

INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS E VOLUMÉTRICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS: ANÁLISE DO MÉTODO BAILEY

Marcos Bottene Cunha
Lílian Taís de Gouveia
José Leomar Fernandes Júnior
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Laura Maria Goretti da Motta
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Civil – COPPE

RESUMO

Apresenta-se uma avaliação do Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas. O Método Bailey foi desenvolvido no Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) e é usado desde 1980. Visa aperfeiçoar a seleção granulométrica por volume dos agregados e, conseqüentemente, o desempenho de misturas asfálticas. Através de um modo sistemático de seleção e ajuste da graduação dos agregados, proporciona uma mistura asfáltica com esqueleto de agregados bem equilibrado para resistir à deformação permanente. Resulta de um proporcionamento adequado do volume de vazios no agregado mineral, o que permite um maior teor de ligante e aumento da durabilidade da mistura. Os resultados apresentados neste artigo consideram misturas asfálticas produzidas com dois tipos de agregado (basalto ou gábro), mostrando que as misturas Bailey apresentam melhores resultados em termos do equilíbrio entre resistência à deformação permanente e fadiga do que as misturas convencionais feitas com os mesmos materiais, porém selecionadas granulometricamente de forma tradicional, por meio de tentativas.

ABSTRACT

It is presented an evaluation of the Bailey Method of gradation selection of aggregates for Hot Mix Asphalt (HMA). The Bailey Method was developed at the Illinois Department of Transportation (IDOT) and it has been used since the early 1980s. It aims the improvement of the gradation selection by volume of aggregates and, consequently, the performance of HMA. Through a systematic process of selection and adjustment of the aggregate gradation, it provides a HMA with a well balanced aggregate skeleton to resist rutting, which is the result of an adequate amount of voids in the mineral aggregate that allows higher binder content and the improvement of the mixture durability. The results presented in this paper consider asphalt mixtures produced with two types of aggregates (basalt or gabbro), showing that the Bailey Asphalt Mixtures present better results in terms of the equilibrium between rutting and fatigue cracking than conventional mixtures produced with the same materials, even though with aggregates selected by the traditional tentative and error process.

1. INTRODUÇÃO

Na dosagem de misturas asfálticas, muitas têm sido as experiências para determinação de uma combinação de agregados que resulte em uma estrutura resistente, mas com o teor de ligante necessário a uma boa durabilidade. Tais estudos têm abordado, dentre outros aspectos, o volume de vazios (Vv), os vazios no agregado mineral (VAM), os vazios preenchidos com asfalto e os vazios no agregado gráudo.

O desempenho, a curto, médio e longo prazo de uma mistura asfáltica está relacionado com a sua distribuição granulométrica. 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 distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica que se quer produzir é o primeiro passo para a elaboração de uma mistura asfáltica para que esta apresente um bom desempenho no campo.

No método corrente de dosagem das misturas asfálticas, a proporção entre os vários materiais minerais disponíveis é feita em geral por tentativas a partir de uma faixa granulométrica de referência, e para os projetistas menos experientes há dificuldade de conduzir esta escolha para produzir este ou aquele efeito desejado sem passar por muitas “tentativas e erros” ou mesmo sem tirar partido mais efetivo da grande contribuição que o esqueleto mineral tem nas características mecânicas das misturas asfálticas.

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 mineral particular com muitos pontos de contato entre os agregados maiores o que resulta em uma estrutura resistente à deformação permanente, na maioria das vezes. Proporcionar uma ou outra requer o entendimento do funcionamento do esqueleto mineral pretendido em cada caso, o que não é facilmente feito com o método atual.

Além da utilização de materiais adequados, com melhores propriedades físicas, como forma, textura superficial e angularidade adequadas, é necessário um método de dosagem granulométrica que garanta uma estrutura adequada e que permita, simultaneamente, um teor de ligante suficiente para uma boa durabilidade. O Método Bailey visa suprir a necessidade, que não é exclusiva dos organismos rodoviários brasileiros, de um método sistemático de seleção granulométrica de misturas asfálticas, capaz de proporcionar um revestimento com resistência às deformações permanentes, às trincas por fadiga e ao desgaste (Vavrik *et al.*, 2001 e Cunha, 2004).

