

VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE FAIXA DE AGREGADOS DOMINANTES PARA AVALIAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Jorge Luis Santos Ferreira
Juceline Batista dos Santos Bastos
Jorge Barbosa Soares
Departamento de Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

Tradicionalmente, a definição da curva granulométrica de uma mistura asfáltica segue procedimentos empíricos, onde reproduz-se proporções de agregados de projetos anteriores ou define-se uma nova curva por tentativa e erro. Neste artigo foram utilizadas três misturas asfálticas (uma delas de campo) buscando-se validar uma metodologia de avaliação e especificação da granulometria considerando o seu impacto na resistência à deformação permanente. Seu conceito chave é a existência de uma faixa de agregados graúdos dominantes que é responsável por resistir à deformação permanente. O critério de avaliação dessa metodologia é a porosidade dos agregados dominantes da mistura, a qual foi medida e correlacionada com o resultado de *Flow Number* (FN) para cada mistura. As porosidades das misturas mostraram boa correlação com seus respectivos FNs e refletiram adequadamente o desempenho da mistura asfáltica de campo. Quando comparada ao método Bailey, essa metodologia mostrou-se mais simples e apresentou uma maior abrangência em suas análises.

Palavras-chave: deformação permanente, curva granulométrica, FAD, *Flow Number*, método Bailey.

ABSTRACT

Traditionally, the selection of aggregate gradation in asphalt mixtures follows an empirical procedure in which aggregate proportioning of former projects is considered, or trial and error methods are used. In this paper three asphalt mixtures (one of which are field mixes) were investigated to validate a methodology of gradation selection considering its effect on permanent deformation. The main concept is the existence of a coarse aggregate band that is responsible within the mix for its resistance to rutting. The evaluation criterion is the porosity of the dominant aggregates in the mixture, which was correlated to the Flow Number (FN) result for each investigated mixture. The mixture porosities presented good correlation with their respective FNs and reflected their field behavior. When compared to the Bailey method, this methodology showed to be simpler and presented more comprehensive analysis.

Key words: permanent deformation, gradation curve, FAD, Flow Number, Bailey method.

1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente é um dos defeitos mais comuns na pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento, às subcamadas, ao subleito ou ainda à combinação de defeitos em diversas camadas (Bernucci *et al.*, 2010). Também conhecido como afundamento de trilha de roda (ATR) ou *rutting*, este defeito caracteriza-se como o acúmulo irrecuperável de deformação devido ao carregamento repetido ao longo do tempo. Deformações com profundidade superior a 12,5mm são consideradas falhas no pavimento (LaCroix, 2013). Embora todas as camadas desempenhem algum papel no desenvolvimento desse defeito, a maioria das falhas de deformação permanente tem origem na deformação excessiva do revestimento asfáltico (White *et al.*, 2002).

A literatura documenta claramente que o desempenho de uma mistura asfáltica no que diz respeito à resistência à deformação permanente é fortemente afetado por seu esqueleto mineral, ou seja, pela estrutura dos seus agregados (Stakston e Bahia, 2003; Nascimento, 2008; Greene *et al.*, 2014). Mesmo uma mistura produzida com os melhores materiais estará sujeita à

deformação permanente caso não se utilize uma granulometria adequada (Stakston e Bahia, 2003).

Misturas asfálticas com uma granulometria deficiente têm um grande potencial de desenvolver deformação permanente precocemente, reduzindo a vida útil do pavimento e gerando gastos antes do previsto com reabilitação. Além disso, considerações graves de segurança surgem como resultado do acúmulo de água nos afundamentos de trilha de roda.

A seleção da graduação dos agregados a ser utilizada nas misturas asfálticas é norteadas por especificações técnicas. Contudo a grande questão é como escolher a composição, dentre as diversas possibilidades, de modo a alcançar um melhor desempenho em campo. Atualmente utiliza-se do conhecimento empírico e da subjetividade do projetista. As especificações técnicas brasileiras (faixas granulométricas do DNIT) não propõem nenhuma metodologia de escolha, servindo apenas como instrumento de verificação final da curva granulométrica escolhida.

Diante de tais considerações e levando-se em conta a importância da estrutura granulométrica para o desempenho da mistura asfáltica, deve-se buscar métodos racionais de avaliação e especificação para as curvas granulométricas utilizadas em projetos rodoviários. Escolhas adequadas terão reflexo no desempenho da estrutura e nos gastos relacionados com manutenção e recuperação.

A literatura já aponta algumas alternativas para a seleção de curvas granulométricas, por exemplo, o método Bailey (Vavrik, 2000) e *Dominant Aggregate Size Range (DASR) model* (Kim, 2006).

