MARCOS BOTTENE CUNHA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO BAILEY DE SELEÇÃO
GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS PARA
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos,
da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Área de
Concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Assoc. José Leomar Fernandes Júnior

**São Carlos
2004**

*Aos meus pais, Wanderlei e Márcia, e à Ludmila, por
todo apoio, incentivo, amor e carinho.*

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado força para alcançar mais essa etapa da minha vida.

Ao Prof. José Leomar Fernandes Júnior, não só pelos ensinamentos e excelente orientação neste trabalho, mas pela amizade e exemplo profissional.

Aos professores do Departamento de Transportes da EESC – USP, em especial ao Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri e o Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória, pelos ensinamentos, incentivo, sugestões e apoio.

A todos os funcionários do Departamento de Transportes da EESC – USP em especial aos técnicos do Laboratório de Estradas, Antônio Carlos Gigante, Paulo Toyama e João Pereira Filho.

Aos amigos do Departamento de Transportes, em especial a Ana Paula Fulan, André Mugayar, Benedito Coutinho, Caio Rubens, Cláudio Dubeux, Deise Menezes, Ernesto Chavez, Eduardo Stuchi, Fábio Zanchetta e Frederico Klein por toda a amizade e ajuda.

À Lilian Taís Gouveia, pela amizade e colaboração direta neste trabalho.

Aos meus irmãos, Bruno e Camila, por todo o companheirismo.

Às pedreiras Santa Isabel e São Roque e à mineradora Jundu, pelo fornecimento dos materiais granulares para a pesquisa.

À Petrobras S.A., pelo fornecimento do ligante asfáltico usado na pesquisa.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Resumo

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

A presente dissertação tem por objetivo avaliar o Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas, desenvolvido no Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) e que vem sendo usado desde o início da década de 80. Atualmente, pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de aperfeiçoar a seleção granulométrica e, conseqüentemente, o desempenho de misturas asfálticas, incluindo estudos a respeito do Método Bailey. Trata-se de um método de seleção granulométrica por volume que, através de um modo sistemático de ajuste da graduação dos agregados na preparação de uma mistura asfáltica, proporciona um forte esqueleto de agregado para resistir à deformação permanente. Resulta, também, em um adequado volume de vazios no agregado mineral, o que permite um maior teor de ligante e aumento da durabilidade da mistura. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que as misturas Bailey, independentemente do tipo de agregado (basalto ou gabro), apresentam melhores resultados do que as misturas convencionais e termos de relação Módulo de Resiliência – Resistência à Tração. Os resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática indicam um melhor desempenho da mistura Bailey com basalto, embora a mistura convencional com gabro tenha apresentado um comportamento ligeiramente superior ao da mistura Bailey com gabro.

Palavras-chave: método Bailey, seleção granulométrica, misturas asfálticas, massa específica solta e compactada de agregados.

Abstract

CUNHA, M. B. (2004). *Bailey Method Evaluation of aggregates gradation selection for Hot Mix Asphalt (HMA)*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The main goal of the master thesis is the evaluation of the Bailey Method of gradation selection of aggregates for Hot Mix Asphalt (HMA). The method was developed at the Illinois Department of Transportation (IDOT) and it has been used since the early 1980s. Many researches are intending to improve the gradation selection and, consequently, the performance of HMA, including studies about the Bailey Method. It is a method that uses a systematic way of selection and adjustment of the aggregate gradation to provide a strong aggregate skeleton. It also provides an adequate amount of voids in the mineral aggregate that result in higher binder content and improved durability. The results obtained in this work show that Bailey Asphalt Mixtures, for both aggregates considered, are better than conventional mixtures in terms of Resilient Modulus – Tensile Strength Ratio. The results of static creep tests indicate that the Bailey Mixture with basalt aggregates presents the best performance among the evaluated asphalt mixtures.

Keywords: Bailey method, gradation selection, hot mix asphalt, loose and compacted unit weight of aggregates.

Lista de Figuras

FIGURA 1 – Tipos de curvas granulométricas para misturas asfálticas (ROBERTS <i>et al.</i> , 1991).	5
FIGURA 2 – Exemplo de uma mistura asfáltica de graduação descontínua (SMA) e de uma mistura asfáltica de graduação contínua. (NAPA, 2002).	6
FIGURA 3 – Gráfico Superpave para determinação da distribuição granulométrica – DMN 12,5mm.	13
FIGURA 4 – Exemplo de divisão entre agregado graúdo e fino em uma mistura com DMN 19,0mm (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002).	23
FIGURA 5 – Representação dos arranjos considerados por Vavrik <i>et al.</i> , 2002.	24
FIGURA 6 – Representação do conceito de massa específica solta do agregado graúdo (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002).	25
FIGURA 7 – Representação do conceito de massa específica compactada do agregado graúdo (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002).	26
FIGURA 8 – Esquema do método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002).	27
FIGURA 9 – Esquema ilustrativo de divisões para análise em uma graduação contínua (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002).	31
FIGURA 10 – Distribuições granulométricas Bailey e AZR (Basalto)	47
FIGURA 11 – Distribuição granulométrica Bailey e AZR (Gabro).	48
FIGURA 12 – Detalhe do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.	54
FIGURA 13 – Detalhe do suporte para fixação dos corpos-de-prova para os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência a Tração Indireta, durante realização de ensaio de módulo de resiliência.	56
FIGURA 14 – Tela do programa computacional referente ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.	58
FIGURA 15 – Tela do programa computacional referente ao cálculo do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.	65
FIGURA 16 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura Bailey – Agregado: Basalto.	62
FIGURA 17 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura Bailey – Agregado: Gabro.	63
FIGURA 18 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura AZR – Agregado: Basalto.	64
FIGURA 19 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura AZR – Agregado: Gabro.	65
FIGURA 20 – Tensões de ruptura das misturas Bailey e AZR.	67
FIGURA 21 – Módulo de resiliência das misturas Bailey e AZR.	67
FIGURA 22 – Módulo de resiliência das misturas Bailey Basalto Modificadas.	68
FIGURA 23 – Módulo de resiliência das misturas Bailey Gabro Modificadas.	69
FIGURA 24 – Deformação total das misturas Bailey e AZR.	72
FIGURA 25 – Deformação recuperável das misturas Bailey e AZR.	73
FIGURA 26 – Deformação plástica das misturas Bailey e AZR.	73
FIGURA 27 – Recuperação elástica das misturas Bailey e AZR.	74
FIGURA 28 – Módulo de fluência aos 3.600s para as misturas Bailey e AZR.	74

FIGURA 29 – Módulo de fluência aos 4.500s para as misturas Bailey e AZR.....	75
FIGURA 30 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey e AZR.....	75
FIGURA 31 – Deformação total das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto.	
.....	76
FIGURA 32 – Deformação recuperável das misturas Bailey modificadas – Agregado:	
Basalto.....	77
FIGURA 33 – Deformação plástica das misturas Bailey modificadas – Agregado:	
Basalto.....	77
FIGURA 34 – Recuperação elástica das misturas Bailey modificadas – Agregado:	
Basalto.....	78
FIGURA 35 – Módulo de fluência aos 3600s para as misturas Bailey modificadas –	
Agregado: Basalto.....	78
FIGURA 36 – Módulo de fluência aos 4500s para as misturas Bailey modificadas –	
Agregado: Basalto.....	79
FIGURA 37 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey modificadas –	
Agregado: Basalto.....	79
FIGURA 38 – Deformação total das misturas Bailey modificadas – Agregado: Gabro.	80
FIGURA 39 – Deformação recuperável das misturas Bailey modificadas –Agregado:	
Gabro.....	81
FIGURA 40 – Deformação plástica das misturas Bailey modificadas –Agregado: Gabro.	
.....	81
FIGURA 41 – Recuperação elástica das misturas Bailey modificadas – Agregado:	
Gabro.....	82
FIGURA 42 – Módulo de fluência aos 3600s para as misturas Bailey modificadas –	
Agregado: Gabro.....	82
FIGURA 43 – Módulo de fluência aos 4500s para as misturas Bailey modificadas –	
Agregados: Gabro.	83
FIGURA 44 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey modificadas –	
Agregado: Gabro.....	83

Lista de Tabelas

TABELA 1 – Exemplo de especificação granulométrica Superpave - DMN 12,5mm ..	13
TABELA 2 – Requisitos de VAM da especificação Superpave.....	15
TABELA 3 – Fatores para correção do VAM.	16
TABELA 4 – Requisitos Superpave para RBV.	18
TABELA 5 – Faixas recomendadas para os fatores dos agregados.....	32
TABELA 6 – Peneiras de Controle do Método Bailey.....	35
TABELA 7 – Exemplo de efeitos combinados de mudanças nos parâmetros Bailey.	38
TABELA 8 – Peneiras de Controle para misturas de graduação fina.....	40
TABELA 9 – Parâmetros ajustados para misturas de graduação fina.	40
TABELA 10 – Misturas Bailey e AZR (Basalto).	46
TABELA 11 – Misturas Bailey e AZR (Gabro).	46
TABELA 12 – Características Físicas do Basalto.	49
TABELA 13 – Características Físicas do Gabro.	50
TABELA 14 – Características físicas do CAP-20 utilizado.	50
TABELA 15 – Verificação do Intertravamento do Agregado Graúdo.	60
TABELA 16 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas Bailey – Agregado: Basalto.....	60
TABELA 17 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas Bailey – Agregado: Gabro.....	61
TABELA 18 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas AZR – Agregado: Basalto.....	61
TABELA 19 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas AZR – Agregado: Gabro.....	61
TABELA 20 – Porcentagens de asfalto nas misturas de acordo com a densidade	66
TABELA 21 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.	66
TABELA 22 – Resultados médios do ensaio de módulo de resiliência para as misturas Bailey Basalto Modificadas.	68
TABELA 23 – Resultados médios do ensaio de módulo de resiliência para as misturas Bailey Gabro Modificadas.	68
TABELA 24 – Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência.	71
TABELA 25 – Critério do módulo de fluência para carregamento de 1 hora.	71
TABELA 26 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey e AZR.....	72
TABELA 27 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey e AZR.....	72
TABELA 28 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Basalto.....	76
TABELA 29 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Basalto.....	76
TABELA 30 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Gabro.....	80

TABELA 31 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas –Agregado: Gabro.....	80
TABELA 32 – Exemplo de seleção granulométrica pelo Método Bailey usando dois agregados graúdos e um fino (DMN = 12,5mm).....	98
TABELA 33 – Resultado dos cálculos do Método Bailey.	105
TABELA 34 – Mistura calculada pelo Método Bailey.....	105

Lista de Abreviaturas, Símbolos e Siglas

γ_{ag} – massa específica do agregado graúdo
 σ_R – resistência à tração
 γ_{sc} – massa específica aparente da mistura no estado compactado seco
 ϵ_t – deformação recuperável
 σ_t – tensão de tração
AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
AZR – Acima da Zona de Restrição (misturas)
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CMHB – *Coarse Matrix High Binder*
 D_{ap} – Densidade aparente da mistura
DMM – Densidade Máxima Medida
DMN – Diâmetro Máximo Nominal
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
LVDT – *Linear Variable Differential Transducers*
MEE – Massa Específica Escolhida
MR – Módulo de Resiliência
NCAT – *National Center for Asphalt Technology*
 P_{ag} – Porcentagem de agregado graúdo (mistura)
PCP – Peneira de Controle Primário
PCS – Peneira de Controle Secundário
PCT – Peneira de Controle Terciário
PM – Peneira Média
Proporção AG – Proporção de Agregados Graúdos
Proporção FAF – Proporção Fina dos Agregados Finos
Proporção GAF – Proporção Graúda dos Agregados Finos
RBV – Relação Betume Vazios
RT – Resistência à Tração
SHRP – *Strategic Highway Research Program*
SMA – *Stone Matrix Asphalt*
Superpave – *Superior Performing Asphalt Pavement System*
VAG – Vazios no Agregado Graúdo
 VAG_{MC} – Vazios do Agregado Graúdo da Mistura Compactada
 VAG_{SC} – Vazios do Agregado Graúdo em estado Seco Compactado
VAM – Vazios no Agregado Mineral
 V_v – Volume de Vazios da mistura

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas, Símbolos e Siglas	ix
Sumário	x
 Capítulo 1	 1
<i>Introdução</i>	<i>1</i>
 Capítulo 2	 4
<i>Distribuição Granulométrica de Misturas Asfálticas</i>	<i>4</i>
2.1 Considerações Iniciais	4
2.2 Graduação Contínua	6
2.3 Graduação Descontínua	8
2.4 Graduação Bailey	9
 Capítulo 3	 10
<i>Especificações Superpave</i>	<i>10</i>
3.1 Considerações Iniciais	10
3.2 Princípios Básicos	11
3.3 Distribuição Granulométrica	12
3.4 Requisitos Volumétricos de Misturas Asfálticas Superpave	14
 Capítulo 4	 19
<i>Método Bailey</i>	<i>19</i>
4.1 Considerações Iniciais	19
4.2 Compactação de Agregados	20
4.3 Agregado Graúdo e Fino	21
4.4 Combinação dos Agregados pelo Volume	24
4.5 Propriedades de Compactação	25
4.5.1 Massa específica solta do agregado graúdo	25
4.5.2 Massa específica compactada do agregado graúdo	25
4.5.3 Massa específica escolhida para o agregado graúdo	26
4.5.4 Massa específica compactada do agregado fino	29
4.6 Seleção Granulométrica para Misturas Asfálticas	29
4.7 Análise da mistura calculada	30
4.8 Parâmetros do Método Bailey	31
4.8.1 Proporção de agregados graúdos (Proporção AG)	31
4.8.2 Proporção graúda dos agregados finos (Proporção GAF)	33
4.8.3 Proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF)	34
4.8.4 Resumo das Proporções	34
4.8.5 Efeitos de mudanças na massa específica escolhida	35
4.8.6 Efeitos de mudanças na Proporção AG	36

4.8.7 Efeitos de mudanças na Proporção GAF e FAF	37
4.8.8 Os quatro parâmetros do Método Bailey	37
4.9 Princípios do Método Bailey e Misturas de Graduação Fina.....	38
4.9.1 Volume de agregado graúdo	39
4.9.2 Processos para seleção de misturas finas pelo Método Bailey	39
4.9.3 Determinação dos novos fatores	39
4.10 Avaliação de Misturas Asfálticas Existentes através do Método Bailey	41
4.11 Avaliação de Misturas Asfálticas Convencionais de Graduação Densa pelo Método Bailey	42
Capítulo 5	44
<i>Materiais e Métodos</i>	44
5.1 Fatores e Variáveis Dependentes	44
5.2 Materiais.....	49
5.2.1 Agregados	49
5.2.2 Ligante Asfáltico.....	50
5.2.3 Misturas Asfálticas.....	50
5.3 Métodos de Ensaio	53
5.3.1 Ensaio Marshall.....	53
5.3.2 Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática	53
5.3.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	55
5.3.4 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral	55
5.3.5 Programa computacional para controle dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e compressão diametral dinâmica.....	57
Capítulo 6	59
<i>Apresentação e Análise dos Resultados</i>	59
6.1 Considerações iniciais.....	59
6.2 Verificação do Intertravamento do Agregado Graúdo.....	59
6.3 Ensaio Marshall.....	60
6.4 Módulo de Resiliência e Tração por Compressão Diametral.....	66
6.5 Ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial Estática.....	69
6.5.1 Análise dos resultados referentes ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática das misturas Bailey originais e das misturas AZR... 84	
6.5.2 Análise dos resultados referentes ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática das misturas Bailey modificadas	85
Capítulo 7	88
<i>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	88
7.1 Conclusões	88
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	89
Referências Bibliográficas	91
Anexo	96
<i>Exemplo de Seleção Granulométrica pelo Método Bailey</i>	96

Capítulo 1

Introdução

A extensão total das rodovias pavimentadas no Brasil é de aproximadamente 165.000 km e de não pavimentadas cerca de 1.725.000 km (GEIPOT, 2000). Como a maioria destas rodovias, bem como aeroportos e vias urbanas pavimentadas no Brasil, possuem revestimento asfáltico, algo em torno de 90% (SÁ, 1996), estudos a respeito de misturas asfálticas são de grande importância para a melhoria das vias existentes e construção de novas.

Uma mistura asfáltica, em seu período de vida útil, deve apresentar adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga. A deformação permanente, causada pelo número repetido de solicitações de carga do tráfego, também é função da temperatura, que altera a viscosidade do cimento asfáltico. Em condições de temperatura elevada, a estrutura de agregado, que em uma situação normal de trabalho já é a principal responsável pela resistência ao cisalhamento de um concreto asfáltico, fica responsável por praticamente toda a resistência à carga do tráfego (ROBERTS *et al.*, 1991).

Além do efeito prejudicial das altas temperaturas, o volume de tráfego, as cargas por eixo e a pressão de enchimento dos pneus vêm aumentando consideravelmente e, diante disso, mudanças devem ser feitas para que se possa conseguir um pavimento adequado às atuais solicitações, capaz de resistir à deformação permanente, às trincas por fadiga e ao desgaste.

Misturas asfálticas resistentes às atuais solicitações devem, além de utilizar materiais adequados, com melhores propriedades físicas como forma, textura superficial e angularidade, utilizar um método de seleção granulométrica que garanta uma forte estrutura de agregados e, simultaneamente, permita um teor de ligante suficiente para uma boa durabilidade.

Na dosagem de misturas asfálticas, muitas têm sido as experiências para determinação de uma combinação de agregados que resulte em uma estrutura resistente, sem comprometer a durabilidade. Tais estudos têm abordado, dentre outros aspectos, o volume de vazios, os vazios no agregado mineral, a relação betume-vazio e os vazios no agregado graúdo.

Os materiais granulares, quando compactados, sempre apresentam vazios entre suas partículas. A porcentagem do volume que pode ser preenchida pelo ligante asfáltico depende da forma, textura, angularidade e distribuição dos tamanhos (distribuição granulométrica) das partículas, além do tipo e quantidade de energia de compactação aplicada.

O Método Superpave de dosagem de misturas asfálticas avalia as propriedades dos agregados e dos ligantes asfálticos e, para as misturas asfálticas, assim como outros métodos (Marshall e Hveen, por exemplo), possui um elenco de ensaios e procedimentos que dão suporte às especificações. Apresenta, também procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores (polímeros e borracha de pneus, por exemplo) e oferece um sistema para controle da construção. Entretanto, o método Superpave não apresenta um critério de seleção sistemática da distribuição granulométrica dos agregados.