Este trabalho apresenta uma aplicação do Método Bailey a um conjunto de misturas asfálticas preparadas em laboratório com dois tipos de agregados quanto à geologia (um basalto e um gabro) e um ligante asfáltico (CAP 20), em que foram avaliados os efeitos das escolhas granulométricas em termos de resultados das proporções volumétricas de referência tradicionais (Vv, VAM e RBV) e de ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral (DNER ME 138/94), módulo de resiliência (DNER ME 133/94) e compressão uniaxial estática, ainda não normalizado no Brasil, efetuado segundo Little *et al.* (1993) e Taira (2001).

Os resultados foram bastante promissores, sendo notáveis as diferenças entre as proporções estabelecidas entre o método das tentativas e o Método Bailey. Este trabalho se baseia na dissertação do primeiro autor (Cunha, 2004).

2. MÉTODO BAILEY

O Método Bailey (Vavrik *et al.*, 2001) 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 a uma adequada distribuição de vazios (Vavrik *et al.*, 2002a).

É típico do Método Bailey permitir ajustes na quantidade de vazios na mistura em função da porcentagem de cada material e considerar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas como sendo dependente, principalmente, do intertravamento dos agregados graúdos, que é um parâmetro obtido através dos ensaios de massa específica solta e compactada, que são dados de entrada para os cálculos do Método Bailey.

A compactação de cada fração de agregado da mistura, os vazios no agregado mineral (VAM) e os vazios da mistura (Vv) são características ligadas diretamente ao Método Bailey de seleção granulométrica que permite selecionar a estrutura de agregados da mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos, podendo ser usado com qualquer método de dosagem de misturas asfálticas (Superpave, Marshall, Hveem etc.).

Para assegurar uma quantidade ideal de asfalto, os vazios no agregado mineral (VAM) podem ser ajustados variando-se a quantidade de agregados graúdo e fino na mistura. Desta forma, misturas selecionadas granulometricamente pelo Método Bailey podem ter um “esqueleto” de agregados bem proporcionado, para uma elevada estabilidade, e ao mesmo tempo um adequado valor de RBV, para uma boa durabilidade.

No Método Bailey são determinados parâmetros, baseados nos princípios de compactação das partículas, usados para analisar toda a estrutura de agregados e balizar a composição da mistura. Esses parâmetros são chamados de proporção de agregados graúdos (Proporção AG), proporção graúda dos agregados finos (Proporção GAF) e proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF), determinados através de certas peneiras de controle adotadas pelo método.

Existe recomendação de valores máximos e mínimos de cada proporção, visando assegurar o melhor intertravamento dos agregados, porém esses fatores podem ser ajustados com a finalidade de aumentar ou diminuir os vazios no agregado mineral (VAM) e restringir a possibilidade de segregação da mistura.

2.1. Agregado graúdo e fino

Apesar de tradicionalmente o agregado graúdo ser considerado o material retido na peneira nº 4 (4,75mm), no caso do Método Bailey a distinção entre finos e graúdos não é constante para todas as faixas granulométricas utilizadas para as misturas densas. Ao contrário, esta distinção é feita em função do diâmetro máximo nominal (DMN) do agregado, que por sua vez define algumas peneiras de controle, chamadas de Peneiras de Controle Primário, Secundário, Terciário e Peneira Média (PCP, PCS, PCT e PM, respectivamente), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: 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 determinação das peneiras de controle é feita com base no DMN do agregado, que é a primeira peneira acima da que retém mais que 10% de material da mistura de agregados em questão. O diâmetro da PCP é determinado pela multiplicação do fator 0,22 pelo DMN, enquanto o diâmetro da PCS é o resultado da multiplicação do diâmetro da PCP pelo mesmo fator, assim como o diâmetro da PCT é resultado da multiplicação do diâmetro da PCS pelo mesmo fator 0,22. A PM é determinada como sendo a peneira mais próxima da metade do DMN.