O presente artigo visa validar a metodologia *DASR*, tratada neste artigo como metodologia de Faixa de Agregados Dominantes (FAD), para escolha de curvas granulométricas. Essa metodologia se propõe a identificar quais peneiras de agregados interagem e contribuem para a formação de um esqueleto pétreo resistente à deformação permanente. Sobressai-se com relação às demais metodologias por sua simplicidade conceitual e de execução, conferindo praticidade à especificação e análise de estruturas granulométricas de misturas asfálticas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estado da prática: Especificações técnicas

2.1.1. DNIT 031 (2006)

No Brasil, o projeto e a execução de uma mistura asfáltica densa (ou concreto asfáltico, CA) devem estar de acordo com a especificação de serviço DNIT 031 (2006). Essa especificação propõe três faixas granulométricas (A, B e C). Para cada faixa são definidas as peneiras a serem usadas no projeto, assim como os valores percentuais passantes em cada peneira e as tolerâncias envolvidas.

A escolha da faixa granulométrica a ser utilizada como referência para a composição da mistura asfáltica de projeto é função unicamente da espessura do revestimento, a qual é definida no dimensionamento estrutural do pavimento. Deve-se utilizar a faixa em que o diâmetro máximo do agregado seja inferior a 2/3 da espessura da camada do revestimento. O diâmetro máximo é a menor dimensão de peneira em que a porcentagem passante do agregado seja 100% (ASTM, 2005).

Embora essa metodologia defina os limites que devem ser observados em projeto, não é dado nenhum subsídio, além da experiência do projetista, o qual auxilie no proporcionamento entre

os diferentes tamanhos de agregados. Isto é, quaisquer combinações de agregados que estejam dentro das faixas podem vir a ser aceitas como curvas granulométricas de projeto. Muito embora saiba-se que há a necessidade dos agregados interagirem e formarem um esqueleto pétreo resistente para evitar falhas estruturais e funcionais. Essa capacidade de interação não ocorre em qualquer proporção de tamanhos de partículas (Kim, 2006).

2.1.2. AASHTO M 323 (2012)

Em 1987 foi implantado nos Estados Unidos o *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, um programa de pesquisa que objetivava melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das rodovias norte-americanas. Como resultado do *SHRP* obteve-se o *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave)*, que consiste de um sistema completo de projeto e análise de misturas asfálticas. Chowdhury *et al.* (2001) destacam que o principal foco de pesquisa desse programa foi o ligante asfáltico, de modo que um menor esforço de pesquisa e desenvolvimento foi dado aos agregados.

A norma AASHTO M 323 (2012) estabelece alguns itens de controle para a determinação de uma curva granulométrica, destacam-se o gráfico de potência $n = 0,45$ e os pontos de controle, ilustrados na Figura 1. Nesse gráfico os diâmetros das peneiras são elevados à potência $n = 0,45$. Já os pontos de controle indicam a região na qual a curva granulométrica deve passar. Os pontos de controle assemelham-se às faixas granulométricas utilizadas no Brasil e variam de acordo com o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados, o qual é a maior abertura de malha de peneira que retém alguma partícula de agregado, mas não mais de 10% em massa (ASTM, 2005). Esses pontos têm como funções: maximizar o tamanho dos agregados, equilibrar a proporção relativa entre agregados graúdos e miúdos e controlar o volume de finos (Alshamsi, 2006).

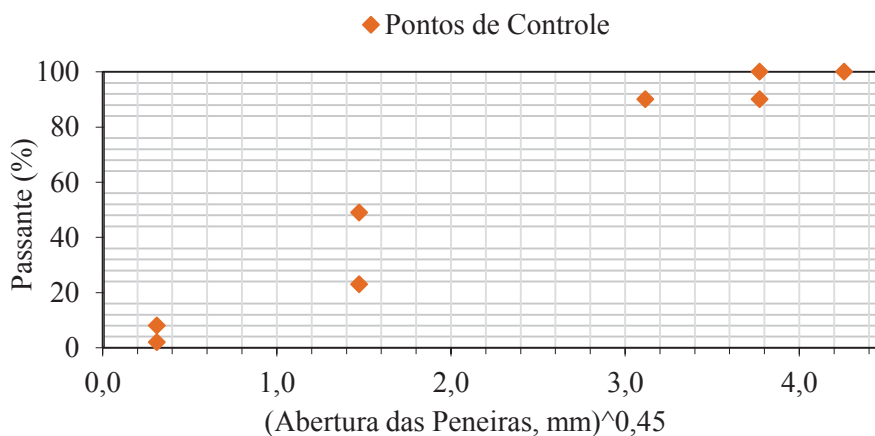


Figura 1: Gráfico de potência e pontos de controle para TMN de 19mm

2.2. Estado da arte

2.2.1. Método Bailey

O método Bailey baseia-se no intertravamento e empacotamento dos agregados e tem o propósito de determinar a melhor composição granulométrica para a mistura asfáltica de modo a atingir os requisitos volumétricos de dosagem e resultar em adequadas características de compactação (Vavrik, 2000). O propósito desse método é combater a deformação permanente em misturas asfálticas. Considera-se que a fração composta de agregados graúdos forma espaços vazios, os quais serão preenchidos pela fração miúda de agregados. A distinção entre agregados graúdos e miúdos é função do TMN da composição granulométrica e definida a partir

das chamadas peneiras de controle, denominadas Peneiras de Controle Primário, Secundário e Terciário (PCP, PCS e PCT, respectivamente), além da Peneira Média (PM), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Peneiras de controle do método Bailey

