

INFLUÊNCIA DA FORMA E DOS PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS NO RESULTADO DE *FLOW NUMBER*

Amanda Lyz Nogueira Rodrigues¹

Fernanda Leite Soares¹

Jorge Barbosa Soares²

Juceline Batista dos Santos Bastos¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; ²Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Este artigo avalia a influência da forma e da granulometria dos agregados que compõem as misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. Assim, granulometrias de nove misturas asfálticas foram classificadas por dois métodos, sendo o Bailey e a Faixa de Agregados Dominantes (FAD). A forma, textura e angularidade dos agregados foram avaliadas via Processamento Digital de Imagens (PDI) por meio *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*, em que os agregados foram classificados segundo metodologias nacional e internacional. O *FN* mostrou maior correlação com a característica de forma 2D (agregado miúdo). Já a FAD mostrou-se promissora para avaliar a resistência à deformação permanente, fundamentando-se em um único parâmetro que foi a porosidade FAD. Quanto à comparação de classificação do *AIMS*, os resultados de esfericidade e angularidades dos agregados graúdos e miúdos foram iguais. Isso expõe a semelhança das características de forma dos agregados de diferentes regiões.

ABSTRACT

The effect of the shape and particle size (gradation) of the aggregates composing the asphalt mixtures on the resistance to permanent deformation is evaluated. Thus, gradations of nine asphalt mixtures were classified by two methods, being Bailey and the Dominant Aggregate Size Range (DASR). The shape, texture and angularity of the aggregates were evaluated through Digital Image Processing through Aggregate Image Measurement System (AIMS), in which the aggregates were classified through national and international methodologies. The FN showed higher correlation with the 2D shape characteristic. The DASR showed to be a promising one to evaluate the resistance to the permanent deformation, being based on a single parameter that was the porosity. As for the comparison of AIMS classifications, the results regarding the sphericity and angularities of the large and small aggregates were the same. This exposes the similarity of the shape characteristics of the aggregates of different regions.

1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente nos revestimentos asfálticos pode ser definida como depressões longitudinais nas trilhas de rodas, as quais vão aumentando com a repetição de cargas ocasionada pelo tráfego de veículo (Mahmoud e Bahia, 2004). Esse problema é um dos principais defeitos na pavimentação asfáltica do Brasil, que ocorre na sua idade inicial e afeta a segurança e o conforto dos usuários, além de aumentar os custos operacionais e dificultar a manutenção e reabilitação dos pavimentos.

Segundo Alrich (1996), a deformação permanente é controlada pela granulometria dos agregados, que mesmo obedecendo normas e/ou especificações pode resultar em uma granulometria inadequada. Isso pode ocasionar um esqueleto pétreo sem instabilidade e um intertravamento falho, com uma reduzida resistência à deformação permanente. Além disto, as propriedades de forma das partículas, sendo estas a forma propriamente dita, a textura superficial e a angularidade, afetam de modo direto o comportamento das partículas e entre estas e o ligante asfáltico, o que causa variações nas propriedades da mistura asfáltica, como: trabalhabilidade, resistência à tração e ao cisalhamento e rigidez (Al Rousan, 2004). Desse modo, faz-se necessário a utilização de métodos que ajudem na escolha de uma composição granulométrica adequada e para a avaliação das propriedades de forma dos agregados.

Dada a importância da escolha da granulometria, neste artigo os métodos Bailey e Faixa de Agregados Dominantes (FAD) serão avaliados. O método Bailey visa suprir a necessidade de um método sistemático de seleção granulométrica de misturas asfálticas, capaz de proporcionar um revestimento com resistências às deformações permanentes, às trincas por fadigas e ao desgaste (Vavrik *et al.*, 2002 e Cunha *et al.*, 2010). Já a FAD examina a granulometria de misturas asfálticas visando à composição de um esqueleto pétreo com estabilidade e resistência a esse defeito (Kim, 2006; Ferreira *et al.*, 2016). Além dos dois métodos citados para análise da granulometria, o *Aggregate Image Measurement System (AIMS)* analisa forma, angularidade e textura, e esses podem ajudar na explicação do comportamento das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. Quanto ao *AIMS*, há duas metodologias de classificação da forma, sendo uma desenvolvida por Al Rousan (2004) e outra customizada para o Brasil por Ibiapina *et al.* (2018). O ensaio uniaxial de carga repetida fornece dados da deformação permanente medida *versus* número de ciclos e o denominado *FN (Flow Number)* indica a ruptura do corpo de prova. Quanto maior o seu valor, mais resistência à deformação permanente possui a mistura (DNIT 184, 2018), sendo que o mesmo funciona para auxiliar na escolha de misturas.