Vavrik *et al.* (2002a) explicam a origem deste fator (0,22), usado para a determinação das peneiras de controle, como sendo resultante de análises, em duas e três dimensões, da compactação de agregados de diferentes formas e tamanhos, que mostraram que a razão do diâmetro das partículas entre 0,15 e 0,29 seria o ideal para os diferentes tipos de agregados, tendo-se adotado o valor 0,22 como padrão.

No Método Bailey considera-se agregado graúdo todo material retido na PCP, enquanto o material que passa na PCP e fica retido na PCS é considerado como fração graúda do agregado fino e o material que passa na PCS é considerado como a fração fina do agregado fino. A PCT é utilizada para a avaliação da fração fina do agregado fino e a PM é utilizada para a avaliação da fração graúda da mistura. Considera-se, ainda, a contribuição do material de preenchimento em cada fração.

Para ilustrar o que foi explicado acima, tem-se, por exemplo, da definição de graúdos e finos do Método Bailey, que em uma mistura com DMN 37,5mm as partículas de 9,5mm são consideradas agregado fino, pois preenchem os vazios deixados pelas partículas de 37,5mm. Já numa mistura com DMN 12,5mm, as partículas com 9,5mm de diâmetro serão consideradas agregado graúdo pelo Método Bailey.

2.2. Combinação dos agregados por volume

Para o cálculo do Método Bailey, cada agregado graúdo da mistura (por exemplo: pedra 1 e pedrisco) deve ter a sua massa específica solta e compactada determinada e para cada agregado fino (por exemplo: pó de pedra), deve ser determinada apenas a massa específica compactada, de acordo com a norma AASHTO T-19/T 19M-93 (1997). Esses são os dados de entrada para os cálculos do método, representando como os agregados se arranjam estruturalmente, formando vazios, e são necessários para a avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados.

A massa específica solta dos agregados graúdos da mistura expressa a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente, em uma só camada, sem qualquer tipo de esforço de compactação, o que representa a situação de mínimo contato entre partículas. A massa específica compactada dos agregados graúdos e finos também é a quantidade de agregados necessária para preencher um dado recipiente, porém com a aplicação de um esforço de compactação que diminui os vazios e aumenta o contato entre as partículas. A compactação é realizada por meio de 25 golpes de uma haste metálica, aplicados em cada uma das três camadas formadas com o lançamento dos agregados no recipiente (AASHTO T-19/T 19M-93, 1997).

É preciso escolher, de acordo com o objetivo da mistura que se queira preparar, conforme ilustrado na Figura 1, 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.

Para se obter um determinado grau de intertravamento do agregado graúdo, é recomendado que a porcentagem da massa específica escolhida fique entre 95% e 105% da massa específica solta. Devem ser evitados valores acima de 105% da massa específica solta, pois podem dificultar a compactação no campo e aumentar a probabilidade de degradação do agregado, e valores abaixo de 90% da massa específica solta, pois resultam em misturas sem o intertravamento do agregado graúdo (Vavrik *et al.*, 2002a).

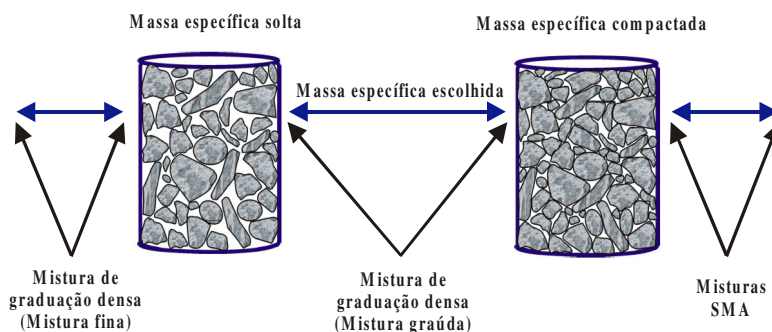


Figura 1: Esquema da metodologia para seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos (Vavrik *et al.*, 2002a)

2.3. Análise das misturas

Pelo Método Bailey, após a determinação da distribuição granulométrica, avalia-se a mistura dividindo-a em três porções distintas (porção graúda, porção graúda do agregado fino e porção fina do agregado fino), sendo cada porção avaliada individualmente através de três parâmetros de controle:

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

As faixas recomendadas para cada uma das proporções (Equações 1, 2 e 3) é função do DMN e estão indicadas na Tabela 2 (Vavrik *et al.*, 2002a).