Tamanho Máximo Nominal (TMN) (mm)	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Peneira Média (PM) (mm)	19	12,5	9,5	6,25	4,75	2,36
Peneira de Controle Primário (PCP) (mm)	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Peneira de Controle Secundário (PCS) (mm)	2,36	1,18	1,18	0,6	0,6	0,3
Peneira de Controle Terciário (PCT) (mm)	0,6	0,3	0,3	0,15	0,15	0,075

No método Bailey, todo o material retido na PCP é considerado graúdo. Por outro lado, o material passante na PCP e retido na PCS é considerado fração graúda do agregado miúdo e consequentemente, o material passante na PCS é considerado fração miúda do agregado miúdo, esta última fração é avaliada pela PCT. Já a PM é utilizada para avaliação do agregado graúdo. Destaca-se que quando o percentual passante na PCP é inferior a 50% considera-se que o comportamento da mistura asfáltica é governado pelos agregados graúdos, caso contrário, os agregados miúdos é que controlam o seu comportamento.

A análise da estrutura granulométrica é realizada por meio de parâmetros de proporção, quais sejam, proporção de Agregados Graúdos (AG), proporção Graúda do Agregado Miúdo (GAM) e proporção Fina do Agregado Miúdo (FAM). Esses parâmetros são determinados a partir das peneiras de controle. A Tabela 2 resume os valores recomendados para os parâmetros de proporção. Espera-se que composições granulométricas que respeitem esses parâmetros sejam resistentes à deformação permanente, possuindo elevada estabilidade e boa durabilidade.

Tabela 2: Parâmetros de proporção do método Bailey

Parâmetro	Expressão de cálculo	Intervalo recomendado
AG	$(PM - PCP) / (100 - PM)$	0,50 - 0,65 (TMN de 12,5 mm) 60 - 0,75 (TMN de 19,0 mm)
GAM	PCS / PCP	0,35 - 0,50
FAM	PCT / PCS	0,35 - 0,50

É importante salientar que os valores apresentados nas Tabelas 1 e 2 referem-se às misturas asfálticas com comportamento governado pelos agregados graúdos. Para as misturas em que predominam os agregados miúdos, considera-se o percentual passante na PCP como sendo o total da mistura de agregados. Diante disso, são definidas novas peneiras de controle e novos parâmetros de proporção. Essas novas considerações, assim como uma abordagem mais completa do método Bailey, podem ser encontradas em Vavrik (2000) e Vavrik *et al.* (2002).

2.2.2. Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

A Faixa de Agregados Dominantes, proposta por Kim (2006) na Universidade da Flórida, caracteriza a curva granulométrica em função de um ou mais tamanhos de agregados que interagem entre si para a formação de um esqueleto pétreo resistente. Dessa forma, a FAD está diretamente relacionada à resistência à deformação permanente. A proposta dessa metodologia é avaliar a estrutura formada pelos agregados graúdos [maiores que 1,18mm (peneira N°16)]. Embora saiba-se que outras propriedades dos agregados também são importantes para o desempenho da mistura asfáltica, essa metodologia foca apenas na distribuição granulométrica.

Partículas de dimensões inferiores a FAD (e também o ligante asfáltico) preenchem os espaços entre suas partículas. Esse material compõe o denominado Volume Intersticial (VI), do qual fazem parte os Componentes Intersticiais (CI), quais sejam, os agregados de dimensões inferiores a FAD, o ligante e os vazios com ar. O VI está fortemente ligado ao trincamento por fadiga e à energia de ruptura da mistura asfáltica, além disso, mantém as partículas da FAD unidas, fornecendo adesão e resistência à tração (Kim, 2006; Greene *et al.*, 2014; Roque *et al.*, 2015).

Por outro lado, as partículas maiores que a FAD simplesmente flutuam na matriz de agregados e acabam por não desempenhar um papel importante no esqueleto pétreo da mistura asfáltica (Kim *et al.*, 2009; Greene *et al.*, 2014). A Figura 2 ilustra os componentes conceituais definidos pela metodologia FAD.