Dada a importância dos agregados para o bom desempenho de misturas asfálticas, estuda-se, neste trabalho, o método Bailey, que é um procedimento de seleção e avaliação granulométrica que considera o intertravamento dos agregados graúdos como o esqueleto da mistura de agregados.

O método Bailey define agregado graúdo e fino, permitindo ajustes na quantidade de vazios na mistura em função da porcentagem de cada material. Combina os agregados pelo volume, considerando a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas como sendo dependente, principalmente, do intertravamento dos agregados graúdos, que é um parâmetro obtido através de ensaios de massa específica solta e compactada.

Trata-se de um método sistemático de seleção granulométrica, que procura garantir uma forte estrutura de agregado para resistir à deformação permanente, associada com um adequado volume de vazios que permita uma quantidade de ligante suficiente para uma boa resistência ao desgaste.

Os objetivos desta pesquisa são analisar os efeitos da graduação dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, comparar os resultados de misturas selecionadas granulometricamente através do Método Bailey com outras, selecionadas por métodos convencionais, e verificar a aplicabilidade de certos fatores ou parâmetros adotados pelo Método Bailey para a composição e avaliação de uma distribuição granulométrica.

No Capítulo 2 são apresentados os tipos e peculiaridades de distribuições granulométricas de misturas asfálticas. O Capítulo 3 apresenta uma síntese do Método Superpave, com ênfase nos ensaios e critérios relacionados aos agregados. No Capítulo 4 é apresentado, em detalhes, o Método Bailey, principal objeto de estudo deste trabalho.

O Capítulo 5 descreve os materiais e métodos empregados nesta pesquisa. No Capítulo 6 é feita a apresentação e análise dos resultados. E, finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Distribuição Granulométrica de Misturas Asfálticas

2.1 Considerações Iniciais

A graduação de agregados é a distribuição das partículas, por tamanhos, expressa em função da porcentagem em peso ou volume total da mistura. Embora a graduação por volume seja mais útil, a graduação em peso é mais usada por ser mais prática. A graduação por volume pode ser considerada aproximadamente igual à graduação por peso, se as massas específicas dos agregados usados forem aproximadamente iguais.

O desempenho, a curto, médio e longo prazo de uma mistura asfáltica está relacionado com a sua graduação. Ela afeta quase todas as propriedades importantes de uma mistura asfáltica, como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, a resistência à deformação permanente e a resistência aos danos causados pela umidade. Portanto, a graduação, assim como as especificações a ela relacionadas, deve ser considerada como sendo o primeiro passo para a elaboração de uma mistura asfáltica.

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

FIGURA 1 – Tipos de curvas granulométricas para misturas asfálticas (ROBERTS *et al.*, 1991)

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

Dentre os vários tipos de graduação para misturas asfálticas, destacam-se as misturas com graduação contínua, onde a resistência é alcançada através da maior densidade possível, e as graduações descontínuas, onde o agregado graúdo forma um esqueleto como estrutura resistente da mistura, como mostra a Figura 2.

FIGURA 2 – Exemplo de uma mistura asfáltica de graduação descontínua (SMA) e de uma mistura asfáltica de graduação contínua. (NAPA, 2002)

2.2 Graduação Contínua

Uma graduação onde as partículas de agregados ficassem completamente adensadas seria a melhor em termos de estabilidade, devido ao aumento do contato entre as partículas e à diminuição dos vazios na mistura. Porém, é necessário um volume de vazios suficiente para a adição do ligante asfáltico, capaz de assegurar maior coesão e durabilidade à mistura, além de um adequado volume de vazios necessário para evitar a exsudação do ligante asfáltico e/ou a deformação permanente da mistura sob as cargas do tráfego. Ou seja, uma mistura asfáltica com baixo volume de vazios é mais sensível a pequenas variações na quantidade de asfalto e, portanto, mais susceptível à exsudação e à deformação permanente.

O método mais usado para se alcançar a máxima densidade possível é a curva de Fuller proposta por Fuller & Thompson¹ apud Roberts *et al.* (1991). A equação para a curva de máxima densidade de Fuller é:

$$P = 100 \times \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

onde:

P = porcentagem passante na peneira de diâmetro **d**;

D = tamanho máximo do agregado;

n = expoente empírico.

Estudos feitos por Fuller e Thompson mostram que a máxima densidade de uma mistura pode ser obtida quando $n = 0,5$. Entretanto, Goode & Lufsey² apud Roberts *et al.*, (1991) mostram que o uso do expoente 0,5 pode resultar em baixo volume de vazios no agregado mineral (VAM), insuficiente para permitir uma adequada quantidade de asfalto, necessária para uma boa durabilidade da mistura.

Segundo Roberts *et al.*, (1991), no começo dos anos 60, o *Federal Highway Administration* (FHWA) apresentou uma representação gráfica para a graduação de agregados baseada na graduação de Fuller, mas usando o expoente 0,45 na equação. Essa representação é muito útil para a determinação da linha de máxima densidade e para o ajuste da graduação dos agregados. Para determinação da curva de densidade máxima basta traçar uma linha da origem, no canto inferior esquerdo, até o canto superior direito, onde é o ponto de tamanho máximo dos agregados, em porcentagem. O tamanho máximo dos agregados é definido como sendo o menor diâmetro do jogo de peneiras em que 100% do material passa. O FHWA recomenda o gráfico de expoente 0,45 como parte da dosagem de misturas asfálticas.

¹ Fuller, W. B. e S. E. Thompson (1907). The Laws of Proportioning Concrete. *Journal of Transportation Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 59.

²Goode, J. F. e L. A. Lufsey (1962). Graphical Chart for Evaluating Aggregates Gradation. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 31.

Uma graduação com densidade máxima pode não conter uma quantidade suficiente de vazios, necessários para que haja uma adequada espessura de película de cimento asfáltico envolvendo as partículas de agregado. Portanto, para se conseguir uma adequada quantidade de vazios na mistura asfáltica, a graduação deve estar a uma certa distância da linha de densidade máxima.

Para alcançar um volume adequado de vazios no agregado mineral (VAM), os organismos rodoviários tentam estabelecer curvas granulométricas que sejam aproximadamente paralelas à linha de densidade máxima, mas com alguns pontos acima e abaixo. Assim, por exemplo, no caso de areias naturais arredondadas, que são materiais de baixa qualidade para o uso em misturas asfálticas, é melhor quando o trecho da curva granulométrica passa abaixo da linha de densidade máxima para diminuir os efeitos da areia natural arredondada na mistura. Por outro lado, o trecho da curva granulométrica composta de material britado, com características cúbicas e angulares, deveria passar acima da linha de densidade máxima, para utilizar os benefícios deste material (ROBERTS *et al.*, 1991).

2.3 Graduação Descontínua

Ao contrário da graduação contínua, uma mistura asfáltica de graduação descontínua, como uma mistura SMA (Stone Matrix Asphalt) ou CMHB (Coarse Matrix High Binder), resiste às cargas do tráfego não com a máxima densidade possível e sim com uma grande quantidade de agregado graúdo formando o esqueleto da mistura. Com um forte contato entre as partículas de agregado graúdo, a resistência à deformação permanente aumenta e a dependência do tipo e/ou quantidade de asfalto diminui. No caso de uma mistura SMA ou CMHB, a mistura é descontínua por apresentar uma grande proporção de agregado graúdo e filer mineral, e uma pequena proporção de agregados médios (IZZO *et al.*, 1997).

Uma mistura descontínua SMA ou CMHB possui maior quantidade de asfalto que misturas contínuas. Essa maior quantidade de asfalto, juntamente com a grande quantidade de filer, preenchem os vazios deixados pelo esqueleto de agregado graúdo e contribuem muito para a resistência ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga.

Em qualquer tipo de mistura, as propriedades físicas dos agregados (forma, textura superficial, angularidade etc.) têm grande importância no seu desempenho. Em misturas descontínuas, a importância da qualidade dos agregados é ainda maior, pois o esqueleto de agregado graúdo é que suporta as cargas do tráfego. As partículas de agregado graúdo em contato umas com as outras são as responsáveis pela resistência à deformação permanente e, portanto, devem ser bem resistentes.

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 filler e asfalto aumenta a resistência ao desgaste.

2.4 Graduação Bailey

O Método Bailey de seleção granulométrica tenta unir os benefícios das misturas densas com os das misturas descontínuas. Através da distribuição granulométrica dos agregados, suas respectivas massas específicas e de um ensaio simples (massa específica solta e compactada), que fornece as características de compactação de cada fração de agregado em uma mistura, o Método Bailey faz a seleção da distribuição granulométrica ideal, assegurando a resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos agregados graúdos e a resistência ao desgaste pelo maior teor de ligante devido ao adequado volume de vazios (VAVRIK *et al.*, 2002a).

Especificações Superpave

3.1 Considerações Iniciais

O Método Superpave é resultado das pesquisas feitas pelo programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), entre 1987 e 1993, sobre os materiais utilizados em pavimentos asfálticos. O Programa SHRP, coordenado pelos Estados Unidos, contou com a participação de 22 países, inclusive o Brasil, e teve um orçamento inicial de 150 milhões de dólares (SHRP, 1993). Desenvolveu métodos de análises de materiais betuminosos e misturas asfálticas com base em propriedades fundamentais, diretamente relacionadas com o desempenho dos pavimentos em serviço. As misturas Superpave são dosadas volumetricamente, sendo controladas por propriedades dos agregados e pelo equilíbrio dos volumes de vazios, de asfalto e de agregados (HUBER *et al.*, 1998).

Mais de 75% dos Departamentos de Estradas de Rodagem dos Estados Unidos usavam, até 1995, o Método Marshall para dosagem de misturas asfálticas, assim como o Brasil ainda o usa amplamente até hoje. Porém, desde então, o Método Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement System*) vem sendo adotado pelos Departamentos de Estradas de Rodagem dos Estados Unidos, sendo, hoje em dia, o método de dosagem de misturas asfálticas usado nos Estados Unidos (ROBERTS *et al.*, 1995).

3.2 Princípios Básicos

O método Superpave consiste de um novo método de dosagem de misturas asfálticas, com novas especificações e novos ensaios para ligantes e misturas asfálticas, o que inclui procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores, como polímeros ou borracha de pneu. Propõe ainda um sistema para controle de qualidade da construção.

O programa SHRP visou principalmente a avaliação de ligantes asfálticos, o 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 mistura e, para tanto, um grupo de especialistas fez uma abordagem consensual, estabelecendo recomendações para as propriedades necessárias aos agregados em função dos vários níveis de tráfego.

Foi afirmado, como já era de se esperar, por esse grupo de pesquisadores, que as propriedades dos agregados influenciam diretamente o desempenho de misturas asfálticas quanto à deformação permanente e que as trincas por fadiga e de origem térmica são menos influenciadas. As propriedades dos agregados de maior interesse no estudo de misturas asfálticas foram subdivididas em propriedades de consenso e propriedades de origem (FERNANDES JR. *et al.*, 2000).

As propriedades de consenso foram assim chamadas por serem resultado de um entendimento entre os pesquisadores quanto ao seu uso e seus valores de especificação. São propriedades importantes para o bom desempenho das misturas asfálticas e todas devem ser atendidas. As propriedades de consenso do Método Superpave são:

- Angularidade do agregado grosso;
- Angularidade do agregado fino;
- Partículas planas e alongadas;
- Teor de argila.

As propriedades de origem foram assim chamadas por serem dependentes da origem dos materiais. Assim, cada organismo rodoviário pode estabelecer os valores pertinentes às propriedades de origem, de acordo com os materiais disponíveis. São propriedades que podem ser usadas como critério de aceitação:

- Dureza;
- Sanidade;
- Materiais deletérios.

Os ensaios para caracterização dos agregados foram escolhidos, pelo programa SHRP, dentre os ensaios existentes, sendo feitas recomendações específicas a respeito de cada ensaio e, eventualmente, modificações em procedimentos e/ou critérios.

3.3 Distribuição Granulométrica

No método Superpave, as curvas de distribuição granulométrica são representadas num gráfico onde a ordenada, numa escala aritmética, indica a porcentagem total passante, em peso, em uma determinada peneira, enquanto a abscissa representa o tamanho das peneiras ASTM (em mm) elevadas à potência 0,45 (Figura 3).

Existem ainda duas características do gráfico Superpave para distribuição granulométrica: os pontos de controle e a zona de restrição (Figura 3), sendo que toda mistura dimensionada pelo método Superpave deve passar entre os pontos de controle e evitar cruzar a zona de restrição.

Os pontos de controle são limites fixados nas peneiras de diâmetro máximo, diâmetro máximo nominal, uma peneira abaixo do diâmetro máximo nominal e nas peneiras 2,36mm e 0,075mm, para que a curva granulométrica satisfaça os requisitos do Superpave, como exemplificam a Tabela 1 e a Figura 3 para um diâmetro máximo nominal (DMN) de 12,5mm.

TABELA 1 – Exemplo de especificação granulométrica Superpave - DMN 12,5mm

Peneiras (mm)	Pontos de Controle		Limites da Zona de Restrição	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0	100	100	-	-
12,5	90	100	-	-
9,5	-	90	-	-
4,75	-	-	-	-
2,36	28	58	39,1	39,1
1,18	-	-	25,6	31,6
0,60	-	-	19,1	23,1
0,30	-	-	15,5	15,5
0,150	-	-	-	-
0,075	2	10	-	-

FIGURA 3 – Gráfico Superpave para determinação da distribuição granulométrica – DMN 12,5mm

As especificações Superpave para a distribuição granulométrica dos agregados variam de acordo com o diâmetro nominal dos agregados (9,5mm, 12,5mm, 19mm, 25mm e 37,5mm). Neste trabalho utiliza-se DMN = 12,5mm.

A zona de restrição fica entre as peneiras (4,75 ou 2,36mm) e 0,30mm, sobre a linha de densidade máxima. É recomendado não ultrapassar essa zona quando houver uma grande quantidade de agregado fino de areia natural, que pode apresentar um baixo volume de vazios (VAM). A zona de restrição pode ser ultrapassada sem prejudicar o desempenho da mistura asfáltica se os agregados finos não forem excessivamente arredondados e o VAM mínimo for satisfeito (GOUVEIA, 2002).

3.4 Requisitos Volumétricos de Misturas Asfálticas Superpave

A distribuição granulométrica, objeto de estudo deste trabalho, afeta diretamente o desempenho de misturas asfálticas. Entretanto, o método Superpave, que não possui um método sistemático de avaliação da composição granulométrica de agregados, avalia apenas algumas características individuais dos agregados (propriedades de consenso e origem) e algumas propriedades volumétricas (VAM – Vazios no Agregado Mineral e RBV – Relação Betume Vazios) das misturas asfálticas prontas.

A porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM) e a porcentagem de cimento asfáltico interferem diretamente no volume de vazios de uma mistura asfáltica. O volume de vazios é um fator muito importante para a dosagem de misturas asfálticas (CROSS & BROWN, 1992), pois misturas asfálticas com volume de vazios menor que 2,5% são propensas à deformação permanente, independentemente das outras propriedades da mistura. O Superpave indica um volume de vazios de 4% para o projeto de uma mistura, enquanto no Brasil adota-se, geralmente, volume de vazios entre 4 e 6% para camadas de ligação (*binder*) e entre 3 e 5% para camadas de revestimentos asfálticos (NBR 12891/93).

O volume de vazios do agregado mineral (VAM) depende da distribuição granulométrica, da quantidade de fíler mineral ou material passante na peneira 0,075mm, do grau de compactação, da forma, da textura e da angularidade dos agregados (COMINSKY *et al.*, 1998). É a soma dos vazios mais o asfalto efetivo na mistura compactada, ou seja, descontando-se o asfalto que é absorvido pelos agregados. Sendo assim, o VAM representa os vazios entre as partículas de agregado e é expresso em porcentagem do volume aparente da mistura compactada.

Para misturas asfálticas, o método Superpave propõe 4% de volume de vazios e relação betume vazios (RBV), que são os vazios do agregado mineral (VAM) preenchidos com asfalto, entre 75 e 80%. O Superpave estabelece valores mínimos para o VAM, de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura, como mostra a Tabela 2. Misturas de graduação densa, com o VAM abaixo dos valores especificados, podem apresentar problemas de durabilidade, pois podem não conter vazios suficientes para a adição da quantidade adequada de ligante asfáltico.

TABELA 2 - Requisitos de VAM da especificação Superpave

Diâmetro Máximo Nominal (DMN) da mistura (mm)	VAM mínimo (%)
9,5	15
12,5	14
19	13
25	12
37,5	11

(COMINSKY *et al.*, 1998)

O VAM pode ser aumentado seguindo qualquer das recomendações de Cominsky *et al.* (1998):

- Afastar a curva granulométrica da linha de densidade máxima;
- Reduzir a porcentagem de material passante na peneira 0,150mm (#100);
- Aumentar a quantidade de material passante na peneira 4,75mm (#4) e retido na 0,150mm (#100);
- Usar agregados com partículas mais angulares, controlando-se a porcentagem passante na peneira 0,075mm (#200) e substituindo os agregados finos arredondados por britados.

Analogamente, o VAM pode ser diminuído seguindo qualquer das recomendações seguintes (COMINSKY *et al.*, 1998):

- Aumentar a quantidade de filer mineral na mistura;
- Usar areia natural com partículas arredondadas como agregado fino da mistura;
- Usar partículas arredondadas ou cúbicas na fração grossa dos agregados.

O método Superpave propõe como critério de projeto uma determinada quantidade de filer mineral para misturas asfálticas, expressa em porcentagem do peso total da mistura, calculado como sendo a razão entre a porcentagem em peso do agregado passante na peneira 0,075mm e o teor efetivo de asfalto. O teor efetivo de asfalto é a quantidade de asfalto usado na mistura descontando-se o asfalto que é absorvido pelo agregado. É recomendado que o filer mineral fique entre 0,6 e 1,2 para qualquer tipo de mistura (MOTTA *et al.*, 1996).

Quando da implementação do método Superpave nos EUA houve dificuldade para atender, em certos casos, o VAM mínimo especificado. Em misturas de graduação grossa, que passam abaixo da zona de restrição (caso das misturas Bailey, objeto de estudo desta pesquisa), Kandhal *et al.* (1998) mostram que o VAM mínimo recomendado é inadequado, penalizando as misturas que apresentam baixos valores de VAM. Misturas de graduação grossa, usadas em rodovias com alto volume de tráfego, e o aumento do esforço de compactação pelo uso do compactador giratório podem resultar em menores valores de VAM, sem comprometer o desempenho.