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\% \text{ passante na PM} - \% \text{ passante na PCP})}{(100\% - \% \text{ passante na PM})} \quad (1)$$

$$\text{Proporção GAF} = \frac{\% \text{ passante na PCS}}{\% \text{ passante na PCP}} \quad (2)$$

$$\text{Proporção FAF} = \frac{\% \text{ passante na PCT}}{\% \text{ passante na PCS}} \quad (3)$$

Tabela 2: Faixas recomendadas para os parâmetros de proporção dos agregados (Vavrik *et al.*, 2002a)

	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

2.3.1. Proporção de agregados graúdos (Proporção AG)

O parâmetro de proporção dos agregados graúdos avalia a compactação da porção graúda e os vazios resultantes do arranjo desta fração. 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 estrutura resistente de agregado fino para alcançar as propriedades volumétricas requeridas. Além disso, uma mistura com a Proporção AG abaixo da faixa recomendada na Tabela 2 pode resultar em uma mistura propensa à segregação. Misturas descontínuas, que possuem tipicamente Proporção AG abaixo da faixa recomendada, têm maior tendência à segregação que misturas de graduação contínua (Vavrik *et al.*, 2002a).

Por outro lado se a Proporção AG aumenta, chegando próximo de um, os vazios no agregado mineral também aumentam. Desta forma, a fração de agregado graúdo fica desbalanceada, porque as partículas que passam pela PM, que não são considerados agregados graúdos, tentam controlar o esqueleto de agregado graúdo. Embora uma mistura com grande quantidade de partículas que passam pela PM não seja tipicamente propensa à segregação, a fração de agregado graúdo pode ser menos contínua na porção abaixo da PCP e, conseqüentemente, a mistura resultante pode apresentar dificuldades de compactação no campo e tendência a corrugação com a aplicação das cargas de tráfego, por não estar bem intertravada.

Geralmente, misturas de agregados com alta Proporção AG apresentam uma curva granulométrica em forma de “S” no gráfico de representação da granulometria expresso com escala de potência 0,45, como o usado no método Superpave. De acordo com o método Superpave, tais misturas tendem a apresentar dificuldades de compactação (Roberts *et al.*, 1991).

2.3.2. Proporção graúda 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 graúda e outra fina, e pode ser avaliado, separadamente, de forma similar à análise feita para a mistura total. A porção graúda do agregado fino cria vazios na mistura que são preenchidos pela porção fina do agregado fino. Assim como na fração de agregado graúdo, parte dos vazios deve ser preenchida com um volume apropriado da porção fina do agregado fino.

Com o aumento da Proporção GAF, o agregado fino, ou seja, 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 não adequada sob o ponto de vista estrutural.

Se a Proporção GAF ficar abaixo da faixa indicada na Tabela 1, 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.

2.3.3. *Proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF)*

A porção fina dos agregados finos preenche os vazios criados pela porção graúda dos agregados finos sendo que a Proporção FAF indica como a porção fina do agregado fino é compactada. 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.

3. AVALIAÇÃO DO MÉTODO BAILEY

Para testar a validade do Método Bailey e entender a extensão dos benefícios de sua aplicação foi feito um experimento onde foram utilizados dois agregados de origens distintas, um basalto e um gabro, e um ligante asfáltico CAP 20 (Cunha, 2004). Deve-se ressaltar que as referências consultadas sobre o Método Bailey (Vavrik *et al.*, 2001, 2002a e 2002b) limitam-se a discutir o método sob o ponto de vista volumétrico, enquanto neste trabalho analisam-se também os efeitos do método de seleção granulométrica no comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Foram selecionadas dez diferentes distribuições granulométricas, cinco delas preparadas com agregado de basalto e cinco com gabro (Tabelas 3 e 4). Para cada tipo de agregado foram preparadas: uma mistura de graduação fina, chamada de AZR, por passar Acima da Zona de Restrição do método Superpave, selecionada pelo método de tentativas; quatro misturas de graduação graúda, selecionadas pelo Método Bailey.