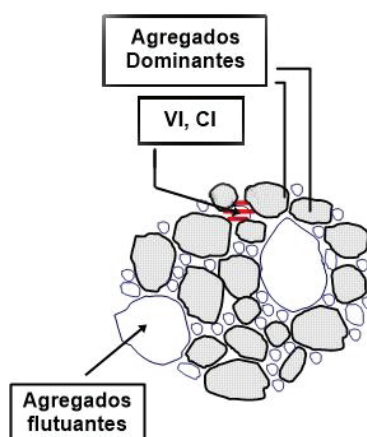


Figura 2: Componentes de uma mistura asfáltica segundo a metodologia FAD

A determinação da FAD de uma curva granulométrica é realizada por meio do diagrama de interação. Esse diagrama foi desenvolvido a partir de uma análise espacial teórica de distribuição das partículas que compunham uma determinada granulometria (Kim, 2006). Os resultados dessa análise indicaram que à medida que a proporção entre partículas maiores e menores (em duas peneiras contíguas) diminui, o espaçamento entre as partículas maiores aumenta. Além disso, dados dois tamanhos de agregados em peneiras consecutivas, o espaçamento entre ambas aumentará rapidamente na medida em que a proporção relativa entre elas chegar a 70/30. Isso quer dizer que a proporção relativa entre quaisquer duas peneiras consecutivas deve estar entre 70 e 30%, resultando em boa interação entre as partículas (Kim *et al.*, 2009).

Outro parâmetro importante dessa metodologia é a porosidade. A literatura estabelece que a porosidade de materiais granulares no estado solto é aproximadamente constante entre 45 e 50% e independe de sua distribuição granulométrica (Lambe e Whitman, 1969). Isso implica que a porosidade de materiais granulares não deve ser superior a 50%, garantindo contato entre os grãos. Numa mistura asfáltica, o volume de Vazios no Agregado Mineral (VAM) representa o volume disponível entre os agregados em uma mistura compactada, ou seja, o espaço ocupado por vazios e pelo ligante asfáltico. Tal conceito é análogo ao Volume de vazios (V_v), em um solo. A partir do V_v pode-se determinar a porosidade do solo.

Kim (2006) estendeu o conceito de porosidade de solo para mistura asfáltica, mais precisamente para a FAD. Dessa forma, a FAD seria equivalente aos grãos de um solo, enquanto o VI, seria equivalente aos vazios entre esses grãos. Admitiu-se, portanto, que a porosidade das partículas

granulares que compõe a FAD não deve ser superior a 50%. A partir da consideração que uma mistura asfáltica possui uma quantidade efetiva de ligante e de vazios para uma dada granulometria (i.e., VAM), pode-se determinar a porosidade para uma única peneira, ou para peneiras contíguas, desde que estas interajam.

Dessa forma, a identificação da FAD inicia-se pela determinação do diagrama de interação, o qual indica quais peneiras estão interagindo. Uma vez identificados os agregados da FAD, a porosidade é calculada pela Equação 1. Os componentes da mistura asfáltica utilizados no cálculo da porosidade FAD também estão ilustrados na Figura 3.

$$\eta_{FAD} = \frac{V_{v(FAD)}}{V_{T(FAD)}} = \frac{V_{IC,ag} + VAM}{V_{TM} - V_{ag>FAD}} \quad (1)$$

Onde, η_{FAD} : porosidade da FAD (%); $V_{v(FAD)}$: volume de vazios dentro da FAD (%); $V_{T(FAD)}$: volume total de agregado disponível para a FAD; $V_{IC,ag}$: volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD); VAM : volume de vazios no agregado mineral; V_{TM} : volume total da mistura; $V_{ag>FAD}$: volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

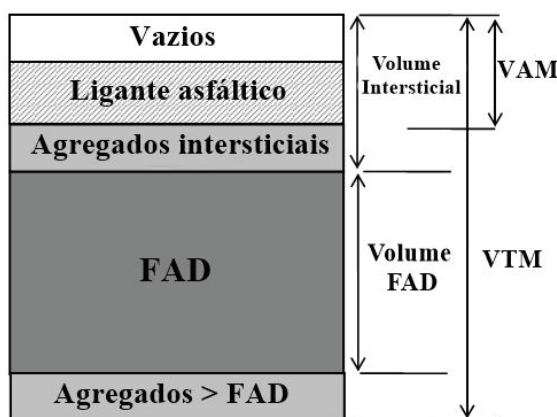


Figura 3: Componentes da mistura asfáltica para o cálculo da porosidade FAD

Greene *et al.* (2014) relatam que porosidades FAD entre 38 e 48% indicam misturas asfálticas com um bom intertravamento em sua granulometria e uma boa resistência à deformação permanente. Adicionalmente, porosidades FAD entre 48 e 52% representam misturas com contato intergranular questionável. Kim (2006) conclui que a metodologia FAD pode ajudar a eliminar misturas asfálticas que não terão um bom desempenho em campo, mesmo sem levar em consideração a qualidade dos demais componentes da mistura asfáltica, tais como os finos e o ligante asfáltico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A validação da metodologia de avaliação e especificação granulométrica proposta no presente trabalho consiste de uma validação laboratorial a partir da análise de um banco de dados do grupo de pesquisa ao qual os autores fazem parte. Foram coletados dados de granulometrias das misturas asfálticas e respectivas informações volumétricas e de caracterização [massas específicas aparentes dos agregados, V_v de projeto, teor de ligante e Densidade Máxima Teórica (DMT) ou Densidade Máxima Medida (Gmm)]. Adicionalmente para fins de comparação, as composições granulométricas dessas misturas asfálticas foram avaliadas segundo o método Bailey. O banco de dados em questão contempla misturas asfálticas de campo e de laboratório avaliadas por meio do ensaio uniaxial de carga repetida.