Assim, este artigo visa correlacionar os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida com os parâmetros de forma e granulometria dos agregados das misturas asfálticas, além disso, comparam-se duas metodologias de classificação de forma dos agregados, a fim de que estes contribuam para seleção mais adequada de misturas asfálticas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Método Bailey

De acordo com Robert Bailey, uma granulometria adequada para resistir à deformação permanente deve conter o máximo de agregado graúdo para formar um esqueleto pétreo resistente e uma quantidade ideal de agregado fino para preencher os vazios dos agregados graúdos, sem excesso de filer, propiciando segurança a estrutura.

No caso do método Bailey, a distinção entre finos e graúdos é feita em função do Tamanho Máximo Nominal (TMN), que é a primeira peneira acima da que retém mais de 10% da mistura do agregado da composição granulométrica. A partir dessa peneira, definem-se as Peneiras de Controle Principal (PCP), Secundário (PCS) e Terciário (PCT), além da Peneira Média (PM) (Tabela 1) (Vavrik *et al.*, 2002).

Tabela 1: Peneiras de controle do método Bailey.

TMN (mm)	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75
PCP (mm)	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PCS (mm)	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
PCT (mm)	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075
PM (mm)	19,00	12,5	9,50	6,25	4,75	2,36

Fonte: Adaptado de Vavrik *et al.* (2002)

A PCP é determinada pela multiplicação do fator 0,22 pelo TMN, enquanto a PCS é determinada pelo resultado da multiplicação da PCP pelo fator 0,22, já a PCT é obtida a partir do valor da PCS multiplicando pelo mesmo fator e a PM é a peneira mais próxima da metade do TMN. Os outros princípios são: a análise das proporções de Agregados Graúdos (AG), Graúda dos Agregados Miúdos (GAM) e Fina dos Agregados Miúdos (FAM). Essas proporções são expressas nas Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$AG = \frac{PM-P}{100-} \quad (1)$$

$$GAM = \frac{PCS}{PCP} \quad (2)$$

$$FAM = \frac{PCT}{PCS} \quad (3)$$

Evidencia-se que quando o percentual que passa na PCP for inferior a 47% para misturas com TMN de 37,5, 19,0 e 9,5mm, ou 40% para misturas com TMN de 25,0mm, ou 39% para misturas com TMN de 12,5mm, considera-se que o comportamento da mistura asfáltica é governado pelos agregados graúdos. Senão, os agregados miúdos é que controlam o seu comportamento (AASHTO M323, 2013).

Quando a mistura for classificada como fina, necessita-se de uma nova avaliação, no qual a parte inferior a PCP original é transformada para 100% passante por essa peneira e, em seguida é avaliada como uma mistura de agregado graúdo e miúdo, em que o TMN é igual à PCP original. Assim, uma nova PCP é determinada, além das demais peneiras (PM, PCS e PCT) (Vavrik *et al.*, 2002).

2.2. Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

A FAD avalia a estrutura granulométrica de misturas asfálticas visando compor um esqueleto pétreo que confira estabilidade e resistência à deformação permanente. Essa resistência é proporcionada por um contato adequado entre partículas graúdas (Kim, 2006). Segundo esse autor apenas as partículas iguais ou maiores que 1,18mm (peneira nº16) contribuem efetivamente para tal resistência.