A mistura designada “Bailey original” foi obtida com a aplicação dos conceitos do método aos materiais disponíveis. Depois da obtenção das massas específicas soltas e compactadas, adotou-se a massa específica escolhida (MEE) de 103% da massa específica solta do agregado graúdo, para a mistura constituída de basalto, e 95% para a mistura constituída de gabro, visando-se à obtenção de uma mistura densa (graúda).

As outras três misturas consistiram em modificações nos parâmetros de controle do Método Bailey: aumento de 5% na massa específica escolhida (“mod. MEE”); aumento de 0,2 na Proporção AG (“mod. Prop. AG”); diminuição de 0,05 na Proporção FAF (“mod. Prop. FAF”). Segundo Vavrik *et al.*, (2002a), cada uma dessas modificações resultaria num aumento de 0,5 a 1,0% no VAM.

Tabela 3: Quantidade de agregados, por peneira, das misturas Bailey e AZR constituídas de 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	100,0
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 4: Quantidade de agregados, por peneira, das misturas Bailey e AZR constituídas de 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	100,0
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

Foram preparados corpos-de-prova Marshall, com 75 golpes por face (DNER – 1995), das misturas asfálticas com as dez curvas granulométricas selecionadas, visando-se avaliar o comportamento mecânico através dos ensaios de Resistência à Tração (DNER – 1994b), Módulo de Resiliência (DNER – 1994a) e Compressão Uniaxial Estática (às vezes referido como ensaio de Fluência Estática ou, ainda, como “Creep” E estático). Neste trabalho, o ensaio de Compressão Uniaxial Estática foi executado a uma temperatura de 40°C, com pressão de 0,01MPa, tempo de carregamento de 3.600 s e tempo de descarregamento de 1.500 s.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As misturas Bailey apresentaram valores de vazios no agregado mineral (VAM) e de relação betume vazio (RBV) próximos aos da mistura convencional no caso do basalto e superiores no caso do gabro, como mostra a Tabela 5, o que é indicativo de misturas menos propensas a deformações permanentes e potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga.

Tabela 5: Resultados médios dos parâmetros volumétricos das misturas Bailey original e AZR para os dois tipos de agregados deste estudo

Misturas	Teor de ligante (%)	RBV (%)	Vv (%)	VAM (%)
Bailey (original) Basalto	6,8	80,65	4,2	19,73
AZR Basalto	6,7	80,28	3,9	19,60
Bailey (original) Gabro	7,5	79,70	4,2	19,60
AZR Gabro	6,2	74,65	4,3	17,11

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração das misturas Bailey original (na condição de MEE) e AZR, para os dois tipos de agregado utilizados. Notam-se diferenças significativas entre os valores encontrados nas duas condições de granulometria, para os dois materiais. No entanto, comparando-se os resultados na mesma condição granulométrica (Bailey basalto com Bailey gabro e AZR basalto com AZR gabro), respectivamente entre os tipos de agregado, as diferenças são bem menores, o que ressalta a importância do esqueleto mineral sobre essas características mecânicas. Considerando-se a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração (MR/RT), indicador de flexibilidade e de maior adequação ao critério de fadiga, as misturas Bailey apresentaram melhores resultados, pois apresentam valores menores deste parâmetro.

Tabela 6: Resultados médios das réplicas dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência

Misturas	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
Bailey (original) Basalto	1,10	2.816	2.560
AZR Basalto	1,35	5.145	3.811
Bailey (original) Gabro	1,16	3.527	3.041
AZR Gabro	1,36	5.408	3.976

No ensaio de compressão uniaxial 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, como mostra a Figura 2. 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. Há de se destacar que este ensaio, por não possuir ainda um critério de aceitação para misturas brasileiras, serve apenas como critério comparativo entre misturas.