Embora ainda não exista no Brasil uma norma para a caracterização da deformação permanente em misturas asfálticas em laboratório, esse ensaio vem sendo comumente adotado em pesquisas nacionais que avaliam de alguma forma esse defeito (Nascimento, 2008; Onofre, 2012; Borges, 2014; Pazos, 2015).

3.1. Ensaio uniaxial de carga repetida

Realiza-se o ensaio uniaxial de carga repetida, ou *creep* dinâmico, aplicando-se um carregamento de 204kPa durante 0,1s e permitindo que a amostra repouse por 0,9s. O repouso ocorre com carregamento de 5% da tensão principal (10,2kPa). Esse ensaio é conduzido a uma temperatura constante de 60°C (Witczak *et al.*, 2002). Inicialmente ocorre uma deformação com velocidade elevada (zona primária), posteriormente a deformação mantém-se a uma taxa constante (zona secundária) e por fim, a velocidade de deformação cresce rapidamente, caracterizando a falha do material (zona terciária) (ver Figura 4).

Destaca-se para a análise da deformação permanente a definição do *Flow Number (FN)*, o qual indica o início da zona terciária. Quanto maior for este parâmetro, maior é a capacidade da mistura resistir à deformação permanente. Contudo, a inclinação da reta na zona secundária também deve ser levada em consideração na avaliação. De acordo com esta metodologia de ensaio, uma mistura asfáltica será resistente à deformação permanente se apresentar baixas inclinações na zona secundária (pequeno valor de deformação permanente ao fim do ensaio) e um elevado *FN* (longo tempo de ensaio). Além de alcance do *FN*, outros dois critérios podem determinar o fim do ensaio: (1) a mistura atinge 10000 ciclos; ou (2) a mistura atinge 5% de deformação para ensaios confinados e 2% de deformação para ensaios não confinados (Dongre *et al.*, 2009).

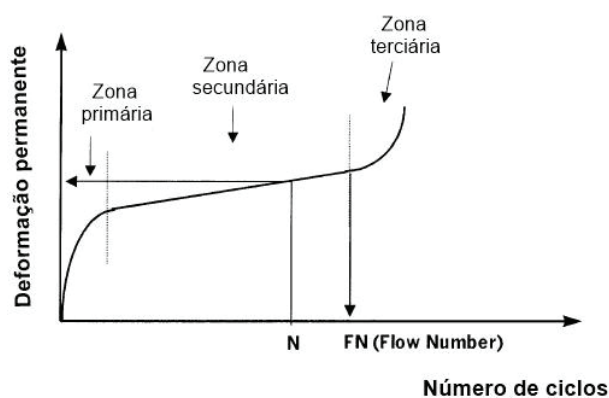


Figura 4: Curva típica de um ensaio uniaxial de carga repetida

3.2. Misturas asfálticas

Três misturas asfálticas foram utilizadas na presente investigação, denominadas M1, M2 e M3. A Tabela 3 resume algumas características das misturas, dos ligantes e dos agregados. Ressalta-se novamente que todas elas já haviam sido dosadas ou replicadas em laboratório para fins de outros trabalhos.

Tabela 3: Características gerais das misturas asfálticas avaliadas

Mistura	Dosagem	Teor de CAP (%)	TMN (mm)	Vv de projeto (%)	Tipo de CAP	Origem agregados	Gsb	DMT	Gmm
M1	Marshall	5,8	12,5	4,2	50/70	Gnáissica	2,541	2,423	-
M2	Superpave	4,3		4,3			2,541	-	2,459
M3		4,3		3,7			2,566	-	2,467

A mistura M1 foi aplicada em um trecho da BR-222. A mistura M2 é uma variação da M1, onde manteve-se a curva granulométrica e utilizou-se o método de dosagem *Superpave*, por consequência houve uma alteração do teor de ligante. A partir da mistura M2 produziu-se a mistura M3, onde o teor de ligante asfáltico foi fixado e a curva granulométrica foi alterada. A Figura 5 exibe as curvas granulométricas dessas misturas asfálticas.

