas inicialmente.

As peneiras de controle utilizadas, devido a maior gama considerada pelo Método Bailey, acabam, em algumas misturas, apresentando aberturas que a norma DNIT – ES 031/2006 não considera. Porém, estas são necessárias para a realização da verificação dos parâmetros. A Tabela 22 demonstra as aberturas de malha das peneiras de controle de cada mistura, incluindo das misturas elaboradas pelo método de tentativas e, a porcentagem passante de material nestas.

Tabela 22: Peneiras de controle das misturas

Misturas/**Peneiras Controle**	**DMN (mm)**	**PM (mm)**	**% passante**	**PCP (mm)**	**% passante**	**PCS (mm)**	**% passante**	**PCT (mm)**	**% passante**
REFB	19,0	9,5	**66,20**	4,75	**55,79**	1,18	**28,01**	0,30	**15,68**
REFC	12,5	6,25	**69,60**	2,36	**41,59**	0,60	**20,59**	0,15	**9,82**
MBB95	25,0	12,5	**66,43**	4,75	**42,94**	1,18	**20,43**	0,30	**11,45**
MBB105	25,0	12,5	**63,53**	4,75	**38,07**	1,18	**17,55**	0,30	**9,83**
MBC95	19,0	9,5	**67,50**	4,75	**43,42**	1,18	**18,90**	0,30	**10,85**
MBC105	19,0	9,5	**64,70**	4,75	**38,60**	1,18	**15,69**	0,30	**9,00**

Fonte: Autoria própria

Com todos os valores de porcentagem passante de material das misturas em cada peneira de controle encontrados, realizou-se a verificação do enquadramento nos limites das proporções consideradas. A Tabela 23 apresenta os valores encontrados para cada proporção de acordo com o DMN e, os limites considerados pelo Método Bailey destas.

Tabela 23: Proporções das misturas

Misturas/**Proporções**	**DMN (mm)**	**AG**	**Limites Bailey**	**GAM**	**Limites Bailey**	**MAM**	**Limites Bailey**
REFB	19,0	0,31	**0,60 - 0,75**	0,50	**0,35 - 0,50**	0,56	**0,35 - 0,50**
REFC	12,5	0,92	**0,50 - 0,65**	0,50	**0,35 - 0,50**	0,48	**0,35 - 0,50**
MBB95	25,0	0,70	**0,70 - 0,85**	0,48	**0,35 - 0,50**	0,56	**0,35 - 0,50**
MBB105	25,0	0,70	**0,70 - 0,85**	0,46	**0,35 - 0,50**	0,56	**0,35 - 0,50**
MBC95	19,0	0,74	**0,60 - 0,75**	0,44	**0,35 - 0,50**	0,57	**0,35 - 0,50**
MBC105	19,0	0,74	**0,60 - 0,75**	0,41	**0,35 - 0,50**	0,57	**0,35 - 0,50**

Fonte: Autoria própria

Analisando os valores encontrados, verifica-se que para a proporção graúda do agregado miúdo, todas as misturas, mesmo as realizadas pelo método de seleção granulométrica por tentativas, enquadram-se nas faixas consideradas pelo Método Bailey, estas, de acordo com o diâmetro máximo nominal.

Para a proporção de agregados graúdos, as misturas elaboradas pelo Método Bailey enquadraram-se nos limites, porém, as misturas obtidas pelo método de tentativas não. Para a mistura REFB, o valor encontrado foi abaixo dos limites, assim, essa mistura poderia apresentar maior susceptibilidade à desagregação, além de que seria necessária uma estrutura resistente de agregados miúdos com objetivo de atender as solicitações volumétricas (MENDES, 2011). Já para a mistura REFC, o valor encontrado foi próximo de 1,00, ficando acima do limite e, indicando, assim, que esta apresentaria dificuldades de compactação devido ao formato de sua distribuição granulométrica, além dos vazios no agregado mineral (VAM) serem superiores, com tendência de as partículas passantes na PM serem as que controlam o esqueleto de agregados graúdos.

Para a proporção miúda do agregado miúdo, verificou-se que apenas a mistura elaborada pelo método de tentativas referente à faixa C enquadrou-se nos limites considerados, as demais acabaram por apresentar valores superiores ao do limite superior. Desta maneira, com os valores acima do limite, há um decréscimo no VAM das misturas em questão, apresentando, também, uma maior susceptibilidade à desagregação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar, através de procedimentos laboratoriais, misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento de pavimentos flexíveis, elaboradas pelo Método Bailey de seleção granulométrica e pelo método de tentativas. A seguir são apresentadas conclusões referentes aos ensaios realizados para análise das misturas desenvolvidas.

Os teores de ligante encontrados para as misturas asfálticas elaboradas através do método de tentativas foram superiores as do Método Bailey. Isto devido ao fato de que as misturas desenvolvidas a partir do método de tentativas apresentaram uma quantidade de finos superior, assim, acabando por absorver uma maior quantidade de CAP.