Quanto à recuperação elástica medida no ensaio de compressão uniaxial estática, o melhor desempenho (maior recuperação) foi da mistura Bailey (original) Basalto, assim como em termos de módulo de fluência (relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida) aos 3.600 segundos (somente carregamento), em que a mistura Bailey (original) Basalto obteve o maior módulo de fluência, ou seja, menor susceptibilidade à deformação permanente, como mostra a Figura 3. Para o módulo de fluência aos 4.500 segundos (ensaio completo), as duas misturas Bailey originais (Basalto e Gabro) apresentaram valores bem acima dos das misturas convencionais com basalto e gabro, como também mostra a Figura 3.

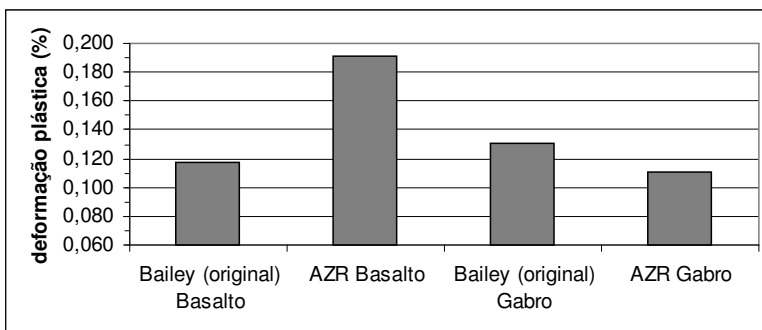


Figura 2: Resultados médios das tréplicas dos ensaios de compressão uniaxial estática das misturas Bailey (original) e AZR

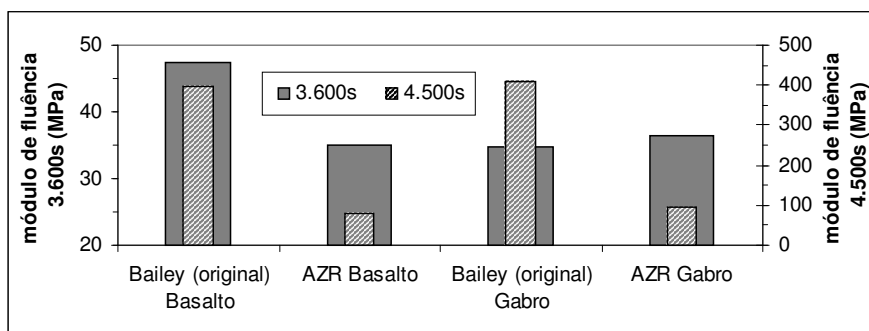


Figura 3: Módulo de fluência aos 3.600 s e 4.500 s para as misturas Bailey e AZR

Como mostrado nas Tabelas 3 e 4, as misturas Bailey originais sofreram modificações de alguns parâmetros que controlam o processo de seleção granulométrica: aumento da massa específica escolhida, aumento da Proporção AG e diminuição da Proporção FAF. Conforme o esperado, tais modificações resultaram em um aumento de 0,5 a 1,0% no VAM (Tabela 7).

Tabela 7: Resultados médios dos VAM (%) das misturas Bailey

Misturas	Agregado	
	Basalto	Gabro
Original	20,0	19,8
Aumento da MEE	20,3	20,5
Aumento da Prop. AG	21,2	20,1
Diminuição da Prop.FAF	20,8	20,5

As maiores diferenças, porém, manifestaram-se nos ensaios mecânicos. As alterações de granulometria também 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 compressão uniaxial estática, como mostra a Figura 4.

Porém, dentre as misturas Bailey Gabro modificadas, o melhor desempenho quanto ao ensaio de compressão uniaxial estática ficou com a mistura com aumento da Proporção AG, como também é apresentado na Figura 4, que é a única que cruza a zona de restrição, evidenciando a necessidade de estudos complementares sobre a zona de restrição, no caso dos agregados e ligantes brasileiros. Sabe-se que esta zona de restrição se aplica principalmente às misturas que utilizam areias naturais em sua composição, o que não é o caso das misturas deste estudo.