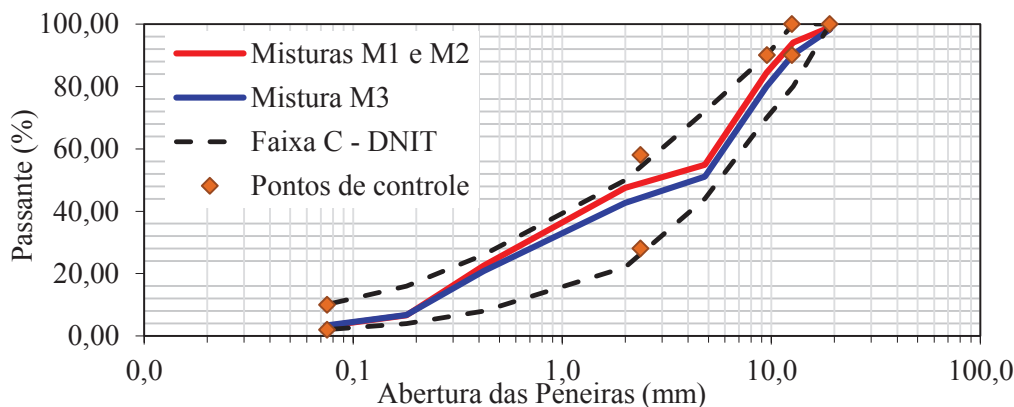


Figura 5: Curvas granulométricas das misturas asfálticas

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Aplicação da metodologia FAD

A determinação das proporções relativas do percentual retido entre peneiras consecutivas permitiu identificar quais peneiras compõem a FAD das misturas asfálticas analisadas. Desse modo, seus diagramas de interação foram construídos, como ilustrado na Figura 6.

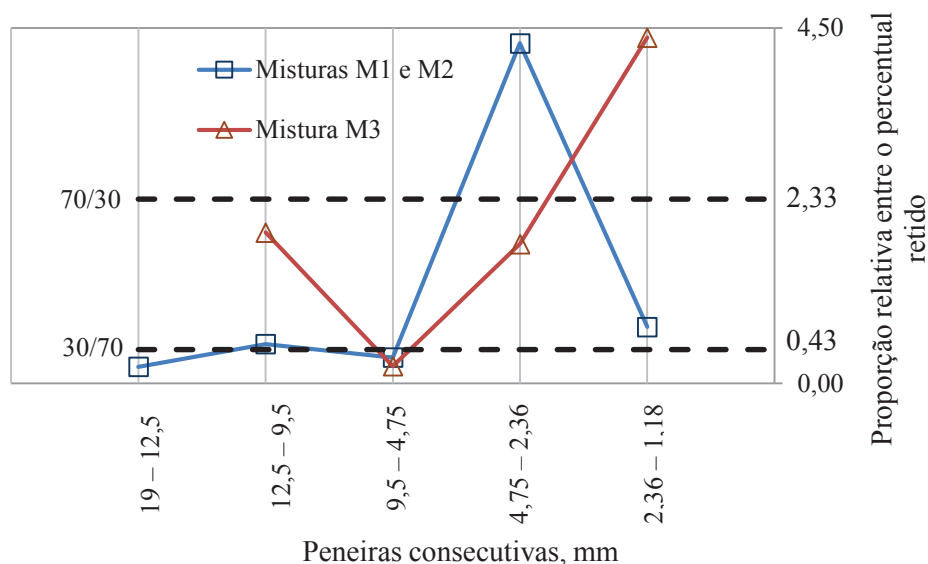


Figura 6: Diagrama de interação entre os agregados graúdos

Observando-se somente as misturas M1 e M2, nota-se que a proporção entre os agregados de 2,36 – 1,18mm localiza-se dentro dos limites de interação (30/70 a 70/30) e que há uma interação mínima (bem próxima ao limite inferior, 30/70) entre as peneiras de 12,5 – 9,5mm. Contudo, Kim (2006) recomenda levar em consideração apenas interações que se afastam dos extremos. Portanto, apenas as peneiras 2,36 – 1,18mm são consideradas para a composição da FAD. Caso a interação 12,5 – 9,5mm pudesse ser considerada para análise, a FAD dessas

misturas seria aquela interação que conferisse a menor porosidade. Na mistura M3 ocorrem duas interações, entre as peneiras de 12,5 – 9,5mm e entre as peneiras de 4,75 – 2,36mm, mas apenas as peneiras de 4,75 – 2,36mm compõem sua FAD, devido sua menor porosidade.

O cálculo da porosidade FAD para cada mistura foi realizado a partir da Equação 1 e dos valores da Tabela 3. A comparação com os valores de *FN* previamente levantados (Tabela 4) permitiu algumas constatações. Os resultados estão coerentes com o que estabelece a metodologia FAD. Porosidade inferior a 50% foi encontrada na mistura asfáltica mais resistentes à deformação permanente, nesse caso, representada por um bom parâmetro de avaliação (*FN*). Por outro lado, os piores resultados no ensaio dizem respeito a misturas com porosidades superiores a 50%. A mistura M1, em serviço há pouco mais de um ano, já apresenta afundamentos significativos (alguns pontos já ultrapassam 12,5mm) em trilha de roda. O valor elevado da porosidade FAD para M1 (77,2%) é um indício para tal comportamento.