A mistura tomada como referência para a faixa B do DNIT, obtida pelo método de tentativas, apresentou um teor de 4,53%, enquanto que a mistura MBB105, elaborada através do Método Bailey, que foi a que obteve um menor teor para a faixa considerada, apresentou 3,83% de adição de ligante a mistura. A diferença entre os teores é de 0,70% e, como o ligante é o insumo com maior custo de uma mistura asfáltica, conclui-se que a mistura MBB105, caso utilizada, geraria uma diminuição de custos significante para cada quilômetro de rodovia construído. Para as misturas referentes à faixa C do DNIT, observa-se o mesmo comportamento. A que foi obtida pelo método de tentativa apresentou um teor de 4,70%, enquanto que a mistura MBC105, elaborada pelo Método Bailey, apresentou teor de 4,00%. A diferença entre teores é, também, de 0,70%, chegando-se a mesma conclusão anterior, para as misturas da faixa B.

Referente aos parâmetros analisados através da dosagem Marshall verificou-se que nenhuma das misturas teve total enquadramento nos limites considerados pela norma, seja na relação betume vazios (RBV), vazios do agregado mineral (VAM) e na fluência. O único parâmetro considerado satisfatório para todas as misturas foi a estabilidade.

Após a realização do procedimento utilizado para encontrar a resistência à tração por compressão diametral das misturas, verificou-se que, para as misturas referentes à faixa B do DNIT, a que apresentou valor mais elevado foi a mistura REFB, elaborada através do método de seleção granulométrica por tentativas, com 1,24 MPa de resistência. A mistura que apresentou

menor resistência foi a MBB105, com 1,03 MPa. Ambas as misturas desenvolvidas através do Método Bailey obtiveram valores inferiores de resistência à tração em relação à mistura elaborada pelo método de tentativas, o que não era esperado, pois os benefícios que o Método Bailey apresenta, deveriam resultar em misturas mais resistentes. Para as misturas referentes à faixa C do DNIT, observou-se o mesmo padrão. A mistura elaborada pelo método de tentativas obteve resistência à tração por compressão diametral da ordem de 1,22 MPa. Já, a que apresentou menor resistência, foi a MBC105, elaborada pelo Método Bailey, obtendo um valor de 1,04 MPa.

Analisando-se as misturas referentes ao módulo de resiliência obtido, considerando ambas as faixas do DNIT adotadas, observou-se que o maior valor encontrado foi para a mistura REFC, com 5962 MPa. O menor valor encontrando foi para a mistura REFB, apresentando 3953 MPa. Desta maneira, conclui-se que das misturas realizadas, a que apresenta maior rigidez é a REFC e a mais flexível é a REFB. Ressalta-se que misturas mais flexíveis apresentam um menor armazenamento de energia e uma maior recuperação quando solicitadas, assim, seus comportamentos referentes à trincas por fadiga é mais eficaz, retardando o aparecimento.

Como método para qualificar a diferença entre esses dois parâmetros analisados têm-se que, quanto menor a relação apresentada, melhor seria o equilíbrio apresentado pela mistura referente à deformação permanente e às trincas por fadiga. Assim, verificou-se que, a menor relação encontrada foi para a mistura REFB, com valor de 3188 MPa e, a maior relação obtida foi para a mistura REFC, com 4887 MPa. Misturas que apresentam uma relação MR/RT baixa, tendem a ser mais flexíveis, unidas, a uma resistência à tração boa. Porém, nem sempre isso é observado, pois para ambas as misturas citadas, os valores de RT foram praticamente iguais, sendo o MR o parâmetro que apresentou maior variação.

A perda de massa de misturas caracteriza a resistência que estas apresentam em relação ao desgaste referente às solicitações as quais são submetidas. Quanto menor o valor apresentado, maior será a resistência ao desgaste da mistura. A menor perda de massa foi apresentada pela mistura REFB com 3,87% e, a mistura com maior perda foi a MBB95, com valor da ordem de 5,92%. Verifica-se que todas as misturas elaboradas, enquadraram-se nas especificações da norma, que maximizam o desgaste em 25%.

Referente aos parâmetros da dosagem Marshall analisados, realizou-se a verificação da relação entre os valores encontrados para estabilidade e fluência de cada mistura. A maior relação encontrada foi para a mistura REFB, apresentando valor da ordem de 8050 kg/cm e, a menor relação foi para a mistura MBC105, com 2754 kg/cm. Um fator que influenciou diretamente nos valores de estabilidade e fluência das misturas foi o teor de ligante adicionado, observando-se que quanto maior o teor utilizado, maior foi a estabilidade e menor a fluência, considerando as faixas do DNIT separadamente. Analisando-se as misturas de acordo com a norma utilizada, verificou-se que três delas enquadraram-se nos limites estipulados e, outras três não. Desta maneira, a norma indica que deve ser evitada a utilização das misturas que não se enquadraram nos limites.