Segundo Kandhal *et al.* (1998), o mesmo VAM desenvolvido para misturas densas dosadas pelo método Marshall é o mínimo requisitado pelo Superpave. A especificação de VAM mínimo visa garantir a durabilidade da mistura, através de uma quantidade mínima de asfalto na mesma. Porém, a durabilidade de misturas asfálticas está estreitamente ligada à espessura da película de ligante asfáltico que recobre o agregado. Sendo assim, o VAM mínimo deveria ser baseado na espessura de película de asfalto que recobre os agregados, pois a espessura varia de acordo com a graduação da mistura. Kandhal *et al.* (1998) propõem, também, um ajuste na especificação Superpave para o VAM, principalmente para graduações graúdas, sendo que tal ajuste se dá por meio de um fator que deve subtrair os limites Superpave para o VAM. A Tabela 3 mostra os fatores propostos para correção do VAM, em função do diâmetro máximo nominal da mistura, visando a obtenção de uma espessura de recobrimento de 8 μ m.

TABELA 3 - Fatores para correção do VAM

Diâmetro máximo nominal (mm)				
37,5	25	19	12,5	9,5
0,5	1,0	1,5	1,5	2,0

(KANDHAL *et al.*, 1998)

É recomendado por Kandhal *et al.* (1998) que, como último passo no projeto de uma mistura asfáltica pelo método Superpave, seja verificado se a espessura de ligante que recobre os agregados é de no mínimo 8 μ m.

Segundo Roberts *et al.* (1991) a espessura de ligante asfáltico pode ser determinada da seguinte forma:

$$T_F = \frac{V_{asf} \times d_{asf}}{SA \times W} \times (9,29 \times 10^6) \quad (2)$$

onde:

T_F = Espessura média de ligante asfáltico (μm);

V_{asf} = Volume efetivo de ligante asfáltico (cm^3);

d_{asf} = Massa específica do ligante asfáltico (g/cm^3)

SA = Área superficial do agregado (cm^2/g);

W = Massa do agregado (g).

O volume efetivo de ligante asfáltico (V_{asf}) é a quantidade média de material necessária para cobrir os agregados descontando a quantidade absorvida pelos agregados, ou seja, é a quantidade de ligante asfáltico adicionado à mistura menos a quantidade absorvida pelos agregados.

A relação betume vazios (RBV), ou os vazios preenchidos com asfalto, é outro requisito volumétrico de misturas Superpave. O RBV é definido como sendo a porcentagem de VAM que contém asfalto. O RBV afeta a durabilidade e a flexibilidade do pavimento asfáltico e, portanto, as misturas asfálticas devem se enquadrar numa faixa de RBV para a garantia de uma quantidade suficiente de asfalto que assegure uma adequada película de asfalto recobrindo as partículas de agregado, de forma a evitar o envelhecimento e endurecimento, mas sem excesso, pois ligante demais também é prejudicial à mistura, além de aumentar o custo.

Geralmente, o valor ótimo de RBV é atingido quando a mistura se enquadra nos valores de VAM especificados em função do diâmetro máximo nominal e possui 4% de vazios. Misturas com RBV menor que 65% podem levar ao endurecimento prematuro ou excessivo de misturas asfálticas projetadas para rodovias com volume de tráfego médio a alto, causando trincas por fadiga e desgaste do revestimento asfáltico. Já misturas com RBV maior que 85% são propensas à exsudação, corrugação e deformação permanente. Diante disso, Cominsky *et al.* (1998) indicam 75% de RBV como o ideal.

No Brasil, o RBV indicado para camadas de revestimento fica entre 75 e 82% e, para camadas de ligação (binder), entre 65 e 72% (NBR 12891/93). A Tabela 4 mostra os valores de RBV para misturas Superpave projetadas com 4% de vazios, em função do volume de tráfego.

TABELA 4 - Requisitos Superpave para RBV

Tráfego (ESALs)	RBV de projeto (%)
$< 3 \times 10^5$	70 – 80
$< 3 \times 10^5$	65 – 78
$< 1 \times 10^8$	65 – 75
$> 1 \times 10^8$	65 – 75

(COMINSKY *et al.*, 1998)

Método Bailey

4.1 Considerações Iniciais

O Método Bailey foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), e vem sendo usado desde o início da década de 80. Vavrik *et al.* (2002a, 2002b, 2001 e 2000), principalmente, vêm refinando o método, fazendo com que ele se torne aplicável a qualquer mistura, independentemente do tamanho máximo do agregado. Este capítulo é baseado nos estudos de Vavrik *et al.* (2002, 2001 e 2000) a respeito de misturas asfálticas selecionadas granulometricamente pelo Método Bailey.

O concreto asfáltico é um material composto de partículas de agregado de diferentes tamanhos, asfalto e vazios, cujo desempenho, em termos de deformações permanentes, trincas por fadiga e desgaste, quando submetido às solicitações do tráfego e climáticas, depende das propriedades e proporção de cada um dos seus materiais constituintes.

O agregado em um concreto asfáltico pode ser considerado como o esqueleto da mistura, pois ele é o responsável pela maior parte da resistência às cargas do tráfego. As propriedades desse esqueleto estão relacionadas, principalmente, com a dureza, a textura superficial, a angularidade, a forma e a distribuição granulométrica dos agregados.

O método Bailey de seleção granulométrica relaciona-se diretamente com as características de compactação de cada fração, com os vazios no agregado mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv). Ele seleciona a estrutura de agregados da mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos e pode ser usado com qualquer método de dosagem de misturas asfálticas (Superpave, Marshall, Hveem etc.).

A seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas vem sendo feita através de tentativas e erros, sendo, geralmente, usadas distribuições granulométricas desenvolvidas através de anos de experiência. O trabalho feito pelo National Center for Asphalt Technology (BROWN e MALLICK, 1994) a respeito de misturas SMA (Stone Matrix Asphalt) é muito útil para a determinação do grau de intertravamento. A comparação dos vazios no agregado graúdo (VAG) na condição seca e compactada também é útil para a avaliação do intertravamento em misturas densas.

O Método Bailey possibilita o intertravamento do agregado graúdo, se desejado, e uma boa compactação dos agregados. O intertravamento dos agregados é dado de entrada para os cálculos, sendo o responsável pela resistência à deformação permanente da mistura. Para assegurar uma quantidade ideal de asfalto, os vazios no agregado mineral (VAM) podem variar mudando-se a quantidade de agregados graúdo e fino na mistura. Desta forma, misturas selecionadas granulometricamente pelo Método Bailey podem ter um esqueleto de agregados com alta estabilidade e um volume adequado de VAM para uma boa durabilidade.

4.2 Compactação de Agregados

Os materiais granulares, mesmo quando compactados, apresentam vazios entre suas partículas. Os vazios do agregado mineral dependem da forma, textura, angularidade, resistência e distribuição dos tamanhos das partículas (distribuição granulométrica), além do tipo e quantidade de energia de compactação aplicada. A dureza dos agregados afeta diretamente a resistência à degradação das misturas, que ocorre desde o momento da compactação até a aplicação das cargas pelo tráfego.

Vários tipos de energia de compactação podem ser usados, como, por exemplo; pressão estática, de impacto (soquete Marshall) ou cisalhante (compactador giratório). Aumentando o esforço de compactação, através de maior pressão estática, mais golpes do soquete Marshall ou mais revoluções do compactador giratório, a densidade da mistura tende a aumentar.

De forma geral, uma mistura com partículas de vários tamanhos é mais densa que outra com apenas um tamanho de agregado, partículas planas e alongadas tendem a dificultar a compactação, partículas cúbicas tendem a se arranjar melhor e partículas lisas, ao contrário das rugosas, se reorientam mais facilmente.

4.3 Agregado Graúdo e Fino

A ASTM (C 294, 1989) considera agregado graúdo todo material retido na peneira 4,75mm e, conseqüentemente, é considerado material fino todo material que passa nessa mesma peneira. Existem outras agências que usam a peneira 2,38mm (por exemplo, o Instituto do Asfalto) ou a de 2,00mm para a divisão entre agregado graúdo e fino. De qualquer forma, a mesma peneira de separação é usada, em cada agência, para todas as graduações, desde um material com Diâmetro Máximo Nominal (DMN) de 9,5mm até 37,5mm, por exemplo.

No Método Bailey, a definição de agregado graúdo e fino é mais específica, de modo a determinar a compactação e o intertravamento do agregado através da combinação de agregados de vários tamanhos. De acordo com a definição do Método Bailey, são considerados agregados graúdos as partículas que acondicionadas em um certo volume criam vazios que podem ser preenchidos por agregados de menor tamanho. Assim sendo, todas as partículas que preenchem os vazios deixados pelo agregado graúdo são consideradas agregados finos.

Com essa definição, é necessário mais do que uma peneira de controle para a divisão entre agregado graúdo e fino, e essas peneiras vão depender do diâmetro máximo nominal da mistura. O Diâmetro Máximo Nominal (DMN) é definido, segundo a especificação Superpave, como a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% de material.

Como decorrência da definição de grãos e finos do Método Bailey, em uma mistura com DMN 37,5mm, por exemplo, as partículas de 9,5mm são consideradas agregado fino, pois preenchem os vazios deixados pelas partículas de 37,5mm, enquanto em uma mistura com DMN 12,5mm, as partículas com 9,5mm de diâmetro são consideradas agregado grão.

No Método Bailey, a peneira que define a divisão entre agregado grão e fino é chamada de Peneira de Controle Primário (PCP), sendo baseada no diâmetro máximo nominal (DMN) da mistura, como mostra a Figura 4. A PCP é considerada como sendo a peneira com o diâmetro de abertura mais próximo do resultado da Equação 3.

$$PCP = DMN \times 0,22 \quad (3)$$

onde:

PCP = Peneira de Controle Primário;

DMN = Diâmetro Máximo Nominal.

Deve-se destacar que o fator 0,22 usado para a determinação das peneiras de controle resultou de análises, em duas e três dimensões, da compactação de agregados de diferentes formas, que mostraram que a razão do diâmetro das partículas entre 0,18 e 0,28 seria a ideal para os diferentes tipos de agregados, tendo-se, então, adotado o valor 0,22 como padrão.

As análises em duas dimensões foram baseadas em quatro combinações de características geométricas dos agregados, em que cada uma apresentou um valor para o fator de compactação das partículas. Este fator é a razão entre o diâmetro das partículas grãos, que criam vazios, e as partículas finas, que preenchem vazios.

As análises de combinações de faces arredondadas e planas resultaram nos seguintes fatores:

- Partículas com todas as faces arredondadas: 0,15;
- Duas faces arredondadas e uma face plana: 0,20;

- Uma face arredondada e duas faces planas: 0,24;
- Partículas com todas as faces planas: 0,29.

FIGURA 4 – Exemplo de divisão entre agregado graúdo e fino em uma mistura com DMN 19,0mm (VAVRIK *et al.*, 2002)

As análises em três dimensões foram baseadas nos vazios criados por esferas e isso não representa as características dos agregados constituintes de uma mistura asfáltica, composta de partículas irregulares. Das análises com esferas, o valor do fator de compactação das partículas variou de 0,15 (proveniente da disposição tetraédrica das esferas) a 0,42 (proveniente da disposição cúbica das esferas), conforme mostrado na Figura 5.

Embora o fator de compactação das partículas varie de acordo com as características físicas das partículas constituintes da mistura (forma, textura, angularidade etc.), por simplificação o fator 0,22 é adotado para as diversas formas de partículas de uma mistura asfáltica.

FIGURA 5 – Representação dos arranjos considerados por Vavrik *et al.*, 2002

4.4 Combinação dos Agregados pelo Volume

Todas as misturas asfálticas contêm vazios que são função, dentre outros fatores, das características de compactação da mistura. Na composição da mistura é possível determinar a quantidade de vazios deixados pelos agregados graúdos e preenchê-los com a quantidade apropriada de agregado fino.

Os métodos de dosagem de misturas asfálticas são baseados em análises volumétricas, mas para simplificar são combinados por peso. Muitos métodos de dosagem corrigem a porcentagem passante em peso pela porcentagem passante em volume, quando existem diferenças significativas entre as densidades dos agregados.

Para cada agregado graúdo da mistura (por exemplo: Pedra 1 e pedrisco) deve ser determinada a sua massa específica solta e compactada e, para cada agregado fino (por exemplo: pó de pedra), apenas a massa específica compactada. Esses dados volumétricos representam como os agregados se arranjam estruturalmente, formando vazios. Eles são necessários para a avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados.

4.5 Propriedades de Compactação

4.5.1 Massa específica solta do agregado graúdo

A massa específica solta é a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente (Figura 6), sem qualquer tipo de esforço de compactação, o que representa a situação de mínimo contato entre partículas. O volume do recipiente a ser utilizado varia de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura.

FIGURA 6 – Representação do conceito de massa específica solta do agregado graúdo (VAVRIK *et al.*, 2002)

É preciso determinar a massa específica solta para cada agregado graúdo constituinte da mistura (Ex: Pedra 1 e pedrisco), usando a norma AASHTO T-19/T 19M-93 (1997). A massa específica solta é calculada dividindo-se o peso do recipiente preenchido com os agregados pelo volume do recipiente. O volume de vazios para a condição solta é determinado usando-se a massa específica e a massa específica solta dos agregados. A condição solta representa o volume de vazios da mistura quando as partículas estão apenas em contato, sem a aplicação de qualquer tipo de esforço de compactação.

4.5.2 Massa específica compactada do agregado graúdo

A massa específica compactada, assim como a massa específica solta, é a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente (Figura 7), que varia de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura, através de um esforço de compactação que diminui os vazios e aumenta o contato entre as partículas.

É preciso determinar a massa específica compactada para as frações graúda e fina constituintes da mistura, seguindo o indicado na AASHTO T-19/T 19M-93 (1997). A massa específica compactada é calculada dividindo o peso do recipiente preenchido com os agregados pelo volume do recipiente. O volume de vazios para a condição compactada é determinado usando a massa específica e a massa específica compactada dos agregados. A condição compactada representa o volume de vazios da mistura quando as partículas estão em maior contato que na condição solta, devido ao esforço de compactação aplicado por 25 golpes, em cada uma das três camadas, de uma haste metálica como indica a AASHTO T-19/T 19M-93 (1997).

FIGURA 7 – Representação do conceito de massa específica compactada do agregado graúdo (VAVRIK *et al.*, 2002)

4.5.3 Massa específica escolhida para o agregado graúdo

É preciso escolher o grau de intertravamento do agregado graúdo desejado para a mistura, chamado, pelo Método Bailey, de massa específica escolhida. Através da massa específica escolhida são determinados o volume de agregado graúdo da mistura e o seu grau de intertravamento.

No Método Bailey, é definido como graduação graúda toda mistura que apresenta um esqueleto de agregado graúdo. Uma mistura de graduação fina não possui uma quantidade suficiente de agregado graúdo para formar um esqueleto, sendo assim, as cargas aplicadas são suportadas pela estrutura de agregado fino. O valor da massa específica escolhida tem relação com o tipo de mistura desejada, como mostra a Figura 8.

FIGURA 8 – Esquema do método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos (VAVRIK *et al.*, 2002)

A massa específica solta é o limite inferior do intertravamento do agregado graúdo. Teoricamente, é a divisão entre uma mistura de graduação fina e outra de graduação graúda. Selecionando uma massa específica escolhida menor que a massa específica solta, por exemplo 90%, as partículas de agregado graúdo ficam espalhadas e não formam uma condição uniforme de contato entre partículas. Desse modo, a mistura tem um esqueleto de agregado fino e, conseqüentemente, as propriedades da mistura são relacionadas com as características dos agregados finos.

Por sua vez, a massa específica compactada é considerada, para misturas de graduação densa, como sendo o limite superior do intertravamento do agregado graúdo. Este valor é adotado geralmente como sendo 110% da massa específica solta. Não é aconselhável usar valores de massa específica escolhida próximos da massa específica compactada, pois pode dificultar a compactação da mistura asfáltica no campo devido à necessidade de maior esforço de compactação para atingir a densidade desejada.

A seleção da massa específica escolhida, para misturas de graduação densa, é feita a partir de uma porcentagem da massa específica solta do agregado graúdo. Se o intuito for obter um certo grau de intertravamento do agregado graúdo a porcentagem deve ficar entre 95% e 105% da massa específica solta. Para agregados mais susceptíveis à degradação, a massa específica escolhida deve ficar próxima de 105% da massa específica solta. Devem ser evitados valores acima de 105% da massa específica solta para não dificultar a compactação no campo e não aumentar a probabilidade de degradação do agregado.

Em misturas de graduação fina, para garantir que o esqueleto da mistura seja controlado pela estrutura de agregado fino, a massa específica escolhida deve ficar abaixo de 90% da massa específica solta. Uma visão mais detalhada sobre misturas de graduação fina, de acordo com o Método Bailey, pode ser observada no item 4.9.

Para as misturas densas não é recomendado usar a massa específica escolhida no intervalo entre 90% e 95% da massa específica solta. Pelo grau de tolerância da PCP, misturas produzidas nesse intervalo, quando aplicadas no campo, podem não resultar na graduação desejada, seja ela graúda ou fina.

Para a consolidação de uma mistura de agregados, devido ao efeito lubrificante do asfalto, é necessário mais do que selecionar a massa específica escolhida. Cada agregado graúdo contém uma certa quantidade de material fino e isso causa, no momento em que as massas específicas são determinadas, um ligeiro aumento, tanto na massa específica solta como na compactada, pois, após o processo de peneiramento, esse material fino pode ser perdido. Portanto, a massa específica escolhida pode, freqüentemente, ficar abaixo de 95% da massa específica solta e ainda apresentar um grau de intertravamento de agregado graúdo.

Pode haver, também, consolidação adicional, além da massa específica escolhida, decorrente de fatores como:

- forma, textura e resistência do agregado;
- quantidade de agregado fino, existente em cada agregado graúdo, no momento do ensaio de massa específica solta e compactada;
- relação entre a seleção da massa específica escolhida e a massa específica compactada do agregado graúdo;
- tipo de esforço de compactação aplicado (soquete Marshall, compactador giratório etc.);
- quantidade de esforço de compactação aplicado (número de golpes ou de giros).

Depois de selecionada a massa específica escolhida do agregado graúdo é determinada a quantidade de agregado fino para preencher os Vazios no Agregado Graúdo (VAG).

4.5.4 Massa específica compactada do agregado fino

Em misturas densas, os vazios criados pelo agregado graúdo, função da massa específica escolhida, são preenchidos por um volume de agregado fino, determinado através da massa específica compactada. A massa específica compactada é usada para garantir que a estrutura de agregado fino tenha adequada resistência.