Tabela 4: Resumo do cálculo das porosidades e comparação com *FN*

Mistura	FAD	Porosidade FAD (%)	FN
M1	2,36 - 1,18	77,2	46
M2	2,36 - 1,18	75,9	112
M3	4,75 - 2,36	41,1	273

Na Tabela 4 é possível identificar também que embora as misturas M1 e M2 sejam constituídas pela mesma curva granulométrica as suas porosidades FAD são diferentes. Conforme a Equação 1, a porosidade é função do volume total da mistura asfáltica, portanto, uma vez que há mudança no teor de ligante asfáltico também haverá mudança no volume da mistura, fato observado na porosidade FAD na mistura M2. Para o caso da mistura M3, a variação da granulometria em relação à mistura M2 conferiu uma boa redução da porosidade e um ganho de desempenho. A Figura 7 ilustra a correlação encontrada entre a porosidade FAD e o *FN* para essas três misturas. Destaca-se que a mistura M2 apresentou um *FN* 143% superior a M1 e que M3 apresentou um *FN* 144% superior a M2.

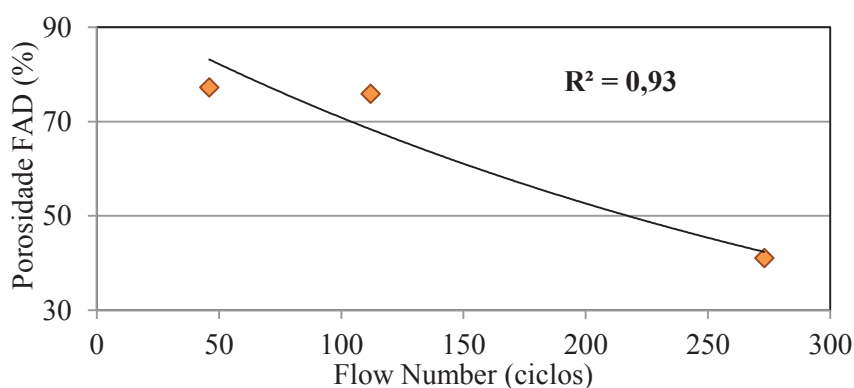


Figura 7: Correlação entre a porosidade FAD e *FN* (misturas M1, M2 e M3)

Do ponto de vista da metodologia FAD, o bom desempenho da mistura M3 à deformação permanente pode ser atribuído a sua porosidade dentro de um intervalo que proporciona um bom intertravamento granulométrico (entre 38 e 48%) (Greene *et al.*, 2014).

4.2. Análise das composições granulométricas segundo o método Bailey

De acordo com o percentual passante na PCP, a granulometria das misturas asfálticas M1 e M2, que é a mesma, foi classificada como miúda, por outro lado, a mistura M3 possui uma granulometria graúda. Os resultados dos parâmetros de proporção para as granulometrias das misturas M1/M2 e M3 são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5: Parâmetros de proporção granulométrica (misturas M1 e M2)

Parâmetro	Resultado obtido	Intervalo recomendável
AG	0,31	0,60 – 1,0
GAM	0,62	0,35 – 0,50

Tabela 6: Parâmetros de proporção granulométrica (mistura M3)

Parâmetro	Resultado obtido	Intervalo recomendável
AG	0,52	0,50 – 0,65
GAM	0,62	0,35 – 0,50
FAM	0,28	0,35 – 0,50

Na Tabela 5 nota-se que, para a granulometria das misturas asfálticas M1 e M2, nenhum dos parâmetros está nos intervalos recomendáveis. Uma observação relevante é que para misturas asfálticas de granulometria miúda e TMN de 12,5mm apenas os parâmetros AG e GAM são necessários para a sua avaliação. No caso da granulometria da mistura M3, apenas o parâmetro de proporção AG está no intervalo recomendável (Tabela 6).

Valores de AG inferiores ao limite (misturas M1 e M2, Tabela 5) resultam em misturas asfálticas com menor estabilidade, logo, maior propensão à segregação. Além disso, necessitam de uma estrutura de agregado miúdo resistente para alcançar as propriedades volumétricas requeridas na dosagem. O parâmetro GAM acima do limite (todas as misturas) indica um excesso de material fino, tornando a mistura asfáltica potencialmente inadequada do ponto de vista estrutural. O valor de FAM inferior ao limite recomendado (mistura M3, Tabela 6) representa uma mistura com reduzido VAM, o que pode prejudicar a durabilidade da mistura asfáltica, uma vez que haverá menos espaço disponível para a penetração do ligante e posterior envolvimento dos agregados. A análise das granulometrias das misturas M1/M2 e M3 através do método Bailey indica que a mistura M3 tem maior potencial de resistência à deformação permanente, tanto por ser classificada como mistura asfáltica graúda, assim como por ser a única a apresentar um AG dentro dos limites recomendados, este parâmetro é o mais importante para a seleção da mistura, pois estima o grau de compactação da fração de agregado graúdo (Nascimento, 2008). A indicação dada pelo método Bailey foi confirmada pelos resultados do ensaio uniaxial de carga repetida e está de acordo com o resultado previsto pela metodologia FAD (Tabela 4). Contudo, diferentemente da metodologia FAD, através do método Bailey foi impossível estimar os desempenhos potenciais das misturas asfálticas que possuíam a mesma granulometria (misturas M1 e M2), dessa forma, acabou por desconsiderar o impacto do teor de ligante no desempenho das misturas asfálticas. Os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida mostram que o teor de ligante é uma variável relevante na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas (Tabelas 3 e 4).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos fornecem indícios quanto à validação da metodologia FAD para avaliar e especificar granulometrias de misturas asfálticas para resistir à deformação permanente no