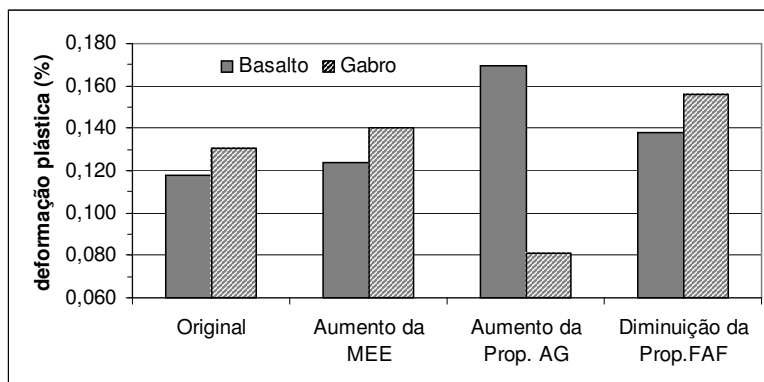


Figura 4: Resultados médios das tréplicas do ensaio de compressão uniaxial estática das misturas Bailey modificadas

A Tabela 8 apresenta os resultados de Módulo de Resiliência (MR) das misturas Bailey original e modificadas, tanto para os agregados de basalto como de gabro, observando-se um aumento do módulo de resiliência para as misturas modificadas.

Tabela 8: Resultados médios de Módulo de Resiliência (MR) das misturas Bailey original e modificadas – Agregados de Basalto e de Gabro

Misturas	Basalto	Gabro
	MR (MPa)	MR (MPa)
Original	2.816	3.528
Aumento da MEE	4.825	3.897
Aumento da Prop. AG	5.043	4.305
Diminuição da Prop.FAF	4.951	5.027

5. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa indicam um grande potencial de uso da metodologia Bailey de seleção de agregados para compor um esqueleto mineral bem proporcionado para misturas asfálticas densas, de forma a conduzir a desempenho adequado quanto às características de VAM, teor de ligante, deformação permanente nas trilhas de roda e trincas por fadiga.

É possível que se possa estabelecer uma relação direta e completa entre os parâmetros do Método Bailey (MEE e Proporção AG, GAF e FAF) com os ensaios mecânicos de resistência à tração, módulo de resiliência e compressão uniaxial estática.

É necessário, no entanto, ampliar o banco de dados da aplicação sistemática do Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para muitas misturas asfálticas, utilizando-se outros agregados com características mineralógicas e físicas diferentes das que foram consideradas neste trabalho, outros ligantes e grande variação das propriedades de controle do método, visando quantificar os efeitos sobre o comportamento mecânico decorrentes de ajustes nos parâmetros que governam o processo de seleção granulométrica.

Os resultados deste trabalho confirmam a necessidade de estudos detalhados, com agregados representativos dos que são utilizados em obras rodoviárias no Brasil, sobre o real significado e importância da zona de restrição estabelecida pela Especificação Superpave para as curvas granulométricas de agregados utilizados em misturas asfálticas.

Agradecimento

À Capes, pela bolsa de estudo concedida ao primeiro autor deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1997). T-19 – Unit Weight and Voids in Aggregate. American Association of State Highways Transportation Officials.
- 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.
- 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.
- Little, D. N.; Button, J. W.; Youssef, H. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potencial. Transportation Research Record 1417, p.49-57.
- 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.
- Vavrik, W. R.; W. J. Pine; G. A. Huber, S. H. Carpenter e R. Bailey. (2001). 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.
- 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.
- 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.

Endereço dos autores:

Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Trabalhador São-carlense, 400
13566-590 – São Carlos – SP – Brasil
Tel.: (16) 3373-9598; Fax: (16) 3373-9602;
e-mail: marcos@sc.usp.br; leomar@sc.usp.br; liliantg@sc.usp.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE
Centro de Tecnologia - Prédio Anexo
Cidade Universitária
CEP 21941-590 - Rio de Janeiro - RJ
e-mail: laura@geotec.coppe.ufrj.br