Assim, a mistura asfáltica é formada pela FAD e pelo Volume Intersticial (VI). Enquanto a FAD é responsável pela resistência à deformação permanente, o VI está associado ao trincamento por fadiga e à energia de ruptura da mistura, além de manterem as partículas da FAD unidas, fornecendo adesão e resistência à tração (Kim, 2006 e Greene *et al.*, 2014). A determinação das partículas que compõem a FAD é designada a partir da avaliação da proporção relativa aos agregados retidos a cada duas peneiras consecutivas, desde a primeira peneira maior a reter alguma partícula até a peneira de nº16. Os componentes que compõem o VI são chamados de Componentes Intersticial (CI), sendo eles os agregados inferiores à FAD, o ligante asfáltico e os vazios da mistura asfáltica. Salienta-se que nem todos os agregados graúdos irão compor a FAD (Kim, 2006). Partículas com dimensões superiores à FAD flutuam na matriz de agregados de modo que não têm contato entre as mesmas e não há relevância para resistir à deformação permanente (Ferreira *et al.*, 2016).

Kim (2006) verificou que o espaçamento médio dos agregados retidos em duas peneiras consecutivas aumenta rapidamente quando a proporção relativa entre elas é inferior a 0,43 ou superior a 2,33. Isso propõe que nesse intervalo os agregados com um espaçamento constante garantem um contato efetivo para formar o esqueleto pétreo, este responsável por resistir à deformação permanente. Tais agregados são denominados como agregados dominantes e constituem a FAD (Kim, 2006). A representação gráfica das proporções relativas de todas as peneiras contíguas é denominada diagrama de interação, que permite uma observação geral de todas as peneiras que estão interagindo para a FAD.

Apesar da FAD constitui a estrutura primária para resistir à deformação permanente, outro parâmetro fundamental nessa avaliação é a porosidade FAD. Porosidade FAD inferior a 48% indica composições granulométricas com grande potencial à resistência à deformação permanente, porosidade entre 48 e 52%, chama-se de porosidade marginal, ou seja, não é possível estimar essa resistência, já a porosidade maior que 52% indica fragilidade quanto a essa falha (Kim, 2006).

A porosidade FAD é uma medida adimensional, definida pela proporção relativa entre o Volume de vazios (V_v) e o Volume total (V_t) de um determinado material. O volume de vazios é composto pelos agregados intersticiais e pelo volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e o volume total é o volume total mistura asfáltica subtraindo do volume dos agregados flutuantes. A VAM representa o volume de vazios desocupados entre os agregados em uma mistura compactada, ou seja, o espaço ocupado por vazios ou ligante asfáltico. Assim, tem-se a Equação 4 para o cálculo da porosidade FAD.

$$\eta FAD = \frac{V_v(FA)}{V_t(FAD)} = \frac{V_{IC,ag} + VAM}{V_{TM} - V_{ag>F}} \quad (4)$$

Onde: ηFAD é a porosidade FAD (%); $V_{IC,ag}$ é o Volume intersticial do agregado, menor que a FAD; V_{TM} é o Volume total da mistura; $V_{ag>FA}$ é o Volume de agregados flutuantes, maior que a FAD.

Para Kim (2006), a metodologia FAD ajuda a eliminar misturas asfálticas que não terão um bom desempenho em campo, mesmo sem levar em consideração a qualidade das demais componentes da mistura asfáltica, como: os finos e o ligante asfáltico. No Brasil, Ferreira *et al.* (2016) avaliaram a granulometria das misturas asfálticas utilizando a metodologia FAD. Das misturas analisadas, três obtiveram porosidades marginais e os resultados de deformação permanente se mostraram bastante variáveis. As misturas que apresentaram porosidades não marginais possuíram as maiores porosidades FAD e os menores FNs .

2.3. *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*

Al Rousan (2004) desenvolveu uma metodologia de classificação dos agregados com relação às propriedades de forma obtidas pelo *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*, no qual foram realizados diversos ensaios com materiais que possuíam diferentes mineralogias, tamanhos, características de forma, de textura e de angularidade, provenientes de diferentes estados norte-americanos.

O sistema *AIMS* fornece informações quanto à forma (lamelaridade e esfericidade), angularidade e textura superficial de agregados graúdos (retidos na peneira de 4,75mm) e quanto à forma e angularidade dos agregados miúdos (retidos na peneira de 0,075mm). A análise da textura dos agregados miúdos é feita de forma indireta por meio dos resultados de angularidade (Bessa, 2012). Essas características são definidas considerando diferentes escalas em relação ao tamanho da partícula (Figura 1), assim a forma se refere às proporções das dimensões das partículas, a angularidade representa os cantos dos agregados que se sobrepõem à forma e a textura compreende as irregularidades da superfície. Normalmente, os agregados de forma cúbica, angulares com textura rugosa e com capacidade de manter essas propriedades ao longo da vida útil das estruturas são preferidos nas aplicações de revestimentos (Lugo *et al.*, 2008).