É preciso determinar a massa específica compactada para cada agregado graúdo (por exemplo: Pedra 1 e pedrisco) e fino (por exemplo: pó de pedra) constituinte da mistura, seguindo o indicado na AASHTO T-19/T 19M-93 (1997). A massa específica compactada é calculada dividindo-se o peso do agregado pelo volume do recipiente preenchido. Em uma mistura de graduação densa, a massa específica compactada é usada para determinar a quantidade apropriada de agregado fino necessária para preencher os vazios deixados pelo agregado graúdo, através da condição da massa específica escolhida do agregado graúdo. Não é preciso selecionar a massa específica escolhida do agregado fino. Não são determinadas as massas específicas solta e compactada para materiais de preenchimento (filer).

4.6 Seleção Granulométrica para Misturas Asfálticas

As únicas informações adicionais necessárias, além das tipicamente usadas na seleção granulométrica de misturas asfálticas densas, são as massas específicas dos agregados graúdos e finos.

Devem ser determinadas:

- Massa específica de cada agregado;
- Massa específica solta dos agregados graúdos;
- Massa específica compactada dos agregados graúdos e finos;
- Massa específica escolhida para os agregados graúdos;
- Quantidade desejada dos agregados graúdos e finos;
- Quantidade desejada de material passante na peneira 0,075mm (#200);

Consta, em Anexo, um roteiro de como combinar agregados por volume e determinar a mistura granulométrica resultante, através do Método Bailey. Foi desenvolvida uma planilha eletrônica, que dinamiza bastante os cálculos e permite a simulação de vários tipos de misturas. Basicamente, para combinar os agregados através do Método Bailey deve-se:

1. Determinar a massa específica escolhida dos agregados graúdos;
2. Calcular o volume de vazios no agregado graúdo;
3. Determinar a quantidade de agregado fino para preencher o volume de vazios, usando a massa específica compactada dos agregados finos;
4. Usando a densidade de cada agregado, determinar a massa total e converter para porcentagens individuais de agregados;
5. Corrigir a quantidade de agregado graúdo em função da quantidade de agregado fino que ele apresenta e também corrigir a quantidade de agregado fino em função da quantidade de agregado graúdo presente na fração fina, para assim garantir uma mistura adequada, em volume, de agregados graúdo e fino;
6. Determinar as porcentagens ajustadas da mistura para cada agregado;
7. Se forem usados materiais de preenchimento (fíler), ajustar a porcentagem de agregado fino pela porcentagem desejada de fino, para assim garantir a mistura, em volume, de agregado graúdo e fino;
8. Determinar as porcentagens individuais revisadas dos agregados para o uso na mistura calculada.

4.7 Análise da mistura calculada

Depois de ser determinada a graduação, a mistura é dividida em três porções distintas, onde cada uma é avaliada individualmente. A porção graúda da mistura engloba desde a maior partícula até a PCP. O agregado fino, por sua vez, é dividido e analisado em duas porções. A divisão do agregado fino é feita através da multiplicação da PCP pelo fator 0,22, que fornece a Peneira de Controle Secundário (PCS), que faz uma divisão entre a fração graúda e fina do agregado fino. A fração fina do agregado fino é avaliada pela Peneira de Controle Terciário (PCT), que é determinada multiplicando-se a PCS pelo fator 0,22.

Para a avaliação da compactação de cada uma das três porções de graduação selecionada, o Método Bailey define três parâmetros:

- Proporção de agregados graúdos (Proporção AG);
- Proporção graúda dos agregados finos (Proporção GAF);
- Proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF).

A Figura 9 mostra uma representação da divisão e classificação das porções de agregados de uma mistura de acordo com as peneiras de controle do Método Bailey.

FIGURA 9 – Esquema ilustrativo de divisões para análise em uma graduação contínua (VAVRIK *et al.*, 2002).

Esses fatores caracterizam a compactação dos agregados. Modificações podem ser feitas nas propriedades volumétricas, nas características de construção ou no desempenho da mistura asfáltica mudando-se a graduação com base em alterações nas Proporções AG, GAF e FAF.

4.8 Parâmetros do Método Bailey

4.8.1 Proporção de agregados graúdos (Proporção AG)

O fator de proporção dos agregados graúdos avalia a compactação da porção graúda e os vazios resultantes da mistura. Para analisar melhor a compactação do agregado graúdo é necessária a determinação de mais uma peneira de controle, chamada de Peneira Média (PM), definida como sendo a peneira de abertura mais próxima da metade do diâmetro máximo nominal da mistura.

As partículas que passam pela PM preenchem os vazios criados pelas partículas de agregado graúdo. O ajuste das partículas que passam pela PM pode ser usado para modificações nas propriedades volumétricas das misturas, como por exemplo os vazios no agregado mineral (VAM). A equação para o cálculo da proporção de agregados graúdos é:

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\% \text{ passante na PM} - \% \text{ passante na PCP})}{(100\% - \% \text{ passante na PM})} \quad (4)$$

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. Por isso, uma mistura com uma baixa Proporção AG vai necessitar de uma forte estrutura de agregado fino para alcançar as propriedades volumétricas requeridas. Além disso, uma mistura com a Proporção AG abaixo da faixa recomendada na Tabela 5 pode resultar em uma mistura propensa à segregação, pois misturas descontínuas, que possuem tipicamente Proporção AG abaixo da faixa recomendada, têm maior tendência à segregação que misturas de graduação contínua.

TABELA 5 - Faixas recomendadas para os fatores dos agregados

	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

(VAVRIK *et al.*, 2002)

Se a Proporção AG aumenta, chegando próximo de um, os vazios no agregado mineral também aumentam. Entretanto, com a Proporção AG próximo de um, a fração de agregado graúdo começa a ficar desbalanceada, porque as partículas que passam pela PM, que não são considerados agregados graúdos, tentam controlar o esqueleto de agregado graúdo. Embora esta mistura, por conter uma grande quantidade de partículas que passam pela PM, não ser tipicamente propensa à segregação, a fração de agregado

gráudo pode ser menos contínua na porção abaixo da PCP e, conseqüentemente, a mistura resultante pode apresentar dificuldades de compactação no campo e tendência à corrugação com a aplicação das cargas de tráfego, por não estar bem intertravada. Geralmente, misturas com alta Proporção AG apresentam uma curva granulométrica em forma de “S” no gráfico de potência 0,45. De acordo com o método Superpave, tais misturas tendem a apresentar dificuldades de compactação.

A ocorrência de valores de Proporção AG maiores que um faz com que as partículas que passam pela PM comecem a dominar a formação do esqueleto de agregado gráudo. Ou seja, a fração gráuda do agregado gráudo não mais controla o esqueleto de agregado da mistura, mas fica dispersa numa matriz de partículas finas de agregado gráudo.

4.8.2 Proporção gráuda dos agregados finos (Proporção GAF)

Todo agregado fino, ou seja, abaixo da PCP, pode ser considerado como uma mistura por si só, contendo uma porção gráuda e outra fina, e pode ser avaliado separadamente, de forma similar a toda a mistura. A porção gráuda do agregado fino cria vazios na mistura que são preenchidos pela porção fina do agregado fino. Assim como na fração de agregado gráudo, parte dos vazios deve ser preenchida com um volume apropriado da porção fina do agregado fino.

Os vazios não devem ser preenchidos totalmente, pois deve haver espaço para serem preenchidos com asfalto, além dos vazios necessários ao bom desempenho da mistura. A equação para o cálculo da proporção gráuda dos agregados finos é:

$$\text{Proporção GAF} = \frac{\% \text{ passante na PCS}}{\% \text{ passante na PCP}} \quad (5)$$

Com o aumento da Proporção GAF, o agregado fino, ou seja, aquele abaixo da PCP, fica mais compactado, devido ao aumento, em volume, da porção fina do agregado fino. O ideal é que a Proporção GAF fique sempre abaixo de 0,50, pois valores mais altos indicam um excesso de porção fina do agregado fino na mistura. Esse tipo de mistura, quando analisada no gráfico de potência 0,45, mostra normalmente um desvio para baixo na porção fina, o que indica uma mistura potencialmente fraca.

Se a Proporção GAF ficar abaixo da faixa indicada na Tabela 5, a graduação não é uniforme, caracterizando, geralmente, misturas abertas e que apresentam um desvio no gráfico de potência 0,45, o que pode indicar instabilidade e possibilidade de problemas de compactação. A Proporção GAF tem um impacto considerável nos vazios no agregado mineral (VAM) da mistura, devido à criação de vazios no agregado fino. O VAM da mistura aumenta com o aumento da Proporção GAF.

4.8.3 Proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF)

A fração fina dos agregados finos preenche os vazios criados pela porção graúda dos agregados finos. A Proporção FAF indica como a porção fina do agregado fino é compactada. Para o cálculo da Proporção FAF é necessário mais uma peneira de controle, chamada de Peneira de Controle Terciário (PCT). A PCT é definida como a peneira de abertura mais próxima da multiplicação da PCS pelo fator 0,22. A equação para o cálculo da proporção fina dos agregados finos é:

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

A Proporção FAF é usada para avaliar as características de compactação da porção de agregados de menor tamanho na mistura. Assim como na Proporção GAF, a Proporção FAF deve ficar abaixo de 0,50 para misturas de graduação densa. Os vazios no agregado mineral aumentam com a diminuição da Proporção FAF.

4.8.4 Resumo dos conceitos das Proporções

- **Proporção AG:** Indica o comportamento da mistura quanto à compactação das partículas de agregados graúdos e como a porção fina da mistura preenche os vazios deixados pelo agregado graúdo;
- **Proporção GAF:** Indica o comportamento da mistura quanto à compactação da porção graúda do agregado fino e como a porção fina do agregado fino preenche os vazios deixados pela porção graúda do agregado fino;

- **Proporção FAF:** Indica o comportamento da mistura quanto à compactação da porção fina do agregado fino e o preenchimento dos vazios que restaram na porção fina de agregados da mistura.

As proporções AG, GAF e FAF são muito úteis para a avaliação e ajustes nos vazios no agregado mineral (VAM). A partir de análises laboratoriais de uma determinada mistura, outras podem ser avaliadas (numa planilha eletrônica) até a escolha de uma segunda mistura com maior ou menor VAM. É importante lembrar que modificações na forma, resistência, angularidade e textura dos agregados devem ser levadas em conta nas simulações. Os fatores mencionados acima são calculados a partir das peneiras de controle, as quais estão ligadas ao diâmetro máximo nominal (DMN) das partículas da mistura. A Tabela 6 apresenta a lista de peneiras de controle relacionadas às várias misturas de acordo com os respectivos DMN. Os fatores de controle (Proporção AG, GAF e FAF) são calculados com as porcentagens passantes nas peneiras de controle (PM, PCP, PSC e PTC), obedecendo as faixas de valores recomendadas (Tabela 5).

TABELA 6 – Peneiras de Controle do Método Bailey

	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

* A peneira de 4,75mm é normalmente usada como PM para um DMN de 12,5mm. Entretanto, a interpolação da porcentagem passante na peneira 6,25mm, para o uso na Proporção AG, resulta em um valor mais representativo, (Vavrik *et al.*, 2002).

4.8.5 Efeitos de mudanças na massa específica escolhida

Mudanças na massa específica escolhida do agregado graúdo têm efeito significativo nas propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica. O aumento da massa específica escolhida, acima da massa específica solta, causa um aumento nos vazios da mistura e nos vazios no agregado mineral (VAM). Os vazios aumentam devido ao volume adicional de agregado graúdo na mistura, o que aumenta o intertravamento do agregado e a resistência à compactação.

O aumento no VAM, devido ao aumento da massa específica solta do agregado graúdo depende, também, da forma, textura e angularidade do agregado. Em misturas que apresentam um esqueleto de agregado graúdo, um aumento de 5% na massa específica escolhida gera um aumento de 0,5 a 1,0% no VAM. Em uma mistura de graduação fina, ou seja, com massa específica escolhida abaixo de 90% da massa específica solta, mudanças na massa específica escolhida não apresentam efeito significativo no VAM, pois misturas de graduação fina não possuem um esqueleto de agregado graúdo.

O aumento da massa específica escolhida também pode afetar a compactação da mistura, tanto no laboratório como no campo, pois se a massa específica escolhida aumenta, o volume de agregado graúdo também aumenta, o que pode gerar um forte intertravamento resistente, inclusive, à compactação. Portanto, uma massa específica escolhida elevada pode resultar em uma mistura asfáltica resistente, tanto no laboratório quanto no campo, mas cuidados devem ser tomados para se evitar dificuldades construtivas.

Mudanças na massa específica escolhida causam mudanças na porcentagem passante na PCP da mistura selecionada. Durante o processo de produção, deve-se ficar atento à consistência da porcentagem passante na PCP, especialmente para misturas de graduação graúda. Variações na porcentagem passante na PCP causam mudanças no grau de intertravamento do agregado graúdo, na quantidade de vazios e na trabalhabilidade da mistura.

4.8.6 Efeitos de mudanças na Proporção AG

A Proporção AG tem um efeito significativo nas propriedades volumétricas de misturas asfálticas, o que demonstra a relação, na porção graúda da estrutura de agregados, entre as maiores partículas e as partículas que passam pela peneira média da mistura. Mudanças nesta relação causam mudanças na compactação da mistura, tanto no laboratório quanto no campo.

Com o aumento da Proporção AG os vazios da mistura e os vazios no agregado mineral (VAM) também aumentam, em função da maior quantidade de partículas que passam pela PM na porção graúda da estrutura de agregados, causando uma resistência à densificação da mistura. A quantidade de aumento no VAM, devido a mudanças na Proporção AG, depende também da forma, textura e angularidade do agregado. Numa mistura de graduação graúda, um aumento de 0,2 na Proporção AG causa um aumento de 0,5 a 1,0% no VAM.

Além de afetar as características volumétricas de uma mistura, a Proporção AG pode indicar possíveis problemas construtivos, pois se a Proporção AG é muito baixa, a mistura fica propensa à segregação. A segregação causa áreas com excesso de agregado graúdo, o que leva a uma diminuição da vida em serviço de um pavimento asfáltico. Se a Proporção AG ficar próxima de 1,0 a porção de agregado graúdo da mistura fica desbalanceada, pois nem as partículas mais graúdas e nem as partículas que passam pela PM controlam a estrutura de agregado graúdo.

4.8.7 Efeitos de mudanças na Proporção GAF e FAF

Um aumento dos fatores relacionados aos agregados finos causa a diminuição dos vazios da mistura e dos vazios no agregado mineral (VAM). A variação dos vazios de uma mistura, devido às mudanças nos fatores GAF e FAF, depende, também, da forma, textura e angularidade dos agregados. Uma diminuição de 0,05 nas Proporções GAF e FAF pode aumentar de 0,5 a 1,0% o VAM.

4.8.8 Os quatro parâmetros do Método Bailey

A seleção e análise granulométrica de uma mistura asfáltica pelo Método Bailey é baseada em quatro parâmetros:

- A massa específica escolhida, que define o intertravamento do agregado graúdo;
- A Proporção AG, que define a graduação do agregado graúdo;
- A Proporção GAF, que define a graduação da porção graúda do agregado fino;
- A Proporção FAF, que define a graduação da porção fina do agregado fino.

Quaisquer mudanças nesses fatores afetam os vazios da mistura, o VAM, a trabalhabilidade e o desempenho da mistura asfáltica. Ao fazer mudanças na distribuição granulométrica de uma mistura, mais de um parâmetro do Método Bailey é afetado e cada parâmetro tende a agir independentemente no VAM. Como diferentes parâmetros causam mudanças no VAM, em diferentes direções, deve-se avaliar o resultado como um todo, como mostra a Tabela 7.

TABELA 7 – Exemplo de efeitos combinados de mudanças nos parâmetros Bailey

	Antes	Depois	Resultado final
PCP	38%	38%	Nenhuma mudança
Proporção AG	0,76	0,56	Diminuição do VAM
Proporção GAF	0,55	0,50	Aumento do VAM
Proporção FAF	0,47	0,46	Mudança insignificante
Resultado final (VAVRIK <i>et al.</i> , 2002)			Mudança insignificante no VAM

4.9 Princípios do Método Bailey e Misturas de Graduação Fina

Numa mistura de graduação graúda o intertravamento do agregado graúdo tem um papel significativo na resistência à deformação permanente. Já numa mistura de graduação fina, o agregado fino é quem executa o papel principal na resistência à deformação permanente.

O Método Bailey procura avaliar as características de compactação dos agregados em toda a mistura. Misturas de graduação fina são definidas, geralmente, como uma combinação de agregados de diversos tamanhos que apresentam uma curva granulométrica abaixo da linha de máxima densidade no gráfico de potência 0,45. De acordo com o Método Bailey, a principal diferença entre uma mistura de graduação fina e outra graúda é a porção estrutural de agregado que suporta as cargas e controla os vazios no agregado mineral (VAM). Segundo o Método Bailey, misturas de graduação fina contêm um determinado volume de agregado fino que excede o volume de vazios encontrado na massa específica solta do agregado graúdo.

4.9.1 Volume de agregado graúdo

Numa mistura de graduação graúda, o agregado graúdo tem um papel significativo na compactação do agregado fino. Entretanto, numa mistura de graduação fina, as partículas de agregado graúdo ficam dispersas numa estrutura de agregado fino. A partir do ponto em que as partículas de agregado graúdo não estão em contato entre elas mesmas, os vazios no agregado mineral (VAM) são controlados principalmente pelo agregado fino.

No Método Bailey, o aumento ou a diminuição da massa específica escolhida do agregado graúdo numa mistura causa mudanças tanto no volume de agregado graúdo quanto no de agregado fino. Se a massa específica escolhida dos agregados graúdos diminui, o volume de agregado fino aumenta. Em misturas de graduação fina, se o volume de agregado fino aumenta, o VAM também aumenta.

4.9.2 Processos para seleção de misturas finas pelo Método Bailey

Para determinar a seleção granulométrica para uma mistura asfáltica de graduação fina através do Método Bailey são necessários dois processos. O primeiro processo utiliza a massa específica escolhida do agregado graúdo, a qual é menor do que a massa específica solta (90% ou menos). Os agregados graúdos, partículas com diâmetro acima da PCP, não formam um esqueleto, pois não estão consistentemente em contato e sim dispersos em uma matriz de agregado fino.

O segundo processo avalia a graduação da mistura selecionada abaixo da PCP (da mistura original) como uma mistura à parte. A porção abaixo da PCP é considerada como sendo 100% passante nessa peneira e é avaliada como uma nova mistura de agregado graúdo e fino, mas com o DMN da mistura original. A partir daí uma nova PCP é determinada, assim como as suas correspondentes PM, PCS e PCT.