âmbito laboratorial, correlacionando-se satisfatoriamente com o *FN*. Essa metodologia também mostrou-se capaz de indicar qualitativamente o desempenho em campo da mistura asfáltica (M1) quanto à deformação permanente, mesmo sabendo que essa falha pode ser influenciada por problemas que envolvem falta de controle de carga, gradiente térmico do pavimento, composição da estrutura do sistema (camadas e subleito), problemas construtivos, dentre outros. Portanto, a metodologia FAD pode ser utilizada como ferramenta auxiliar na tomada de decisão do engenheiro rodoviário.

Através da metodologia FAD também foi possível notar a influência do teor de ligante asfáltico na resistência à deformação permanente. Observou-se para as misturas testadas que um maior teor de ligante confere menor resistência à deformação permanente. A considerável melhora do desempenho de laboratório entre as misturas M1 e M3 (variação de 493% no *FN*) dá indícios de que há a possibilidade de produzirem-se misturas asfálticas com maior qualidade e de menor custo, seja racionalizando o teor de ligante (material mais caro) e/ou alterando racionalmente a curva granulométrica, ambas as formas relacionam-se à porosidade FAD. Tal conclusão é importante para os órgãos de gestão rodoviária (DNIT, DER e concessionárias) e para as empresas construtoras.

REFERÊNCIAS

- AASHTO M 323 (2012) *Standard specification for Superpave volumetric mix design, mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Alshamsi, K. S. (2006) *Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures*. Dissertation (Doctor of Philosophy). Louisiana State University.
- ASTM C125 (2005) *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. American Society for Testing and Materials.
- Bernucci, L. L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2010) *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA.
- Borges, R. L. (2014) *Utilização de um modelo viscoplástico para análise de deformação permanente em misturas asfálticas*. Qualificação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará – Petran/UFC. Fortaleza, Brasil.
- Chowdhury, A.; J. C. Graw; J. W. Button e D. N. Little (2001) Effect of aggregate gradation on permanent deformation of Superpave HMA. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Daniel, J. S. e F. Rivera (2009) *Application of the Bailey method to New Hampshire asphalt mixtures*. New Hampshire Department of Transportation Report FHWA-NH-RD-13733F.
- DNIT 031 (2006) *Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Dongre, R.; J. D'Angelo e A. Copeland (2009) Refinement of flow number as determined by asphalt mixture performance tester. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2127, p. 127-136.
- Greene, J.; S. Chun e B. Choubane (2014) Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. V. 2256, p. 3-10.
- Greene, J.; S. Kim e B. Choubane (2011) Accelerated pavement testing and gradation-based performance evaluation method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. V. 2225, p. 119-127.
- Kim, S. (2006) *Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture*. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Florida, Gainesville.
- Kim, S.; R. Roque; B. Birgisson e A. Guarin (2009) Porosity of the dominant aggregate size range to evaluate coarse aggregate structure of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21(1), p. 32-39.
- Lacroix, A. T. (2013) *Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models*. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University.
- Lambe, T.W. e R.V. Whitman (1969) *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.

- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Tese de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Onofre, F. C. (2012) *Avaliação do efeito da modificação de ligantes asfálticos por ácido polifosfórico e polímeros na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará – Petran/UFC. Fortaleza, Brasil.
- Pazos, A. G. (2015) *Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Roque, R.; M. Bekoe; M. Isola; J. Zuo e G. Lope (2015) *Validation and refinement of mixture volumetric material properties identified in Superpave monitoring Project II: phase II*. Gainesville, Flórida.
- Stakston, A. D. e H. Bahia (2003) *The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot mix asphalt performance*. WisDOT Highway Research Study 0092-45-98.
- Vavrik, W. R. (2000) *Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock*. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Illinois.
- Vavrik, W. R.; G. Huber; G. Lope e W. Pine (2002) *Bailey method for gradation selection in HMA mixture design*. Transportation Research Board: Transportation Research Circular N° E-C044.
- White, T.; J. Stiadly e A. Hand (2002) *Quantifying contributions of aggregate characteristics using PURWheel laboratory tracking device*. In: *Aggregate contribution to hot-mix asphalt performance – ASTM STP 1412*, p.1-15.

Jorge Luis Santos Ferreira (jorgelsf@alu.ufc.br)
Juceline Batista dos Santos Bastos (jucelinebatista@hotmail.com)
Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia Transportes, Universidade de Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703, 60455-760, Fortaleza - CE