Para Chen *et al.* (2005), partículas cúbicas de agregados graúdos proporcionam as misturas asfálticas uma maior resistência ao Afundamento de Trilha de Roda (ATR) se comparadas as partículas alongadas, além destas serem mais suscetíveis a quebra. Dessa forma, observa-se que os agregados adequados são aqueles que possuem forma mais ou menos cúbica, alta angularidade, favorecendo o travamento das partículas, e superfície com textura rugosa para ajudar na aderência com o ligante asfáltico.

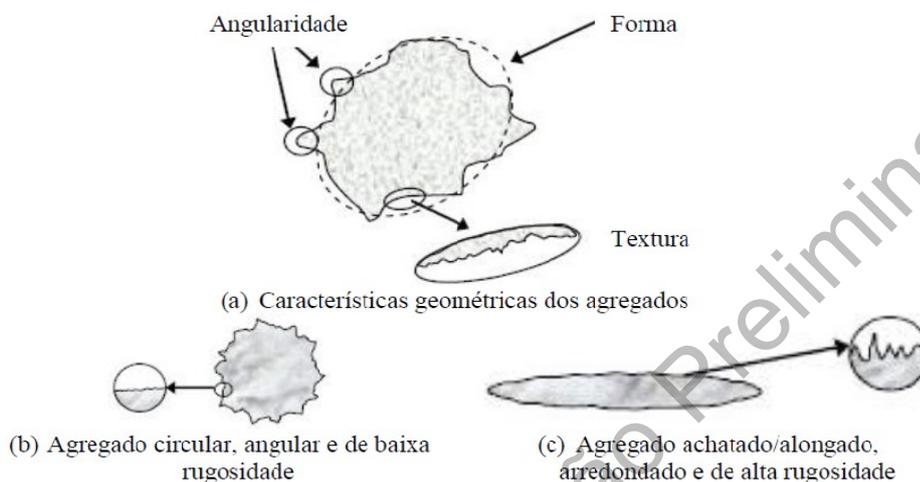


Figura 1: Caracterização dos agregados geometricamente (Adaptado de Lugo *et al.*, 2008 por Bastos, 2016)

Singh *et al.* (2012) observaram a importância da textura superficial para a estabilidade da mistura asfáltica, em que a partir de uma análise do módulo dinâmico de misturas asfálticas compostas por agregados de diferentes propriedades de forma, a superfície rugosa auxilia no desenvolvimento de uma força de atrito entre as partículas que proporciona à mistura asfáltica uma estrutura mais estável em relação àquelas composta por agregados com superfícies mais polidas.

Pazos (2015) analisou três diferentes agregados, sendo uma brita cúbica, uma brita lamelar e um seixo rolado, a fim de observar o efeito das suas propriedades morfológicas no comportamento mecânico de sete misturas asfálticas. O autor indicou que a textura superficial deveria ser considerada uma especificação dos agregados, pois essa propriedade mostrou-se uma forte influência na deformação permanente de misturas asfálticas.

Ibiapina *et al.* (2018) propuseram uma customização das propriedades de forma fundamentada na proposta por Al Rousan (2004), para o AIMS a partir de um banco de dados composto por vinte agregados brasileiros (com características diferentes dos agregados norte-americanos de Al Rousan, 2004). Nessa pesquisa, a quantidade de classe por parâmetro de Al Rousan (2004) foi mantida, isto é, quatro classes para forma 2D, angularidade e esfericidade e cinco classes para textura superficial.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de um banco de dados que contempla informações de nove misturas asfálticas, sendo quatro misturas (M1 a M4) investigadas recentemente no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), além das misturas M5 a M9 de Bastos (2016). Os agregados que compõem essas misturas foram submetidos aos ensaios de granulometria por peneiramento (DNER-ME 083, 1998), absorção e densidade do agregado graúdo (DNER-ME 081, 1998), densidade do filer (DNER-

ME 085, 1994), com objetivo de obter as propriedades físicas e mecânicas dos agregados. Também foi realizado o ensaio de granulometria através da série de peneiras norte-americanas (ASTM C136/C136M, 2014), e a partir dele avaliado os métodos Bailey e FAD. Além disso, os agregados foram caracterizados utilizando o *AIMS*. Esta análise foi realizada para os agregados retidos em cada peneira (série norte-americanas) isoladamente, sendo possível conhecer as propriedades de forma de cada fração do agregado (forma 2D, textura e angularidade). Essa caracterização pode explicar o comportamento das misturas asfálticas com relação à resistência à deformação permanente.