4.9.3 Determinação dos novos fatores

A Tabela 8 mostra as novas peneiras de controle correspondentes ao DMN da mistura e à PCP original. Os novos fatores podem ser calculados para a porção fina, 100% passante na PCP original, usando as Equações 3 e 5. A Tabela 9 mostra os novos fatores

em relação ao DMN de uma mistura de graduação fina, sendo que as peneiras usadas nas fórmulas representam a porcentagem passante para a nova mistura calculada da porção de agregado fino.

TABELA 8 – Peneiras de Controle para misturas de graduação fina

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

(VAVRIK *et al.*, 2002)

TABELA 9 – Parâmetros ajustados para misturas de graduação fina

DMN (mm)	Proporções		
	AG	GAF	FAF
37,5	$\frac{4,75 - 2,36}{100\% - 4,75}$	$\frac{0,60}{2,36}$	$\frac{0,150}{0,60}$
25,0	$\frac{2,36 - 1,18}{100\% - 2,36}$	$\frac{0,30}{1,18}$	$\frac{0,075}{0,30}$
19,0	$\frac{2,36 - 1,18}{100\% - 2,36}$	$\frac{0,30}{1,18}$	$\frac{0,075}{0,30}$
12,5	$\frac{1,18 - 0,60}{100\% - 1,18}$	$\frac{0,150}{0,60}$	*
9,5	$\frac{1,18 - 0,60}{100\% - 1,18}$	$\frac{0,150}{0,60}$	*
4,75	$\frac{0,60 - 0,30}{100\% - 0,60}$	$\frac{0,075}{0,30}$	*

* Apenas as Proporções AG e GAF podem ser determinadas para essas misturas (VAVRIK *et al.*, 2002).

Assim como em misturas de graduação graúda, mudanças nos fatores de uma mistura de graduação fina geram resultados semelhantes em relação aos vazios no agregado mineral (VAM). Como já visto anteriormente, dos três novos fatores de controle, o que mais influencia o VAM é a Proporção GAF. A seguir são apresentadas algumas orientações quando a porcentagem em volume de agregado fino continua constante na mistura como um todo:

- Se a nova Proporção AG aumenta, o VAM também aumenta, sendo que a faixa de variação recomendada deve ficar entre 0,6 e 1,0. Em misturas de graduação fina, a Proporção AG tende a ser mais variável que em misturas de graduação graúda, devido a faixa recomendada ser mais ampla;
- Se a nova Proporção GAF diminui, o VAM aumenta, sendo a faixa de variação recomendada de 0,35 a 0,50;
- Se a nova Proporção FAF diminui, o VAM aumenta, sendo que a faixa de variação recomendada deve ficar entre 0,35 e 0,50.

As faixas de variação servem de ponto de partida quando não existe experiência com o agregado em estudo. Se já houver uma mistura aceitável, ela pode ser avaliada para determinar uma faixa de variação menor e, assim, aumentar a possibilidade de se conseguir mais rapidamente uma melhor seleção granulométrica.

4.10 Avaliação de Misturas Asfálticas Existentes através do Método Bailey

A experiência é extremamente útil na seleção de agregados para composição de misturas asfálticas que correspondam às exigências volumétricas, apresentem um bom desempenho, sejam reprodutíveis em escala natural e fáceis de aplicar e compactar. Mas quando a escolha de uma distribuição granulométrica para misturas asfálticas é feita baseada apenas em experiências passadas, os resultados podem tanto ser bons quanto maus.

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.

Os cálculos para a avaliação de uma mistura são mostrados em Anexo (Exemplo de Seleção Granulométrica pelo Método Bailey). Os cálculos podem ser feitos manualmente, mas o uso de uma planilha eletrônica agiliza muito a reprodução dos cálculos. Para avaliar uma dada mistura, algumas das variáveis de entrada devem ser estimadas para a realização dos cálculos e, então, deve-se comparar a mistura original com a simulada. Feito isso, as variáveis de entrada devem ser ajustadas para tornar a mistura simulada o mais próximo possível da mistura original.

As três variáveis de entrada a serem estimadas são:

- Massa específica escolhida de cada agregado graúdo;
- Volume de agregado graúdo;
- Volume de agregado fino.

Depois de ajustar a mistura que está sendo simulada o mais próximo possível da mistura original, os três parâmetros do Método Bailey (Proporção AG, GAF e FAF) são determinados.

4.11 Avaliação de Misturas Asfálticas Convencionais de Graduação Densa pelo Método Bailey

O método de avaliação pode ser usado tanto para misturas de graduação graúda como para finas. Uma das variáveis de entrada a ser estimada é a massa específica escolhida. Ao final da avaliação, se a massa específica escolhida for menor que 95% da massa específica solta, a mistura deve ser considerada de graduação fina. Segue abaixo um roteiro de como uma mistura deve ser avaliada.

- 1º. Obter uma amostra representativa dos agregados usados na mistura original, para que a forma, textura, graduação e massa específica das partículas sejam o mais próximas possíveis da mistura original. Se houver uma diferença significativa nos agregados em relação a uma ou mais propriedades, uma amostra mais significativa deve ser obtida. Se isso não for possível, a avaliação pode ser comprometida;

- 2°. Determinar a massa específica solta e compactada para cada agregado graúdo e somente a massa específica compactada para os agregados finos;
- 3°. Determinar a distribuição granulométrica original e a massa específica de cada agregado da mistura original;
- 4°. Adotar, em princípio, a massa específica compactada de cada agregado fino como sendo a massa específica escolhida;
- 5°. Adotar, em princípio, a massa específica solta de cada agregado graúdo como sendo a massa escolhida;
- 6°. Estimar as porcentagens de cada agregado graúdo, em volume. Pode ser usada como ponto de partida uma mistura com 100% de um determinado agregado graúdo, a menos que exista uma diferença significativa nas massas específicas dos agregados graúdos usados;
- 7°. Estimar as porcentagens de cada agregado fino, em volume. Pode ser usada como ponto de partida uma mistura com 100% de um determinado agregado fino, a menos que exista uma diferença significativa nas massas específicas dos agregados finos usados;
- 8°. Adotar a quantidade de material passante na peneira 0,075mm correspondente à mistura original, que pode ser alterada para assegurar que a mistura simulada fique o mais próximo possível da original. A partir deste ponto a mistura simulada já pode ser calculada;
- 9°. Ajustar a mistura, em volume, de agregado graúdo e/ou fino para assegurar as porcentagens individuais, em peso, de cada agregado o mais próximo possível da mistura original;
- 10°. Aumentar ou diminuir o valor da massa específica solta (i.e., massa específica escolhida) dos agregados graúdos para assegurar a porcentagem passante na PCP o mais próximo possível da mistura original;

- 11°. A massa específica escolhida dos agregados finos deve, sempre, ser a sua respectiva massa específica compactada, mesmo se for preciso para isso adotar a massa específica escolhida do agregado graúdo abaixo da massa específica solta.

Materiais e Métodos

5.1 Fatores e Variáveis Dependentes

A pesquisa foi baseada em ensaios laboratoriais, visando quantificar os efeitos dos fatores considerados sobre o desempenho de misturas asfálticas selecionadas granulometricamente pelo Método Bailey. Os fatores escolhidos foram:

- Tipo de agregado: basalto e gábro;
- Distribuição granulométrica: graduação densa fina e densa graúda;
- Variações nos parâmetros de controle do Método Bailey: Massa Específica Escolhida, Proporção AG e Proporção FAF.

Para a inferência do desempenho das misturas asfálticas, foram executados os seguintes ensaios:

- Estabilidade e Fluência Marshall;
- Módulo de Resiliência;
- Resistência à Tração;
- Fluência por compressão uniaxial estática ou *Creep* Estático.

Foram selecionados três tipos de agregados, frequentemente usados em obras de pavimentação no estado de São Paulo: basalto da pedreira Santa Isabel, situada em Ribeirão Preto – SP; gábro da pedreira São Roque, situada em Santa Bárbara D'Oeste – SP; e uma areia natural 100% passante na peneira 0,075mm usada como material de preenchimento (fíler), proveniente da mineradora Jundu.

Os agregados foram submetidos ao ensaio de massa específica solta e compactada, de acordo com a norma AASHTO T-19/T 19M-93 (1997), além da determinação da distribuição granulométrica e massa específica dos agregados, para completar os dados de entrada para os cálculos do Método Bailey.

Foram preparadas misturas de agregados selecionadas pelo Método Bailey e pelo método de tentativas, enquadrando-as dentro dos parâmetros Superpave, para a realização dos ensaios de dosagem Marshall (Fluência e Estabilidade), Módulo de Resiliência, Resistência à Tração e Fluência por compressão uniaxial estática.

As dosagens Marshall foram preparadas de acordo com a norma NBR 12891 – ABNT (1993). Foram moldadas séries de 15 corpos-de-prova, executados com 75 golpes por face. Para cada material empregado (basalto e gabro) há uma distribuição granulométrica fina, chamada neste trabalho de AZR, por estarem Acima da Zona de Restrição proposta pelo método Superpave, selecionada pelo método de tentativas, e uma distribuição granulométrica selecionada pelo método Bailey.

As curvas granulométricas selecionadas pelo método de tentativas enquadram-se na faixa C do DNER e as selecionadas pelo método Bailey enquadram-se apenas parcialmente na faixa C, pois a parte fina da mistura passa um pouco abaixo da linha mínima. Seguindo os estudos de Tayebali *et al.* (1998), que recomendam uma quantidade de filer abaixo dos 4% para que o filer não afete as características de desempenho das misturas, foi adotado na presente pesquisa 3,5% de filer mineral.

Seguindo os estudos de Vavrik *et al.* (2002, 2001 e 2000), para a determinação da influência dos parâmetros adotados pelo Método Bailey no controle e características da composição da distribuição granulométrica, foram também preparadas, para cada material utilizado, três misturas modificando-se os referidos parâmetros da seguinte forma:

- Aumento de cinco pontos percentuais na massa específica escolhida (MEE);
- Aumento de 0,2 na Proporção AG;
- Diminuição de 0,05 na Proporção FAF.

As composições granulométricas analisadas são apresentadas em porcentagem passante nas Tabelas 10 e 11 e Figuras 10 a 11.

Tabela 10 – Misturas Bailey e AZR (Basalto)

Peneiras (mm)	Bailey Original	Bailey mod. MEE	Bailey mod. Prop. AG	Bailey mod. Prop. FAF	AZR
19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
12,5	96,6	96,5	97,4	96,7	95,0
9,5	76,5	75,6	82,0	77,3	86,0
4,75	61,6	60,2	66,9	64,6	61,0
2,36	39,4	37,2	41,3	46,9	46,0
1,18	25,8	24,3	26,9	30,9	35,0
0,60	17,0	16,3	17,8	19,5	26,0
0,30	11,8	11,5	12,4	12,6	19,0
0,150	8,5	8,4	9,0	8,9	11,0
0,075	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Tabela 11 – Misturas Bailey e AZR (Gabro)

Peneiras (mm)	Bailey Original	Bailey mod. MEE	Bailey mod. Prop. AG	Bailey mod. Prop. FAF	AZR
19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
12,5	94,7	94,7	94,5	93,4	95,0
9,5	89,8	89,8	89,8	88,3	86,0
4,75	65,4	56,1	67,1	79,7	61,0
2,36	45,8	35,0	44,2	55,0	46,0
1,18	29,9	23,1	28,9	35,6	35,0
0,60	20,0	15,4	18,9	23,0	26,0
0,30	13,8	11,2	13,4	16,1	19,0
0,150	8,0	6,6	7,6	8,6	11,0
0,075	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

FIGURA 10 – Distribuições granulométricas Bailey e AZR (Basalto)

FIGURA 11 – Distribuições granulométricas Bailey e AZR (Gabro)

5.2 Materiais

5.2.1 Agregados

Foram usados nesta pesquisa dois tipos de agregados que compõem a faixa graúda e fina das misturas e um tipo de filer mineral. Um dos agregados que compõe a faixa graúda e fina das misturas é um basalto britado proveniente da pedreira Santa Isabel, situada em Ribeirão Preto – SP. O outro agregado que compõe a faixa graúda e fina das misturas é um gabro britado, proveniente da pedreira São Roque, situada em Santa Bárbara D'Oeste. O filer mineral é uma areia 100% passante na peneira 0,075mm, proveniente da mineradora Jundu.

Para a determinação de algumas características físicas dos agregados foram realizados os ensaios de abrasão Los Angeles (DNER ME 035/98), absorção (DNER ME 081/98), adesividade (DNER ME 078/94 e ME 079/94), densidade máxima medida – DMM (Método Rice, ASTM D2041-95), massa específica real e aparente (DNER ME 194/98 e ME 195/97) e massas específicas solta e compactada AASHTO T-19/T 19M-93 (1997), como mostram as Tabelas 12 e 13.

TABELA 12 – Características Físicas do Basalto

Ensaio	Pedra 1	Pedrisco	Pó	Filer
Massa específica (g/cm ³)	2,928	2,928	2,961	2,620
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,862	2,862	2,890	2,591
Abrasão Los Angeles (%)		16,2		
Absorção (%)		0,3		
Adesividade		Não satisfatória		
Densidade Máxima Medida da mistura		2,562		
Massa Específica Solta (kg/m ³)	1479	1549	*	**
Massa Específica Compactada (kg/m ³)	1654	1703	1784	**

* A massa específica solta só é calculada para os agregados graúdos;

** Não é calculada a massa específica solta e compactada para o filer.

TABELA 13 - Características Físicas do Gabro

Ensaio	Pedra 1	Pedrisco	Pó	Filer
Massa específica (g/cm ³)	2,859	2,859	2,920	2,620
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,754	2,754	2,739	2,591
Abrasão Los Angeles (%)		18,3		
Absorção (%)		0,9		
Adesividade		Não satisfatória		
Densidade Máxima Medida da mistura		2,482		
Massa Específica Solta (kg/m ³)	1502	1374	*	**
Massa Específica Compactada (kg/m ³)	1567	1493	1696	**

* A massa específica solta só é calculada para os agregados graúdos;

** Não é calculada a massa específica solta e compactada para o filer.

5.2.2 Ligante Asfáltico

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) usado nesta pesquisa é um CAP-20 (Tabela 14) e satisfaz às exigências contidas no Regulamento Técnico DNC nº 02/92 – Rev. 02, de 24 de março de 1993, do Departamento Nacional de Combustíveis.

TABELA 14 - Características físicas do CAP-20 utilizado

ENSAIO	RESULTADO	EXIGÊNCIA DNC 01/92	MÉTODO
Viscosidade absoluta a 60°C (poise)	3200	2000 a 3500	MB-827
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C (s)	167	120 mín.	ME 004/94
Viscosidade Saybolt Furol a 155°C (s)	82		
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C (s)	40	30 a 150	
Índice de suscetibilidade térmica	-0,45	-1,5 a 1,0	-
Penetração, 25°C, 100g, 5s (0,1mm)	48	50 mín.	ME 003/99
Ponto de fulgor (°C)	262	235 mín.	ME 148/94
Densidade real (g/cm ³)	1,020*	-	-

* Resultado de ensaio fornecido pela Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A.

5.2.3 Misturas Asfálticas

Dez tipos diferentes de distribuições granulométricas de agregados foram preparadas. Oito delas são misturas selecionadas pelo método Bailey e representam misturas de graduação graúda, encaixando-se parcialmente na faixa C do DNER, pois a parte fina da mistura, compreendida entre as peneiras 0,60mm e 0,075mm, fica fora da especificação.

Dessas oito misturas, para cada agregado selecionado para a presente pesquisa, foi selecionada uma mistura respeitando os parâmetros de restrição do Método Bailey e três misturas modificando-se os parâmetros massa específica escolhida (MEE), Proporção AG e Proporção FAF.

As outras duas misturas foram selecionadas por meio de tentativas e representam misturas de graduação fina, chamadas de AZR por estarem Acima da Zona de Restrição proposta pelo método Superpave, encaixando-se no centro da faixa C do DNER, muito utilizada no Brasil. Vale ressaltar que todas as misturas foram compostas com 3,5% de filer mineral.

A distribuição granulométrica das misturas Bailey apresentam ligeira diferença, pelo fato do método selecionar a mistura de acordo com o material a ser usado, sendo que uma mistura possui a fração graúda e fina composta por basalto e uma areia de rio como material de preenchimento e a outra possui a mesma areia de rio como material de preenchimento, porém a fração graúda e fina é composta por gábro.

As duas misturas AZR foram preparadas como as misturas Bailey, com as frações graúda e fina compostas por basalto em uma e por gábro na outra, tendo uma areia natural como material de preenchimento. Diferentemente das misturas Bailey, as misturas de graduação fina apresentam a mesma curva tanto para o basalto quanto para o gábro.

Para a verificação do intertravamento do agregado graúdo proposto pelo método Bailey foi utilizado o método AASHTO PP-41 (2000), desenvolvido pelo NCAT (*National Center for Asphalt Technology*). Este método, utilizado para verificar o contato pedra-pedra em misturas SMA, exige que o valor dos vazios do agregado graúdo da mistura em estado seco compactado (VAG_{sc}) seja maior que o valor dos vazios do agregado graúdo da mistura asfáltica compactada (VAG_{mc}), além de que o valor mínimo para os vazios do agregado mineral (VAM) deve ser 17%.

As Equações 7 e 8 mostram como o cálculo do VAG_{sc} e VAG_{mc} é feito.

$$VAG_{sc} = \frac{\gamma_{ag} - \gamma_{sc}}{\gamma_{ag}} \times 100 \quad (7)$$

$$VAG_{mc} = 100 - \frac{D_{ap}}{\gamma_{ag}} \times P_{ag} \quad (8)$$

onde:

γ_{ag} = massa específica do agregado graúdo, em g/cm³;

γ_{sc} = massa específica aparente da mistura no estado compactado seco, em g/cm³;

D_{ap} = densidade aparente da mistura;

P_{ag} = porcentagem, em peso, de agregado graúdo na mistura total.

Para a obtenção do teor ótimo de asfalto foi realizada uma estimativa da quantidade ótima de asfalto através do método de superfície específica (DNER M148-60). Porém, como foi usada a Densidade Máxima Medida – DMM (Método Rice), que considera o asfalto absorvido pelos agregados, para o cálculo dos vazios das misturas, a quantidade de asfalto necessária para a obtenção de 4% de volume de vazios, dos corpos de prova moldados segundo o método Marshall, visado pela presente pesquisa foi bem maior que a obtida pelo método da superfície específica.