Referente aos parâmetros analisados através do Método Bailey verificou-se que todas as misturas elaboradas por este, enquadraram-se nos limites estipulados para a proporção de agregados graúdos (AG) e graúda do agregado miúdo (GAM). Já para a proporção miúda do agregado miúdo (MAM), nenhuma das misturas enquadrou-se dentro dos limites. O valor apresentado pelas misturas, referentes à proporção MAM, podem indicar um valor de vazios do agregado mineral (VAM) mais baixo e, também, uma maior susceptibilidade a desagregação.

Por tratar-se de uma primeira experiência com o Método Bailey realizada na UNIJUÍ, os valores encontrados como resultado para os procedimentos adotados acabaram por não retratarem os benefícios apresentados, principalmente no que se refere à resistência à tração por compressão diametral das misturas. Porém, todos os resultados foram considerados satisfatórios, mesmo não abrangendo as expectativas iniciais.

Deixa-se como sugestão para dar continuidade ao estudo a realização de procedimentos distintos dos adotados para a caracterização das misturas elaboradas. Além disso, indica-se, também, a utilização de valores diferentes de massa específica escolhida para o Método Bailey, podendo extrapolar os limites indicados, tanto para mais, quanto para menos. Desta maneira, seriam obtidas misturas com uma maior quantidade de material graúdo, caso fosse utilizado um valor superior a 105% e, misturas com uma maior quantidade de material miúdo, caso fosse utilizado um valor inferior a 95%.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000. 11 p.

_____. NBR NM 45: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 18 p. Disponível em: <http://www.engenhariaunip.com.br/2014/arquivos/normas/94-abnt-nbr-nm-45-2006-agregados-determinacao-da-massa-unitaria-e-do-volume-de-vazios.html>, Acesso em: 23 abr. 2015.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p. il. color.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de pinus em obras de pavimentação asfáltica**. 2008. 192 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

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

BOCK, André Luiz. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal**. 2009. 88 f. il. color. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009. Disponível em: <http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/2009/TCC%20Andr%C3%A9%20Luiz%20Bock.pdf>, Acesso em: 26 abr. 2015.

BUDNY, Jaelson. **Avaliação dos efeitos de diferentes tipos de cal em misturas de concreto asfáltico**. 2009. 74 f. il. color. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009. Disponível em: <http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/2010/03/TCC-Jaelson-Budny.pdf>, Acesso em: 26 abr. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2014**: relatório gerencial. Brasília, DF, 2014. 389 p. il. color. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx>, Acesso em: 09 mai. 2015.

CUNHA, Marcos Bottene. **Avaliação do método bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 118 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de

Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Especificações gerais**. Rio Grande do Sul, 1998. 421 p. il. color. Disponível em: <http://www.daer.rs.gov.br/site/normas_publicacoes.php>, Acesso em: 9 abr. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 386**: pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999. 15 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ES386-99.pdf>, Acesso em: 10 mai. 2015.

_____. DNER-ME 043: misturas betuminosas a quente – ensaio marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

_____. DNER-ME 080: solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

_____. 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 383: desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio cantabro. Rio de Janeiro, 1999. 2 p.

_____. DNER-PRO 120: coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro, 1997. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719). il. color. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>, Acesso em: 9 abr. 2015.

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

_____. DNIT-ME 135: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 6 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.

DIRECCIÓN NACIONAL DE VALIDAD. **Bases y carpetas de mezclas preparadas en caliente** – Pliego de especificaciones técnicas. Buenos Aires, 1998. 17 p.

GARCIA, Emmanuelle Stefânia Holdefer. **Avaliação laboratorial da utilização do resíduo (areias) de fundição no concreto asfáltico convencional**. 2014. 100 f. il. color. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

GOUVEIA, Lilian Taís de. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340 f. il. color. Dissertação de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura 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/publico/tese-ltgouveia.pdf>, Acesso em: 18 abr. 2015.

INSTITUTO DO ASFALTO. **Manual do asfalto**. Lexington, [1989?]. 599 p. il.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do modulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. 490 f. il. color. Dissertação de Doutorado (Programas de Pós-Graduação de Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380 p. il.

MENDES, Larissa de Oliveira. **Utilização do método bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MOTTA, Laura Maria G. et al. **Princípios do projeto e análise superpave de misturas asfálticas**: tradução comentada. Rio de Janeiro: Petrobras, 1996. 157 f. il.

NASCIMENTO, Luis Alberto Herrmann do. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 227 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias do. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas**. 2011. 123 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_416.pdf>, Acesso em: 25 abr. 2015.

PASCHE, Eduardo. **Análise do desempenho de misturas asfálticas com a incorporação de material fresado e cal**. 2013. 68 f. il. color. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

PAZOS, Abraham Guerrero. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2015. 147 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (processos úmido e seco)**. 2004. 166 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4898/1/2004_dis_jhmpinheiro.pdf>, Acesso em: 25 abr. 2015.

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

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 280 f. il. color. Dissertação de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VASCONCELOS, Kamilla Lima. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias marshall e superpave com diferentes granulometrias**. 2004. 149 f. il. color. Dissertação de Mestrado (Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

VAVRIK, William. R. et al. **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design**. **Transportation Research Board**: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. Out. 2002. ISSN 0097-8515.