Dados os parâmetros Bailey e a porosidade FAD das nove misturas asfálticas (Figura 2), verificou-se como cada um dos métodos classifica o esqueleto pétreo dessas misturas em relação à deformação permanente, considerando o *FN*. Todos os agregados das misturas obedecem à especificação do DNIT (2006), sendo que as misturas M1 a M7 apresentam a granulometria dentro da faixa C, enquanto que as misturas M8 e M9 enquadram-se na faixa B. Todas as misturas asfálticas foram submetidas ao ensaio uniaxial de carga repetida (DNIT 184, 2018) e foram obtidos seus respectivos *Flow Numbers (FNs)*.

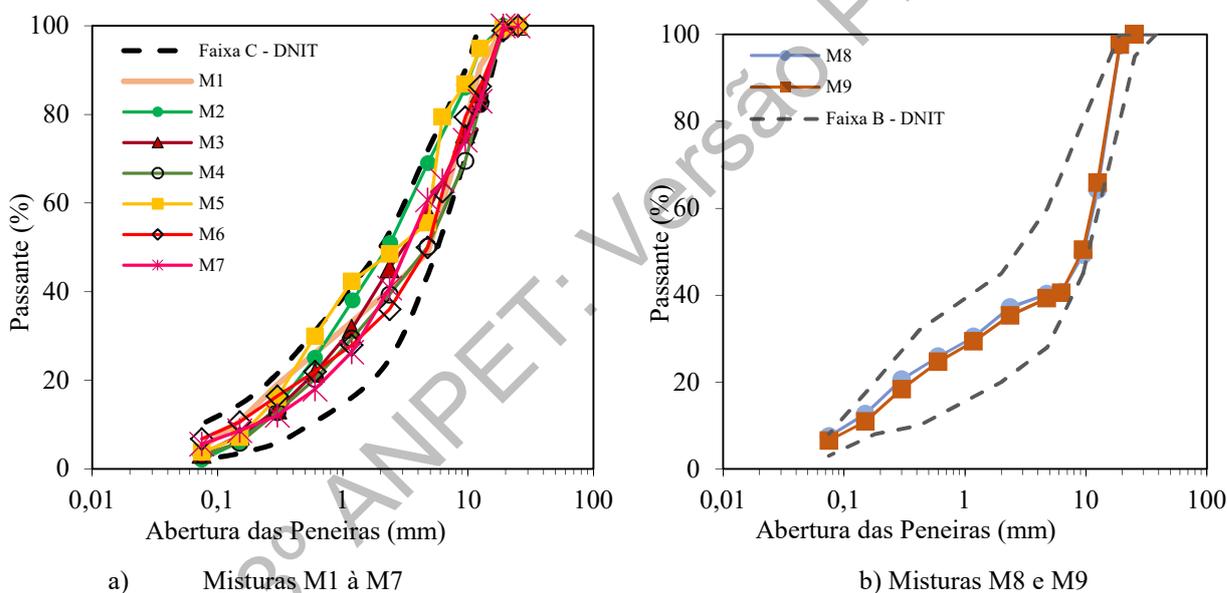


Figura 2: Curvas granulométricas das misturas asfálticas

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Avaliação da granulometria pelo método Bailey

De acordo com o método Bailey indicado na AASHTO (M323, 2013) foi possível classificar as misturas a partir de suas granulometrias, em que M1, M8 e M9 foram definidas como graúdas com 33,2, 40,2 e 39,3%, respectivamente, passando na PCP. As demais misturas (M2 a M7) foram classificadas como finas com 51,0, 57,8, 50,1, 60,7, 48,3, 49,9 e 60,7% dos agregados passando na PCP, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos para todas as misturas asfálticas, bem como os intervalos recomendados por Vavrik *et al.* (2002). Nota-se que apenas uma mistura (M7) atendeu integralmente aos parâmetros do método Bailey; M1, M5, M8 e M9 não atenderam a nenhum parâmetro; M2 e M3 atenderam a um parâmetro; já M4 e M6 a dois parâmetros. Essa dificuldade de enquadrar integralmente as granulometrias a todos os

parâmetros Bailey é indicada em outras pesquisas nacionais (Cunha *et al.*, 2010; Mendes *et al.*, 2012; Bastos, 2016).