Foi usado o Método Marshall de compactação para a dosagem e execução dos corpos-de-prova para os ensaios de desempenho com a aplicação de 75 golpes por face (DNER ME-043/95). Para a usinagem, os agregados foram aquecidos a uma temperatura de 175°C e o ligante asfáltico a 160°C. Antes da compactação, as misturas asfálticas ficaram por duas horas na estufa sob a temperatura de 144°C, para simular o efeito de envelhecimento de curto prazo, segundo estabelece o procedimento AASHTO PP-2 (*Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*, 1999).

As temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas foram obtidas respeitando-se a norma DNER ME-043/95, que estabelece intervalos de viscosidade em que o ligante asfáltico deve estar em cada caso: para usinagem, a temperatura do ligante deve ser tal que resulte em uma viscosidade de 85±10 sSF (segundos, ensaio Saybolt-Furol); para compactação, 140±10 sSF.

5.3 Métodos de Ensaio

5.3.1 Ensaio Marshall

Foi utilizado, na presente pesquisa, o compactador Marshall que, apesar de ser alvo de críticas, devido principalmente ao seu empirismo, difícil interpretação das tensões durante o ensaio e dispersão dos resultados (MOTTA, MEDINA e SCALCO, 1993), é o método que ainda vem sendo utilizado no Brasil.

O ensaio consiste na compactação e rompimento de corpos-de-prova de forma normalizada pela DNER-ME 043/95. Do ensaio são obtidos a estabilidade da mistura, que corresponde à carga de ruptura, em kgf, e a fluência, que corresponde à deformação sofrida pelo corpo-de-prova no instante da ruptura, em 0,1mm. Também são determinadas algumas características físicas das misturas asfálticas, como o volume de vazios, os vazios do agregado mineral (VAM), a relação betume vazios (RBV) e a densidade aparente da mistura.

5.3.2 Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Consiste na aplicação de uma carga de compressão estática uniaxial a um corpo-de-prova cilíndrico, durante o período convencionado, obtendo-se as deformações em função do tempo durante o período de carga de uma hora e por 15 minutos durante a descarga. Foi desenvolvido para estimar o potencial de formação de trilhas-de-roda em misturas asfálticas (ROBERTS *et al.*, 1991).

A aplicação da carga de compressão foi realizada por meio de uma prensa pneumática e as leituras das deformações axiais dos corpos-de-prova foram feitas através de dois LVDT's (*Linear Variable Differential Transducers*) alinhados, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Detalhe do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

O ensaio foi realizado sob a tensão de 1kgf/cm^2 , que é a carga recomendada por Van de Loo (1974) e utilizada no método Shell (HILSTER e VAN DE LOO, 1977). Foi utilizada, para a realização dos ensaios, a temperatura de 40°C por ser um valor corrente observado na literatura (TAIRA, 2001), e um período de pré-condicionamento térmico dos corpos-de-prova à temperatura de ensaio, por um período de no mínimo 10 horas. Para a execução do ensaio foi utilizado um pré-condicionamento de 2 minutos com carga de ensaio e 5 minutos de descanso. Logo após o término do pré-condicionamento foi aplicado 60 minutos de carga e 15 minutos de descarga para a obtenção das curvas de fluência e recuperação, respectivamente.

5.3.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral aplica ao corpo-de-prova uma carga progressiva correspondente à taxa de deslocamento de $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$, até a ruptura, sendo que a resistência à tração é determinada pela Equação 9 (DNER-ME 138/94).

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (9)$$

onde:

σ_R = resistência à tração, em kgf/cm^2 ;

F = carga de ruptura, em kgf ;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm ;

H = altura do corpo de prova, em cm .

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral e a mesma temperatura, 25°C .

5.3.4 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral

Para a determinação dos módulos resilientes das misturas asfálticas foi utilizado o ensaio de tração indireta por compressão diametral cíclica. O cálculo é dado pela relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical do corpo-de-prova cilíndrico da mistura asfáltica, e a deformação recuperável (ε_t) correspondente à tensão aplicada. (Equação 10, DNER, 1994).

$$Mr = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right) \quad (10)$$

Para a aplicação da teoria da elasticidade às misturas asfálticas a temperatura deve ser inferior a 40°C (MEDINA, 1997). Neste trabalho, os ensaios foram realizados a uma temperatura de 25°C , aplicando-se 500 ciclos por corpo-de-prova. Cada ciclo equivale a

um segundo, onde a carga é aplicada durante 0,1s, com 0,9s de período de descanso ou recuperação. Deve-se ressaltar que foram realizados períodos de pré-condicionamento dos corpos-de-prova com a aplicação de 200 ciclos.

A carga utilizada para o ensaio respeitou a recomendação de utilização de carga menor ou igual a 30% da obtida no ensaio de resistência à tração indireta (DNER-ME 133/94), tendo-se buscado um nível mínimo de ruído para as leituras efetuadas pelos LVDT's.

Tanto para os ensaios de resistência a tração indireta quanto para os ensaios de módulo de resiliência foi utilizado um aparato constituído de dois frisos metálicos com a superfície de contato côncava e um orifício, na parte superior do suporte, para encaixe de uma esfera metálica que garante a aplicação da carga sem esforços laterais, como mostra a Figura 12.

Figura 13 – Detalhe do suporte para fixação dos corpos-de-prova para os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência a Tração Indireta, durante realização de ensaio de módulo de resiliência

De acordo com a norma DNER-ME 133/94 o módulo de resiliência é determinado pela Equação 11.

$$M_r = \frac{F \times (0,09976\mu + 0,2692)}{\Delta \times H} \quad (11)$$

onde:

M_r = módulo de resiliência, em kgf/cm²;

F = carga cíclica vertical aplicada diametralmente ao corpo-de-prova, em kgf;

Δ = deslocamento resiliente para 300, 400 e 500 ciclos, em cm;

H = altura do corpo-de-prova, em cm;

μ = coeficiente de Poisson (adotado 0,30).

5.3.5 Programa computacional para controle dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e compressão diametral dinâmica

Para a determinação do módulo de resiliência e dos parâmetros de fluência estática das misturas estudadas nesta pesquisa, foram utilizados dois programas computacionais, desenvolvidos em linguagem LabVIEW, da National Instruments Corp. (1996) para o sistema Windows. Os programas controlam a aquisição de dados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e compressão diametral dinâmica obtidos através de uma placa de aquisição de dados PC-LPM-16, também da National Instruments Corp. (1993), constituída de 16 entradas analógicas e 8 entradas e saídas digitais, contando com uma razão máxima de amostragem de 50kHz e uma resolução de 12 bits.

O programa armazena a leitura dos deslocamentos medidos através de LVDT's e da força através de célula de carga, podendo adquirir até 1.000 dados por segundo, gravando os resultados em formato texto (.txt), o que permite a verificação e/ou manipulação dos dados em planilhas eletrônicas. As Figuras 14 e 15 mostram as telas de aquisição e cálculo dos dados dos programas computacionais utilizados para os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.

FIGURA 14 – Tela do programa computacional referente ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

FIGURA 15 – Tela do programa computacional referente ao cálculo do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

Apresentação e Análise dos Resultados

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios Marshall, fluência por compressão uniaxial estática, resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliente por compressão diametral cíclica, além de uma análise do intertravamento do agregado graúdo.

6.2 Verificação do Intertravamento do Agregado Graúdo

Através do ensaio AASHTO T-19/T 19M-93 (1997), que forneceu os valores de massa específica compactada das misturas (γ_{sc}), mais os valores de massa específica do agregado graúdo (γ_{ag}), densidade aparente das misturas (D_{ap}) e porcentagem, em peso, de agregado graúdo nas misturas (P_{ag}), foram feitos os cálculos dos vazios do agregado graúdo em estado seco compactado (VAG_{sc}) e dos vazios do agregado graúdo da mistura asfáltica compactada (VAG_{mc}).

Como mostra a Tabela 22, as misturas atendem às especificações com relação aos vazios do agregado mineral (VAM), pois ambas apresentam VAM acima de 17%. As duas misturas apresentam VAG_{sc} menor que o VAG_{mc} , o que seria indicação de falta de contato pedra-pedra (critério muito utilizado para misturas SMA).

TABELA 15 – Verificação do Intertravamento do Agregado Graúdo

Propriedades	Mistura	
	Basalto	Gabro
γ_{ag} (g/cm ³)	2,928	2,859
γ_{sc} (g/cm ³)	1,993	1,841
D_{ap} da mistura (g/cm ³)	2,455	2,377
P_{ag} (%)	77,6	63,6
VAG_{sc} (%)	31,93	35,61
VAG_{mc} (%)	34,94	47,12
VAM (%)	20,0	19,8

6.3 Ensaio Marshall

Através do ensaio Marshall foram determinados os valores de densidade aparente (D_{ap}), volume de vazios (V_v), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E).

As Tabelas 16 a 19 mostram os valores médios obtidos para as tréplicas dos corpos-de-prova Marshall das misturas Bailey e AZR constituídas de Basalto e Gabro.

TABELA 16 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas Bailey – Agregado: Basalto

Teor de Asfalto (%)	D_{ap} (g/cm ³)	DTM (g/cm ³)	V_v (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (0,1mm)	E (kgf)
5,5	2,421	2,618	7,5	20,1	62,5	35	969
6,0	2,440	2,596	6,0	19,8	69,7	40	1040
6,5	2,462	2,575	4,4	19,6	77,6	42	1007
7,0	2,465	2,554	3,5	19,9	82,6	42	939
7,5	2,468	2,534	2,6	20,2	87,2	48	1030

TABELA 17 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas Bailey – Agregado: Gabro

Teor de Asfalto (%)	Dap (g/cm ³)	DTM (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (0,1mm)	E (kgf)
6,0	2,338	2,541	8,0	19,8	59,8	36	1359
6,5	2,348	2,521	6,8	19,9	65,6	38	1308
7,0	2,372	2,501	5,2	19,5	73,6	41	1358
7,5	2,388	2,482	3,8	19,4	80,6	40	1305
8,0	2,392	2,463	2,9	19,7	85,4	45	1297

TABELA 18 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas AZR – Agregado: Basalto

Teor de Asfalto (%)	Dap (g/cm ³)	DTM (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (0,1mm)	E (kgf)
5,2	2,400	2,631	8,8	20,5	57,3	41	1280
5,7	2,424	2,609	7,1	20,2	64,9	38	1144
6,2	2,445	2,588	5,5	19,9	72,3	38	1215
6,7	2,467	2,567	3,9	19,6	80,3	41	1309
7,2	2,470	2,546	3,0	19,9	85,0	39	1245

TABELA 19 – Resultados médios do ensaio Marshall para as misturas AZR – Agregado: Gabro

Teor de Asfalto (%)	Dap (g/cm ³)	DMM (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (0,1mm)	E (kgf)
5,2	2,387	2,573	7,2	17,5	58,6	36	1662
5,7	2,396	2,553	6,2	17,6	65,1	44	1717
6,2	2,423	2,533	4,3	17,1	74,6	40	1793
6,7	2,444	2,513	2,8	16,8	83,7	47	1718
7,2	2,440	2,493	2,2	17,4	87,6	49	1555

As Figuras 16 a 19 mostram os gráficos de densidade aparente (D_{ap}), Volume de vazios (V_v), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade (E) em função do teor de asfalto para as misturas Bailey e AZR, constituídas de Basalto e Gabro.

FIGURA 16 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura Bailey – Agregado: Basalto

FIGURA 17 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura Bailey – Agregado: Gabro

FIGURA 18 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura AZR – Agregado: Basalto

FIGURA 19 – Gráficos da dosagem Marshall para a mistura AZR – Agregado: Gabro

De acordo com os resultados da dosagem Marshall apresentados, para um volume de vazios de 4%, verifica-se que os teores de asfalto foram influenciados pela granulometria e características físicas (forma, textura e absorção) dos agregados. A Tabela 20 mostra como a absorção dos agregados, em especial, utilizada para a determinação da densidade máxima medida, influencia no teor ótimo de ligante.

TABELA 20 – Porcentagens de asfalto nas misturas de acordo com a densidade

	AZR		Bailey	
	Basalto	Gabro	Basalto	Gabro
Dap*	4,9	4,9	4,9	5,1
DMM**	6,7	6,2	6,8	7,5

* Dap = Densidade aparente da mistura, **DMM = Densidade Máxima Medida da mistura.

Em relação aos vazios no agregado mineral (VAM), as misturas Bailey apresentaram valores maiores que os das misturas AZR, o que demonstra que misturas de graduação densa, porém graúda, com é o caso das misturas Bailey, apresentam VAM maiores. As misturas Bailey também apresentaram valores da relação betume vazios (RBV) superior aos das misturas AZR. Em termos de Estabilidade Marshall, as misturas AZR apresentaram valores maiores que os das misturas Bailey. Pode-se observar que as características físicas dos agregados (forma, textura e absorção) e a granulometria das misturas influenciaram o VAM, o RBV, a Estabilidade e a Fluência Marshall.

6.4 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os valores de módulo de resiliência foram calculados não somente aos 300, 400 e 500 ciclos, mas sim tomando uma média de todos os ciclos. A Tabela 28 e as Figuras 27 e 28 apresentam os resultados (média de três réplicas) de tensão de ruptura para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência das misturas Bailey e AZR.

TABELA 21 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência

Misturas	RT (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	MR/RT
Bailey Basalto	11,26	28.712	2.549
AZR Basalto	13,78	52.461	3.807
Bailey Gabro	11,87	35.968	3.029
AZR Gabro	13,89	55.144	3.970

FIGURA 20 – Tensões de ruptura das misturas Bailey e AZR

FIGURA 21 – Módulo de resiliência das misturas Bailey e AZR

As Tabelas 22 e 23 e as Figuras 22 e 23 apresentam os resultados do módulo de resiliência em função do VAM das misturas Bailey modificadas: aumento da massa específica escolhida (MEE), aumento da Proporção AG e Proporção FAF. Deve-se destacar que foram ensaiadas três réplicas.

TABELA 22 – Resultados médios do ensaio de módulo de resiliência para as misturas Bailey Basalto Modificadas

Misturas	MR (kgf/cm ²)	VAM (%)
Original	28.712	20,0
Aumento da MEE	49.185	20,3
Aumento da Proporção AG	51.405	21,2
Diminuição da Proporção FAF	50.464	20,8

FIGURA 22 – Módulo de resiliência das misturas Bailey Basalto Modificadas

TABELA 23 - Resultados médios do ensaio de módulo de resiliência para as misturas Bailey Gabro Modificadas

Misturas	MR (kgf/cm ²)	VAM (%)
Original	35.968	19,8
Aumento da MEE	39.722	20,5
Aumento da Prop. AG	43.887	20,1
Diminuição da Prop.FAF	51.241	20,5

FIGURA 23 – Módulo de resiliência das misturas Bailey Gabro Modificadas

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que as misturas AZR apresentaram valores de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR) superiores aos das misturas Bailey. Porém, as misturas Bailey apresentaram valores menores para a relação MR/RT, característica salientada por Leite *et al.* (2000) como sendo de misturas que apresentam melhor equilíbrio entre resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga.

Com relação às misturas Bailey modificadas, observa-se que as alterações efetuadas (aumento da massa específica escolhida, aumento da Proporção AG e diminuição da Proporção FAF) resultaram em aumento do Módulo de Resiliência e do VAM.

6.5 Ensaio de Fluência por Compressão Uniaxial Estática

Desde que o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi criado, vários métodos têm sido desenvolvidos para a avaliação das misturas em função dos resultados do ensaio.

Segundo Kdher³ apud Little *et al.* (1993), para um tempo de ensaio de 60 minutos, a uma temperatura de 40°C, sob uma tensão de 207 KPa, o módulo de fluência mínimo esperado é de 137,9 MPa. Já para Kronfuss⁴ apud Little *et al.* (1993), o ensaio sob o mesmo tempo e temperatura indicados por Kdher (1986), porém sob uma tensão de 103 MPa, valor usado nesta pesquisa, deve apresentar um módulo de fluência de 31,0 a 45,3 MPa, para um tráfego de alta intensidade.

Little *et al.* (1993) propuseram um critério para avaliação do potencial de deformação permanente do concreto asfáltico baseado na deformação total após uma hora de carregamento, no módulo de fluência e na inclinação da curva de fluência no estágio de deformação constante. Para o ensaio a 40°C, com duração de uma hora, os procedimentos para a avaliação do potencial de formação de trilhas de roda são:

- Através do número de passagens do eixo padrão de projeto durante os 180 dias mais quentes do ano, determinar a intensidade de tráfego da rodovia;
- A partir de tabelas encontradas em Little & Youssef (1993), determinar o nível de tensão a ser aplicado no ensaio de acordo com a estrutura do pavimento;
- Para a verificação de um eventual estágio de ruptura durante o período de carregamento, traçar a curva de fluência numa escala aritmética;
- Determinar a inclinação da curva de fluência do estágio secundário, que fica aproximadamente entre 1000 e 3600 segundos;
- Para a aceitabilidade da mistura de acordo com o nível de tráfego desejado, através dos dados de inclinação da curva e da deformação após uma hora de carregamento, consultar as Tabelas 24 e 25.

³ KDHER, S. ^a (1986). *Deformation Mechanism in Asphalt Concrete*. Journal of Transportation, ASCE, Vol. 112.

⁴ KRONFUSS, R.; KRZERMEN, R.; NIEVELT, G.; PUTZ, P. (1984). *Verformungsfestigkeit von Asphalten Ermittlung in Kriechtest*. Bundesministerium für Bauten und Technik, Strassenforschung, Heft 240, Wein, Austria.

TABELA 24 – Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência estática

Deformação total em 1h de carregamento (%)	Inclinação da curva de fluência no estágio secundário ou estágio de deformação constante					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV	IV	IV	IV	IV	III
< 0,40	IV	IV	IV	III	III	III
< 0,50	IV	IV	III	III	III	III
< 0,80	III	III	II	II	II	II
< 1,00	I	I	I	I	I	-
< 1,20	I	I	I	-	-	-

I – Tráfego de baixa intensidade: $< 10^5$ passagens do eixo padrão durante os 180 dias mais quentes;

II – Tráfego de moderada intensidade: entre 10^5 e 5×10^5 passagens do eixo padrão;

III – Tráfego de alta intensidade: entre 5×10^5 e 10^6 passagens do eixo padrão;

IV – Tráfego de muito alta intensidade: $> 10^6$ passagens do eixo padrão.