Quando a proporção AG resulta em um valor inferior aos limites, evidência a suscetibilidade à segregação; e quando se obtém o resultado acima dos limites recomendados, indica possível dificuldade de compactação em campo (Bastos, 2016). Dessa forma, as proporções AG nas granulometrias M1, M8 e M9 indicam vulnerabilidade à segregação e pode ocorrer dificuldade de compactação em campo nas misturas M3 e M5.

Tabela 2: Parâmetros do Método Bailey

MISTURAS	PARÂMETROS				Definição de misturas	Intervalos recomendados		
	TMN (mm)	AG	GAF	FAF		AG	GAF	FAF
M1	12,5	0,30	0,57	0,25	Graúda	0,50 - 0,65	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
M2	12,5	1,00	0,24	0,33	Fina			
M3	19,0	1,09	0,42	0,25	Fina			
M4	19,0	0,92	0,44	0,24	Fina			
M5	12,5	1,99	0,24	-	Fina	0,60 - 1,00	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
M6	19,0	0,60	0,59	0,41	Fina			
M7	19,0	0,73	0,46	0,46	Fina			
M8	19,0	0,18	0,76	0,68	Graúda	0,50 - 0,65	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
M9	19,0	0,23	0,73	0,63	Graúda	0,50 - 0,65	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50

A análise da granulometria pelo método Bailey indicou que a mistura asfáltica M7 apresenta maior potencial de resistência à deformação permanente, tendo em vista ao atendimento de todos os parâmetros (AG, GAF e FAF), seguido das misturas M4 e M6 que apresentaram dois parâmetros dentro dos limites, sugerindo desempenho intermediário.

4.2. Avaliação da granulometria pela FAD

Seguindo a determinação da proporção entre a porcentagem de agregados retidos nas peneiras consecutivas, foram construídos os diagramas de interação (Figura 3), com o objetivo de identificar quais peneiras compõem a FAD das misturas analisadas.

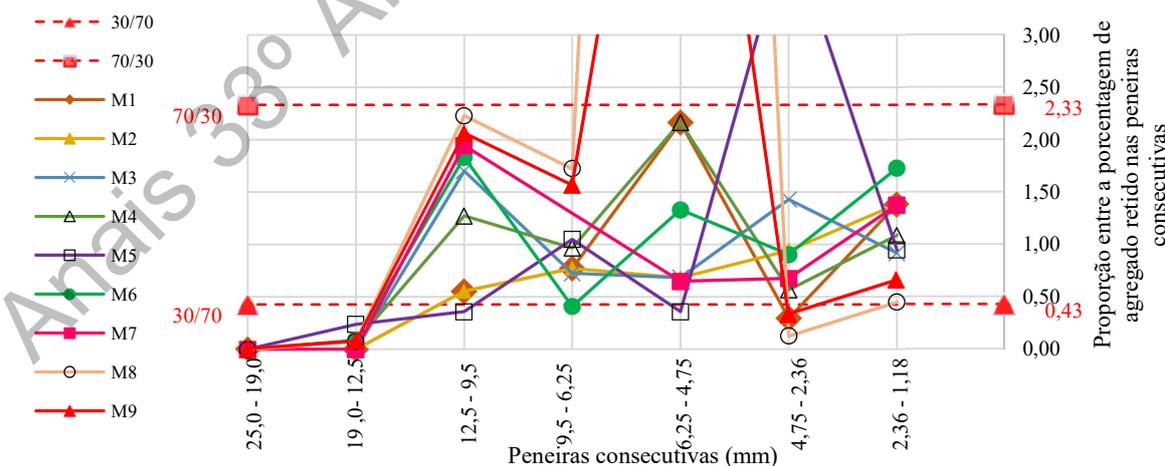


Figura 3: Diagramas de interação

Observa-se que M1, M2, M3 e M4 possuem interação entre cinco peneiras consecutivas, sendo de 12,5 a 1,18mm; M7 aponta interação entre as peneiras de 12,5 a 1,18mm. Além desses M5 exibe interação entre as peneiras de 9,5 e 6,25mm e entre as peneiras 2,36 e