1. Deve-se também ter $\varepsilon_p < 0,8\%$ para 1800 segundos de carregamento;
2. Deve-se seguir o seguinte critério: $\varepsilon_{rt} + \varepsilon_p < 0,5 \varepsilon_{qu}$, onde ε_p é a deformação permanente no final do carregamento, ε_{rt} é a deformação resiliente total obtida no ensaio de módulo resiliente uniaxial e ε_{qu} é a deformação obtida no ensaio de compressão não-confinada, conforme ASTM T 167.

(LITTLE *et al.*, 1993)

TABELA 25 – Critério do módulo de fluência para carregamento de 1 hora

Resistência à formação de trilhas de rodas	Nível de intensidade de tráfego	Módulo de fluência (MPa), para ensaio de tensão constante		
		207 KPa	345 KPa	483 KPa
ALTA	IV	130,4	120,7	155,1
	III	48,3	69	96,5
	II	34,5	44,8	60,3
	I	20,7	27,6	41,4
MODERADA	IV	51,7	69	96,5
	III	34,5	50	96
	II	24,1	41,4	51,7
	I	17,2	20,7	27,6

(LITTLE *et al.*, 1993)

As Tabelas 26 e 27 e as Figuras 24 a 30 apresentam os resultados de fluência estática das misturas Bailey e AZR, destacando-se que foram ensaiadas três réplicas.

TABELA 26 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey e AZR

Misturas	Deformação total (%)	Deformação recuperável (%)	Deformação plástica (%)	Recuperação (%)
Bailey Basalto	0,261	0,143	0,118	65,08
AZR Basalto	0,358	0,166	0,192	50,80
Bailey Gabro	0,292	0,162	0,131	58,68
AZR Gabro	0,270	0,159	0,111	59,62

TABELA 27 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey e AZR

Misturas	Módulo de fluência t = 3600s (kgf/cm ²)	Módulo de fluência t = 4500s (kgf/cm ²)	Inclinação
Bailey Basalto	482,18	4046,42	0,046
AZR Basalto	356,89	822,18	0,060
Bailey Gabro	355,66	4171,01	0,055
AZR Gabro	370,92	966,85	0,040

FIGURA 24 – Deformação total das misturas Bailey e AZR

FIGURA 25 – Deformação recuperável das misturas Bailey e AZR

FIGURA 26- Deformação plástica das misturas Bailey e AZR

FIGURA 27 – Recuperação elástica das misturas Bailey e AZR

FIGURA 28 – Módulo de fluência aos 3.600s para as misturas Bailey e AZR

FIGURA 29 – Módulo de fluência aos 4.500s para as misturas Bailey e AZR

FIGURA 30 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey e AZR

As Tabelas 28 e 29 e as Figuras 31 a 37 apresentam os resultados de fluência estática das misturas Bailey modificadas, com o agregado basalto. Deve-se destacar que foram ensaiadas três réplicas.

TABELA 28 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Basalto

Misturas	Deformação total (%)	Deformação recuperável (%)	Deformação plástica (%)	Recuperação (%)
Original	0,261	0,143	0,118	65,08
Aumento da MEE	0,270	0,145	0,124	56,45
Aumento da Prop. AG	0,319	0,150	0,170	52,91
Diminuição da Prop.FAF	0,285	0,148	0,138	50,91

TABELA 29 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Basalto

Misturas	Módulo de fluência	Módulo de fluência	Inclinação
	t = 3600s (kgf/cm ²)	t = 4500s (kgf/cm ²)	
Original	356,89	822,18	0,060
Aumento da MEE	645,65	2136,78	0,061
Aumento da Prop. AG	358,28	1092,07	0,067
Diminuição da Prop.FAF	269,58	596,64	0,075

FIGURA 31 – Deformação total das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 32 – Deformação recuperável das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 33 – Deformação plástica das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 34 – Recuperação elástica das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 35 – Módulo de fluência aos 3.600s para as misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 36 – Módulo de fluência aos 4.500s para as misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

FIGURA 37 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey modificadas – Agregado: Basalto

As Tabelas 30 e 31 as Figuras 38 a 44 apresentam os resultados de fluência estática das misturas Bailey modificadas, com o agregado gabro. Deve-se destacar que foram ensaiadas três réplicas.

TABELA 30 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas – Agregado: Gabro

Misturas	Deformação total (%)	Deformação recuperável (%)	Deformação plástica (%)	Recuperação (%)
Original	0,292	0,16	0,131	58,68
Aumento da MEE	0,289	0,149	0,140	53,37
Aumento da Prop. AG	0,234	0,153	0,081	70,20
Diminuição da Prop.FAF	0,316	0,160	0,156	50,60

TABELA 31 – Resultados médios do ensaio de fluência estática das Misturas Bailey Modificadas –Agregado: Gabro

Misturas	Módulo de fluência t = 3600s (kgf/cm ²)	Módulo de fluência t = 4500s (kgf/cm ²)	Inclinação
Original	355,66	4171,01	0,055
Aumento da MEE	365,81	863,66	0,046
Aumento da Prop. AG	542,44	2439,02	0,041
Diminuição da Prop.FAF	320,85	682,90	0,040

FIGURA 38 – Deformação total das misturas Bailey modificadas – Agregado: Gabro

FIGURA 39 – Deformação recuperável das misturas Bailey modificadas –Agregado: Gabro

FIGURA 40 – Deformação plástica das misturas Bailey modificadas –Agregado: Gabro

FIGURA 41 – Recuperação elástica das misturas Bailey modificadas – Agregado: Gabro

FIGURA 42 – Módulo de fluência aos 3.600s para as misturas Bailey modificadas – Agregado: Gabro

FIGURA 43 – Módulo de fluência aos 4.500s para as misturas Bailey modificadas – Agregados: Gabro

FIGURA 44 – Inclinação média da curva de fluência das misturas Bailey modificadas – Agregado: Gabro

6.5.1 Análise dos resultados referentes ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática das misturas Bailey originais e das misturas AZR

De acordo com os dados apresentados, todas as misturas analisadas mostraram-se resistentes à deformação permanente nas trilhas de roda, para um tráfego de muito alta intensidade, segundo a deformação total após uma hora de carregamento e a inclinação da curva de fluência no estágio de deformação constante (Tabelas 26 e 27).

Considerando-se o módulo de fluência para 3.600 segundos de ensaio, todas as misturas são potencialmente resistentes à deformação permanente nas trilhas de roda, para um tráfego de alta intensidade, pois ficam dentro do intervalo de 310 a 453 kgf/cm², excetuando-se a mistura Bailey basalto, que apresentou valor pouco acima do limite superior.

Em termos de deformação total, deformação recuperável e deformação plástica, a mistura Bailey Basalto apresentou valores bem abaixo dos apresentados pela mistura AZR Basalto. Porém, a mistura Bailey Gabro apresentou valores um pouco acima dos apresentados pela mistura AZR Gabro (Figuras 24, 25 e 26). Uma possível razão pode estar associada à zona de restrição considerada pela Especificação Superpave, pois a graduação da mistura Bailey Gabro é a única que cruza a zona de restrição.

Quanto à recuperação elástica, que corresponde à relação entre a deformação recuperada após os 15 minutos de descarga e a deformação total no final do ensaio de fluência, o melhor desempenho foi da mistura Bailey Basalto (Figura 27), bem acima do valor da mistura AZR Basalto. As misturas Bailey e AZR com gabro apresentaram valores bem próximos, mas com valor de recuperação um pouco maior para a mistura AZR.

O módulo de fluência, que corresponde à relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida, mostra um desempenho bem melhor da mistura Bailey Basalto em relação às demais misturas (Figura 28), considerando-se o módulo de fluência aos 3.600 segundos (somente carregamento). Para o módulo de fluência aos 4.500 segundos (ensaio completo), apresentado na Figura 29, as duas misturas Bailey (Basalto e Gabro) apresentaram valores bem acima das misturas AZR (Basalto e Gabro).

A inclinação média da curva de fluência, obtida através do gráfico de deformação em função do tempo, em escala log-log, mostra a velocidade com que a fluência ocorre, ou seja, o comportamento de uma mistura asfáltica é melhor quanto menor a inclinação. Conforme apresentado na Figura 30, os piores desempenhos foram da mistura AZR Basalto e Bailey Gabro, a exemplo do que também ocorreu com outros parâmetros relacionados ao ensaio de fluência estática.

6.5.2 Análise dos resultados referentes ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática das misturas Bailey modificadas

Todas as misturas Bailey modificadas mostraram-se resistentes à deformação permanente nas trilhas de roda, para um tráfego de muito alta intensidade, segundo a deformação total após uma hora de carregamento e a inclinação da curva de fluência no estágio de deformação constante (Tabelas 28 e 29 para o basalto e Tabelas 30 e 31 para o gabro).

Considerando-se o módulo de fluência para 3.600 segundos de ensaio, todas as misturas são potencialmente resistentes à deformação permanente nas trilhas de roda, para um tráfego de alta intensidade, pois ficam dentro do intervalo de 310 a 453 kgf/cm², excetuando-se as misturas Bailey basalto com aumento da massa específica escolhida (MEE) e Bailey Gabro com aumento da Proporção AG, apresentaram valores muito acima do limite superior.

Em termos de deformação total, deformação recuperável e deformação plástica, todas as misturas Bailey Basalto modificadas (Figuras 31, 32 e 33) apresentaram valores superiores aos apresentados pela mistura original, particularmente a mistura com aumento na Proporção AG, seguida da mistura com diminuição da Proporção FAF. Deve-se destacar que, dentre as misturas Bailey Basalto modificadas, as duas apresentam graduação que cruza a zona de restrição estabelecida pela Especificação Superpave.

No que diz respeito à deformação total, a mistura Bailey Gabro modificada com diminuição da Proporção FAF apresentou ligeiro aumento em relação à mistura original, enquanto a mistura com aumento da Proporção AG apresentou grande diminuição. A mistura com aumento de massa específica escolhida (MEE) não apresentou alteração.

As deformações recuperáveis de todas as misturas Bailey Gabro modificadas (Figura 39) foram menores do que a da mistura original, com diferença mais acentuada para a mistura com aumento da massa específica escolhida (MEE).

A deformação plástica da mistura com aumento da Proporção AG (Figura 40) apresentou redução significativa em relação à mistura original, enquanto as outras misturas Bailey Gabro modificadas apresentaram ligeiro aumento de deformação plástica.

Quanto à recuperação elástica, todas as misturas Bailey Basalto modificadas apresentaram comportamento inferior ao da mistura original. A maior diferença foi proporcionada pela mistura com diminuição da Proporção FAF (Figura 34). Nas misturas Bailey Gabro modificadas, o comportamento diferente, em relação ao das misturas Bailey Basalto modificadas, ficou por conta da mistura com aumento da Proporção AG (Figura 41), que apresentou recuperação elástica muito maior do que a mistura original.

O módulo de fluência aos 3.600 s (apenas carregamento) mostra um desempenho bem melhor da mistura Bailey Basalto modificada com aumento da massa específica escolhida (Figura 35), em relação às demais misturas modificadas e original, sendo que o pior comportamento foi o da mistura modificada com diminuição da Proporção FAF. Para as misturas Bailey Gabro modificadas, o melhor comportamento foi da mistura com aumento da Proporção AG (Figura 42).

Para o módulo de fluência aos 4.500 segundos (ensaio completo), apresentado nas Figuras 29 e 36, respectivamente para as misturas Bailey modificadas com basalto e gabro, os melhores desempenhos são da mistura com aumento da massa específica escolhida (MEE), para o basalto, e da mistura original, para o gabro, sendo que, dentre as misturas modificadas com gabro, o melhor comportamento foi o da mistura com aumento da Proporção AG.

Finalmente, em relação à inclinação média da curva de fluência, conforme apresentado nas Figuras 37 e 44, as modificações pioram o comportamento das misturas Bailey Basalto, principalmente a diminuição da Proporção FAF, e melhoram o comportamento das misturas Bailey Gabro, particularmente, também, com a diminuição da Proporção FAF.

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho teve por objetivos analisar os efeitos da graduação dos agregados no desempenho de misturas asfálticas, comparar os resultados de misturas densas de graduação graúda, selecionadas granulometricamente através do Método Bailey, com misturas densas de graduação fina, selecionadas por métodos convencionais, e verificar a aplicabilidade de certos fatores ou parâmetros adotados pelo Método Bailey para a composição e avaliação de uma distribuição granulométrica.

Nos estudos de dosagem das misturas asfálticas, optou-se pelo Método Rice, recomendado pela Especificação Superpave para a determinação da Densidade Máxima Medida, visando cálculos mais precisos das propriedades volumétricas das misturas. Os resultados de dosagem obtidos, correspondentes a um volume de vazios de 4%, salientam a influência da granulometria e de características físicas como: forma, textura e particularmente a absorção dos agregados sobre os teores de asfalto de projeto.

As misturas Bailey apresentaram valores maiores de vazios no agregado mineral e de relação betume vazio do que os das misturas convencionais, o que é indicativo de misturas menos propensas a deformações permanentes e potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga.

Em termos de Estabilidade Marshall, as misturas convencionais apresentaram comportamento superior, ou seja maiores, ao das misturas Bailey, apesar das misturas Bailey atenderem as restrições quanto a Estabilidade e Fluência Marshall.

Considerando-se, porém, a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração, indicador de equilíbrio entre resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga, as misturas Bailey apresentaram melhores resultados, ou seja valores menores.

No ensaio de fluência estática, os resultados de deformação total, recuperável e plástica mostram que a mistura Bailey Basalto apresentou melhor comportamento (menores deformações) do que a mistura convencional com basalto. Por outro lado, a mistura Bailey Gabro apresentou comportamento pior (maiores deformações) do que a mistura convencional com gabro. Deve-se salientar que a mistura Bailey Gabro é a única que cruza a zona de restrição da Especificação Superpave.

Quanto à recuperação elástica, o melhor desempenho (maior recuperação) foi da mistura Bailey Basalto, assim como em termos de módulo de fluência aos 3.600 segundos (somente carregamento) em que a mistura Bailey Basalto obteve o maior módulo de fluência. Para o módulo de fluência aos 4.500 segundos (ensaio completo), as duas misturas Bailey (Basalto e Gabro) apresentaram valores bem acima dos das misturas convencionais com basalto e gabro.

As misturas Bailey sofreram modificações de alguns parâmetros que controlam o processo de seleção granulométrica: aumento da massa específica escolhida (MEE), aumento da Proporção AG e diminuição da Proporção FAF. Tais alterações resultaram, para as misturas Bailey Basalto com aumento da Proporção AG e com diminuição da Proporção FAF, no cruzamento da zona de restrição estabelecida pela Especificação Superpave, sendo que tais misturas também apresentaram o pior desempenho quanto ao ensaio de Fluência Estática. Evidenciando a necessidade de estudos complementares sobre a zona de restrição, dentre as misturas Bailey Gabro modificadas, o melhor desempenho quanto ao ensaio de Fluência Estática ficou com a mistura com aumento da Proporção AG, que é a única que cruza a zona de restrição.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugerem-se pesquisas complementares sobre o Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas. Dentre os fatores que necessitam de investigação adicional destacam-se a utilização de outros agregados, com características mineralógicas e físicas diferentes das que foram consideradas neste trabalho, e uma maior variação das propriedades de controle do Método Bailey, visando quantificar os efeitos sobre o comportamento das misturas asfálticas decorrentes de ajustes nos parâmetros que governam o processo de seleção granulométrica.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a necessidade de estudos detalhados, com agregados representativos dos que são utilizados em obras rodoviárias no Brasil, sobre a importância e necessidade de se respeitar a zona de restrição estabelecida pela Especificação Superpave para as curvas granulométricas de agregados utilizados em misturas asfálticas.

Referências Bibliográficas

AASHTO (1997). T-19 – *Unit Weight and Voids in Aggregate*. American Association of State Highways Transportation Officials.

AASHTO (1999). PP-2 – *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*. American Association of State Highways Transportation Officials.

AASHTO (2000). PP-41 – *Practice for Design SMA*. American Association of State Highways Transportation Officials.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993). NBR 12891: Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall: Procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT (1993) NBR 12891 – Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro

Abrams, A. L. et al. (1991) *The Aggregate Handbook*. Washington, National Stone Association.

ASTM – American Society for Testing and Materials (1982). *Standard method of indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures – D 4123-82*.

Benson, F. J. (1970) Effects of Aggregate Size, Shape and Surface Texture on the Properties of Bituminous Mixtures – A literature Survey. Highway Research Board, SR 109, p.12-22.

Brown, E. R. e Mallick, R. B. (1994) *Stone Matrix Asphalt – Properties Related to Mixture Design*. National Center for Asphalt Technology. Report nº. 94-2, 1994.

Coelho, V. (1996) *Contribuição ao Estudo das Deformações Permanentes, nas Condições Gerais do Brasil, em Camadas de Concreto Asfáltico de Pavimentação*. São Carlos. 281p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- Coelho, V. e Sória, M. H. A. (1996) Influência da Composição Granulométrica de Agregados, nas Faixas "B" e "C" da ABNT, na Estabilidade Mecânica de Misturas Asfálticas Preparadas a Quente. *Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação. ABPv, Salvador / Bahia*. p.210-240.
- Cominsky, R. J.; B. M. Killingsworth; R. M. Anderson; D. A. Anderson e W. W. Crockford (1998) Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt. *National Cooperative Highway Research Program*, report 409, p. 1-26.
- Cross, S. A. e E. R. Brown (1992) Selection of Aggregate Properties to Minimize Rutting of Heavy Duty Pavements. In: Meininger, R. C. (ed) *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- DNER (1994). ME 078/94 – Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso
- DNER (1994a). ME 133/94 – *Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994b). ME 138/94 – *Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1995) ME 043/95 – *Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1997). ME 195/97 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo
- DNER (1998). ME 035/98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1998). ME 081/98 – *Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*
- DNER (1998). ME 194/98 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman
- DNER (2000). ES 385/99 – *Pavimentação – Concreto betuminoso*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- E. R. Brown e L.A. Cooley, Jr. (1999) Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. *National Cooperative Highway Research Program*, Report 425.

- Fernandes, J. L.; R Roque; M. Tia e L. Casanova (2000) Evaluation of uncompacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures. *79th Annual Meeting in January of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- GEIPOT (2000) Anuário Estatístico do GEIPOT – Transportes Rodoviários, GEIPOT, Ministério dos Transportes, Brasília, DF.
- Gouveia, L. T (2002). Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação Superpave. São Carlos. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1962). The AASHO Road Test. Washington, D. C., *Highway Research Board*, Special Report 73, 177p.
- Hills, J. F. (1973). *The Creep of asphalt mixes*. Journal of the Institute of Petroleum, v.59, n.570, p.247-262.
- Hilster, E. e Van de Loo, P. J. (1977). *The Creep test: influence of test parameters*. Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam.
- Huber, G. A.; J. C. Jones; P. E. Messersmith e M. Jackson (1998) Contribution of Fine Aggregate Angularity and Particle Shape to Superpave Mixture Performance. *Transportation Research Record*, n. 16099, p. 28-35.
- Izzo, Button, R. P. J. W. e Tahmoressi, M. (1997) Comparison of Coarse Matrix High Binder and Dense-Graded Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Record*, nº. 1590 – Paper nº. 970482, pº. 108-117.
- Kandhal, P. S.; K. Y. Foo e R. B. Mallick (1998) Critical Review of Voids in Mineral Aggregate Requirements in Superpave. *Transportation Research Record*, n. 1609, p. 21-27.
- Leite, L. F. M.; Motta, L. M. G.; Bernucci, L. B.; Soares, J. B. (2000). *Mechanical behavior os asphalt rubber mixes prepared in laboratory*. Asphalt rubber 2000 – The pavement material of the 21st Century. Vilamoura – Marinotel – Portugal.
- Little, D. N.; Button, J. W.; Youssef, H. (1993). *Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potencial*. Tranportation Research Record 1417, p.49-57.

- Medina, J. (1997). *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro. Editora UFRJ.
- Motta, L. M. G. et al. (1996) *Aplicação a ligantes, Agregados e Misturas Betuminosas*. Notas didáticas o Curso sobre Programa SHRP. *Instituto Brasileiro de Petróleo*, Rio de Janeiro.
- Motta, L. M. G.; Medina, J. e Scalco, R. (1993). *O projeto estrutural de pavimentos flexíveis e a dosagem de misturas asfálticas*. 27º Reunião Anual de Pavimentação – ABPv – Teresina – PI. P.523-545.
- Motta, L. M. G.; Pinto, S. (1994). *O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas*. 12º Encontro de Asfalto, p.152-718.
- Motta, L. M. G.; SÁ; M.F.P.; Oliveira, P. M. F.; Souza; A. M. (1996). *O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas*. 30ª Reunião Anual de Pavimentação ABPv, p.115-135.
- NAPA – National Asphalt Pavement Association (2002) *Designing and Constructing SMA Mistures – State-of-the-Particle*. Quality Improvement Series 122 Lanham, MD, EUA.
- Prithvi S. Kandhal e L. Allen Cooley, Jr. (2002) *Coarse- Versus Fine-Graded Superpave Mixtures – Comparative Evaluation of Resistance to Rutting*. *Transportation Research Record*, nº. 1789 – Paper nº. 02-2403, pº. 216-224.
- Roberts, F. L.; P. S. Kandhal; E. R. Brown; D. Y. Lee e T. W. Kennedy (1991) *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. Ed. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland.
- SÁ, Maria F. P. (1996). *Estudo da Deformação Permanente de Misturas Betuminosas Através de Ensaio Estáticos e Dinâmicos*. Rio de Janeiro - RJ. Dissertação (Mestrado) - COPPE - UFRJ, 248 p.
- SHRP (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. The Strategic Highway Research Program. National Academy of Science, Washington, D. C.

- Taira, C. (2001). *Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP 20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Tayebali, A. A; Malpass, G. A. e Khosla, N. P. (1998). Effect of mineral filler type and amount on design and performance of asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*, n. 1609, p.36-43.
- Van de Loo, P. J. (1974). Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Proceedings*, v.43, p.253-258.
- Vavrik, W. R.; G. A. Huber; W. J. Pine; S. H. Carpenter e R. Bailey. (2002a) Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design. *Transportation Research Record*, Circular nº. E-C044.
- Vavrik, W. R.; W. J. Pine e S. H. Carpenter. (2002b) Aggregate Blending for Asphalt Mix Design – Bailey Method. *Transportation Research Record*, nº. 1789 – Paper nº. 02-3629, pº. 146-153
- Vavrik, W. R.; W. J. Pine; G. A. Huber, S. H. Carpenter e R. Bailey. The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in Mineral Aggregate. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 70, 2001.

Exemplo de Seleção Granulométrica pelo Método Bailey

Os cálculos seguintes mostram um exemplo de seleção granulométrica pelo Método Bailey, usando-se dois tipos de agregados graúdos, um agregado fino e um material de preenchimento (fíler). O uso de agregados com diferentes massas específicas é para mostrar como os agregados são misturados através do volume.

Para o início da seleção é necessário coletar algumas informações, como a distribuição granulométrica dos agregados e suas respectivas massa específica e massa específica solta e compactada, de acordo com a norma AASHTO T-19/T 19M-93 (1997). Em seguida, deve-se tomar algumas decisões que determinam o tipo de mistura a ser selecionada:

- Massa específica escolhida através de porcentagem da massa específica solta;
- Porcentagem desejada passando na peneira 0,075mm;
- Quantidade desejada, em volume, de agregado graúdo na mistura;
- Quantidade desejada, em volume, de agregado fino na mistura.

Segue agora um roteiro, passo a passo, de como selecionar uma mistura pelo Método Bailey. A Tabela 32 é um modelo da disposição dos dados para os cálculos.

Passo 1

Determine a massa específica escolhida para cada agregado graúdo, de acordo com a massa específica solta de cada agregado graúdo da mistura. A massa específica escolhida para os agregados finos é simplesmente a massa específica compactada dos agregados.

Cálculo

Multiplique a porcentagem da massa específica solta de cada agregado gráúdo pela massa específica escolhida da mistura.

Equação

Massa específica escolhida do agregado gráúdo = massa específica solta x porcentagem desejada da massa específica solta (massa específica escolhida)

Agregado gráúdo (AG)

$$\text{AG \#1: Massa específica escolhida} = 1505\text{kg/m}^3 \times 105\% = 1581\text{kg/m}^3 \quad (1a)$$

$$\text{AG \#2: Massa específica escolhida} = 1434\text{kg/m}^3 \times 105\% = 1506\text{kg/m}^3 \quad (1b)$$

Passo 2

Determine a massa específica contribuinte de cada agregado gráúdo da mistura, de acordo com a proporção desejada, através do volume do agregado gráúdo.

Cálculo

Multiplique a porcentagem de agregado gráúdo da mistura pela massa específica escolhida de cada agregado.

Equação

Contribuição = porcentagem de agregado gráúdo x massa específica solta

$$\text{AG \#1: Contribuição} = 40\% \times 1581\text{kg/m}^3 = 632\text{kg/m}^3 \quad (2a)$$

$$\text{AG \#2: Contribuição} = 60\% \times 1506\text{kg/m}^3 = 903\text{kg/m}^3 \quad (2b)$$

Passo 3

Determine os vazios em cada agregado gráúdo, de acordo com a sua massa específica escolhida e sua contribuição em volume. Depois, são somados os vazios de cada agregado gráúdo.

Cálculo

Primeiro calcule um menos a divisão entre a massa específica escolhida e a multiplicação da massa específica do agregado pela massa específica da água. Então,

multiplique o resultado pela porcentagem de agregado gráudo da mistura. Em seguida, some a contribuição de cada agregado gráudo.

TABELA 32 - Exemplo de seleção granulométrica pelo Método Bailey usando dois agregados graúdos e um fino (DMN = 12,5mm)

Classe do material	Número de agregado gráudo			Número de agregado fino			Material mineral de preenchimento
	CA-1	CA-2	CA-3	FA-1	FA-2	FA-3	
	Pedra 1	Pedrisco		Pó			
				Valor de dosagem	Especificação		
Densidade escolhida de AG pela % da densidade solta				103	95 - 105		
Porcentagem desejada passando na 0,075mm				4,5	3,5 - 6,0		
Mistura de agregado gráudo pelo volume				Mistura de agregado fino pelo volume			
25		75		100			
% da mistura acima deve somar 100			100	% da mistura acima deve somar 100		100	
Peso específico combinado de todos os agregados			2,888	Volume total de agregado gráudo		53,7	
				Volume total de agregado fino		46,3	
Propriedades dos agregados							
19,0	100,0	100,0		100,0			100,0
12,5	94,0	100,0		100,0			100,0
9,5	38,0	99,0		100,0			100,0
4,75	3,0	30,0		99,0			100,0
2,36	1,9	5,0		79,9			100,0
1,18	1,8	2,5		48,8			100,0
0,60	1,8	1,9		29,0			100,0
0,3	1,8	1,4		14,2			100,0
0,15	1,8	1,3		8,8			98,0
0,075	1,7	1,2		3,0			90,0
Massa específica (g/cm³)	2,702	2,698		3,162			2,806
Massa específica aparente (g/cm³)	2,812	2,812		3,600			2,806
% absorção	1,452	1,502		3,844			
Massa específica solta (kg/m³)	1426	1400					
Massa específica compactada (kg/m³)	1608	1592		2167			

Equação

$$\text{Vazios no agregado gráudo} = \left(1 - \frac{\text{massa unitária escolhida}}{G_{sb} \times 1000} \right) \times \% \text{ AG da mistura}$$

onde: G_{sb} = massa específica do agregado

$$\text{AG \#1: Vazios no AG \#1} = \left(1 - \frac{1581}{2,928 \times 1000} \right) \times 40 = 18,4 \quad (3a)$$

$$\text{AG \#2:} \quad \text{Vazios no AG \#2} = \left(1 - \frac{1506}{2,928 \times 1000}\right) \times 60 = 29,1 \quad (3b)$$

$$\text{Total:} \quad \text{Vazios no AG \#1} + \text{vazios no AG \#2} = 18,4 + 29,1 = 47,6 \quad (3c)$$

Passo 4

Determine a massa específica de cada agregado fino, de acordo com o volume desejado de agregado fino da mistura. Essa é a massa específica que preenche os vazios no agregado graúdo.

Cálculo

Multiplique a massa específica escolhida do agregado fino pela porcentagem em volume deste agregado na mistura de agregado fino e multiplique o valor obtido pela porcentagem total de vazios no agregado graúdo (3c).

Equação

Contribuição de cada agregado fino = massa específica escolhida do agregado fino x % de agregado fino na mistura x % de vazios no agregado graúdo.

Agregado fino (AF)

$$\text{AF \#1: Contribuição} = 1671 \text{kg/m}^3 \times 100\% \times 47,6\% = 795 \text{kg/m}^3 \quad (4)$$

Nota: Se houver mais de um agregado fino, o cálculo deve ser repetido para cada agregado.

Passo 5

Determine a massa específica para a mistura total dos agregados.

Cálculo

Soma-se a massa específica de cada agregado.

Equação

$$\text{Massa específica da mistura} = (2a) + (2b) + (4)$$

$$\text{Massa específica da mistura} = 632\text{kg/m}^3 + 903\text{kg/m}^3 + 795\text{kg/m}^3 = 2330\text{kg/m}^3 \quad (5)$$

Passo 6

Determine a porcentagem inicial de cada agregado da mistura em peso.

Cálculo

Divida a massa específica de cada agregado pela massa específica da mistura de agregados.

Equação

Porcentagem em peso = massa específica contribuinte do agregado / massa específica da mistura

$$\text{AG \#1:} \quad \% \text{ em peso} = 632\text{kg/m}^3 / 2330\text{kg/m}^3 = 0,271 = 27,1\% \quad (6a)$$

$$\text{AG \#2:} \quad \% \text{ em peso} = 903\text{kg/m}^3 / 2330\text{kg/m}^3 = 0,388 = 38,8\% \quad (6b)$$

$$\text{AF \#1:} \quad \% \text{ em peso} = 795\text{kg/m}^3 / 2330\text{kg/m}^3 = 0,341 = 34,1\% \quad (6c)$$

As estimativas iniciais para divisão dos agregados são baseadas na escolha de quantos agregados existem na mistura. A estimativa inicial de divisão de agregados é ajustada considerando-se as partículas de agregado fino na porcentagem de agregado graúdo e vice-versa.

Passo 7

Numa mistura com DMN 12,5mm (Diâmetro Máximo Nominal), a divisão entre o agregado graúdo (AG) e o agregado fino (AF) é feita por meio da PCP (Peneira de Controle Primário), que neste caso é a peneira 2,36mm.

Cálculo

Determine a porcentagem passante na peneira 2,36mm para a porção de agregado graúdo e a porcentagem retida para a porção de agregado fino.

$$\text{AG \#1:} \quad \% \text{ de agregado fino} = 0\% \quad (7a)$$

$$\text{AG \# 2:} \quad \% \text{ de agregado fino} = 35,5\% \quad (7b)$$

$$\text{AF \#1:} \quad \% \text{ de agregado graúdo} = 100,0\% - 98,8\% = 1,2\% \quad (7c)$$

Passo 8

Determine a porcentagem de agregado fino em cada fração de agregado graúdo, de acordo com a sua porcentagem na mistura.

Cálculo

Para cada fração de agregado graúdo, determine a porcentagem passante na peneira 2,36mm como uma porcentagem da mistura total dos agregados.

Equação

Porcentagem de agregado fino na mistura = Porcentagem de agregado graúdo da mistura x porcentagem de agregado fino na porção de agregado graúdo.

AG #1:

$$\text{Porcentagem de AF nesta porção de material graúdo} = 27,1\% \times 0\% = 0\% \quad (8a)$$

AG #2:

$$\text{Porcentagem de AF nesta porção de material graúdo} = 38,8\% \times 35,5\% = 13,8\% \quad (8b)$$

Passo 9

Some a porcentagem de partículas de agregado fino em toda porção de agregado graúdo.

Total AF no AG:

$$\text{Porcentagem total de AF na mistura de agregado graúdo} = 0\% + 13,8\% = 13,8\% \quad (9)$$

Passo 10

Determine a quantidade de agregado graúdo em cada porção de agregado fino, de acordo com a sua porcentagem na mistura.

Cálculo

Para cada porção de agregado fino determine a porcentagem retida na peneira 2,36mm como uma porcentagem total da mistura de agregado.

Equação

Porcentagem de agregado graúdo na porção de agregado fino = porcentagem de material fino x porcentagem de agregado graúdo na porção de finos.

AF #1:

$$\text{Porcentagem de AG na mistura de agregado fino} = 34,1\% \times 1,2\% = 0,4\% \quad (10)$$

Passo 11

Some a porcentagem de partículas de agregado graúdo em toda a porção de agregado fino.

Total AG no AF:

$$\text{Porcentagem total de AG na mistura de agregado fino} = 0,4\% \quad (11)$$

Passo 12

Faça a correção das porcentagens iniciais de material graúdo na mistura, de acordo com a contribuição de finos, através das porções de agregados graúdos e a contribuição de graúdos através das porções de agregados finos.

Equação

Ajuste da porcentagem na mistura =

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

AG # 1:

$$\text{Ajuste da \% na mistura} = (27,1\%) + (0\%) - \left(\frac{27,1\% \times 0,4\%}{27,1\% + 38,8\%} \right) = 27,0\% \quad (12a)$$

AG # 2:

$$\text{Ajuste da \% na mistura} = (38,8\%) + (13,8\%) - \left(\frac{38,8\% \times 0,4\%}{27,1\% + 38,8\%} \right) = 52,3\% \quad (12b)$$

Passo 13

Faça a correção da porcentagem inicial da mistura de cada agregado fino para considerar a quantidade de agregado graúdo que ela contém e o agregado fino proveniente da porção de agregado graúdo.

Equação

Porcentagem de material ajustado na mistura =

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

AF #1:

$$\text{Ajuste da \% na mistura} = (34,1\%) + (0,4\%) - \left(\frac{34,1\% \times 3,8}{34,1\%} \right) = 20,8\% \quad (13)$$

O próximo passo é determinar se o filer mineral (FM) pode ser necessário para trazer a porcentagem passante na peneira 0,075mm para o nível desejado.

Passo 14

Determine a quantidade de material contribuinte passante na peneira 0,075mm para cada agregado, usando as porcentagens ajustadas dos materiais.

Cálculo

Multiplique a porcentagem passante na peneira 0,075mm para cada agregado pela porcentagem ajustada da mistura de cada agregado.

Equação

Porcentagem contribuinte da peneira 0,075 para cada material = porcentagem ajustada do material x porcentagem passante na peneira 0,075mm para cada material.

$$\text{AG \#1: Porcentagem contribuinte da 0,075mm} = 27,0\% \times 0\% = 0\% \quad (14a)$$

$$\text{AG \#2: Porcentagem contribuinte da 0,075mm} = 52,3\% \times 0\% = 0\% \quad (14b)$$

$$\text{AF \#1: Porcentagem contribuinte da 0,075mm} = 20,8\% \times 0\% = 0\% \quad (14c)$$

Passo 15

Determine a quantidade de filer mineral (FM) requerido, se houver, para trazer a porcentagem passante na peneira 0,075mm para o nível desejado.

Nota: Para esta mistura a quantidade passante na peneira 0,075mm desejada é de 3,5%.

Equação

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

$$\text{FM: Porcentagem de MF} = \left(\frac{3,5\% - 0\%}{100\%} \right) = 3,5\% \quad (15)$$

Passo 16

Determine a porcentagem final da porção de agregado fino, adicionando a porcentagem de filer mineral (FM) ao agregado fino. Neste passo a porcentagem de agregado graúdo (AG) da mistura foi mudada devido a porção graúda do agregado fino. A porcentagem de agregado fino (AF) da mistura é ajustada pela quantidade de filer mineral (FM).

Equação

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

$$\text{AF \#1: Porcentagem final da mistura} = 20,8\% - \left(\frac{20,8\% \times 3,5\%}{20,8\%} \right) = 17,3\% \quad (16)$$

RESULTADOS

As porcentagens finais da mistura vêm dos resultados das seguintes equações:

TABELA 33 – Resultado dos cálculos do Método Bailey

Agregado	Equação	Resultado (%)
AG #1	12a	27,0
AG #2	12b	52,2
AF #1	16	17,3
FM	15	3,5

Usando as porcentagens e os parâmetros de controle do Método Bailey, a seleção granulométrica é determinada como mostra a Tabela 41.

TABELA 34 – Mistura calculada pelo Método Bailey

Peneiras (mm)	MISTURA CALCULADA	Faixa		
19,0	100,0	Proporção AG	0,64	0,50 - 0,65
12,5	96,8	Proporção GAF	0,43	0,35 - 0,50
9,5	78,2	Proporção FAF	0,51	0,35 - 0,50
4,75	63,0			
2,36	39,1			
1,18	25,5			
0,60	17,0			
0,30	11,9			
0,15	8,6			
0,075	3,5			