1,18mm; M6 tem interação entre as peneiras de 12,5 e 9,5mm e entre as peneiras 6,25 a 1,18mm; M8 e M9 indicam interação entre as peneiras de 12,5 e 6,25mm e entre as peneiras de 2,36 e 1,18mm. Nesses casos, apenas as interações que apresentam menor porosidade são consideradas. Nota-se pelo diagrama que as misturas M8 e M9 apresentam uma descontinuidade nas peneiras de 6,25 a 4,75, pois seus valores deram bastante elevados, de 21,6 e 7,6, respectivamente, com os limites estabelecidos pela FAD.

A porosidade FAD de cada mistura foi calculada (Tabela 3) pela Equação 4, usando dados: (i) granulométricos; (ii) massas específicas aparente das misturas asfálticas (Gmb) e da (iii) composição de agregado (Gsb); (iv) teor de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Tabela 3: Parâmetros de determinação da FAD e porosidade FAD

Misturas	Teor de CAP (%)	Gmb	Gsb	FAD	Porosidade FAD (%)
M1	4,0	2,399	2,608	12,50 - 1,18	43,96
M2	6,0	2,284	2,625	12,50 - 1,18	47,53
M3	4,7	2,253	2,476	12,50 - 1,18	39,53
M4	4,2	2,359	2,617	12,50 - 1,18	38,41
M5	5,8	2,321	2,593	2,36 - 1,18	83,60
M6	4,7	2,379	2,638	6,25 - 1,18	46,40
M7	4,7	2,311	2,722	12,50 - 1,18	40,50
M8	4,7	2,434	2,656	12,50 - 6,25	49,00
M9	4,5	2,425	2,615	12,50 - 6,25	48,10

As misturas M1, M2, M3, M4, M6 e M7 apresentaram porosidades inferiores a 48%, indicando contato entre os grãos e potencial de resistência à deformação permanente. Já as misturas M8 e M9 apresentaram porosidades entre 48% e 52%, sendo classificadas como marginais (Kim, 2006), apresentando estrutura granulométrica com um contato questionável entre os agregados. Para M5, com porosidade maior que 52%, aponta-se vulnerabilidade quanto à resistência à deformação permanente.

4.3. Avaliação da forma, textura e angularidade por meio do AIMS

A Tabela 4 apresenta os dados de esfericidade, textura, forma e angularidade do agregado graúdo e de forma e angularidade para o agregado miúdo. Esses parâmetros são classificados utilizando duas metodologias (Al Rousan, 2004 e Ibiapina *et al.*, 2018).

Com relação à média da esfericidade, observa-se que oito misturas asfálticas (M2 a M9) são classificadas, de acordo com as duas metodologias, como de baixa esfericidade. Vale ressaltar que esses agregados possuem formato mais cúbico, possibilitando uma estrutura mais rígida, devido ao maior intertravamento das partículas.

De acordo com Al Rousan (2004), apenas M3 apresentou agregados com uma média rugosidade. As piores classificações ficaram para as misturas M1, M2, M5 e M6, com agregados designados como lisos. Por segundo encontram-se M4, M8 e M9, com agregados com baixa rugosidade. Já por Ibiapina *et al.* (2018), as misturas M1, M2, M3, M4, e M6 ficaram com a pior categoria, denominadas como lisas, em seguida encontra-se as misturas M5, M8 e M9 categorizadas como macias, e por último M7 com baixa rugosidade. Essas metodologias classificam os agregados diferentemente, sendo em Ibiapina *et al.* (2018) que os agregados foram indicados com pior rugosidade. Agregados com textura superficial mais rugosa formam estruturas mais resistentes e estáveis à deformação permanente (Bastos, 2016).

Tabela 4: Parâmetros estatísticos dos agregados estudados

Esfericidade					
Misturas	Média	DP	CV	Classificação	
				Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
M1	0,70	0,10	14,83	Esfericidade moderada	
M2	0,67	0,10	14,36		
M3	0,69	0,10	11,59		
M4	0,66	0,10	11,68		
M5	0,60	0,10	14,17		
M6	0,66	0,09	13,69	Baixa esfericidade	
M7	0,69	0,08	11,66		
M8	0,65	0,09	13,79		
M9	0,65	0,09	13,83		

Textura					
Misturas	Média	DP	CV	Classificação	
				Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
M1	270,30	152,23	56,32	Liso	Liso
M2	267,07	74,23	42,28	Liso	Liso
M3	365,23	104,80	37,11	Rugosidade Moderada	Liso
M4	288,27	156,70	56,36	Baixa Rugosidade	Liso
M5	267,70	151,10	56,50	Liso	Macio
M6	227,80	136,00	59,70	Liso	Liso
M7	501,80	118,60	23,60	Alta rugosidade	Baixa rugosidade
M8	345,60	178,30	51,60	Baixa Rugosidade	Macio
M9	344,60	168,20	48,80	Baixa Rugosidade	Macio

Forma 2D					
Misturas	Média	DP	CV	Classificação	
				Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
M1	8,12	2,07	25,46	Semialongado	
M2	8,42	2,05	22,73	Semialongado	
M3	7,98	1,9	24,22	Semicircular	
M4	8,28	2,10	25,75	Semialongado	
M5	8,00	2,00	25,40	Semialongado	Semicircular
M6	8,20	1,90	23,50	Semialongado	
M7	7,80	2,00	25,30	Semicircular	
M8	8,40	2,10	25,00	Semialongado	
M9	8,20	2,00	24,40	Semialongado	

Angularidade Graúdo					
Misturas	Média	DP	CV	Classificação	
				Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
M1	2877,83	636,47	22,10		
M2	2764,00	558,37	19,36		
M3	3176,40	639,20	20,10		
M4	2944,90	642,80	21,80		
M5	2791,50	700,00	25,10	Subarredondado	
M6	2967,20	703,70	23,70		
M7	2829,80	570,90	20,20		
M8	2936,60	845,20	28,80		
M9	3026,70	866,10	28,60		

Angularidade Miúdo					
Misturas	Média	DP	CV	Classificação	
				Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
M1	3517,50	1062,92	30,22		
M2	3789,07	1141,92	47,56		
M3	3112,97	845,90	27,17		
M4	3702,77	1199,70	32,40		
M5	3436,50	1003,10	29,20	Subarredondado	
M6	3705,70	996,60	26,90		
M7	3075,80	926,10	30,10		
M8	3673,30	1132,80	30,80		
M9	3654,90	1135,60	31,10		

Quanto à forma 2D, destaca-se a classificação das misturas M3 e M7 denominadas como semicircular por Al Rousan (2004), ou seja, suas partículas são mais arredondadas em comparação aos demais agregados analisados. Os agregados das outras misturas foram classificados como semialongados. Analisando as categorizações definidas por Ibiapina *et al.* (2018), percebeu-se que todas as misturas foram rotuladas como semicircular.

Sobre a angularidade dos agregados graúdo e miúdo foram separados, as duas metodologias (Al Rousan, 2004 e Ibiapina *et al.*, 2018) indicaram o mesmo resultado, sendo os agregados classificados como subarredondados.

A Tabela 5 mostra os resultados da verificação das partículas achatadas e alongadas (F&E). As amostras M5, M8 e M9 possuem mais partículas achatadas e alongadas na proporção 5:1. Verificando as outras proporções (2:1 e 3:1), M3 possui característica não lamelar menor que as demais misturas, sendo mais indicada para resistir à deformação permanente.

Tabela 5: Partículas achatadas e alongadas dos agregados das misturas.

Misturas	Parâmetros		
	F&E 2:1 (%)	F&E 3:1 (%)	F&E 5:1 (%)
M1	22,8	2,8	0,0
M2	24,1	23,0	1,1
M3	20,7	0,3	0,0
M4	30,3	2,6	0,0
M5	68,7	28,6	3,0
M6	72,7	25,3	0,3
M7	61,7	15,3	0,0
M8	64,4	38,8	2,2
M9	64,4	38,8	2,2

4.4. Parâmetros granulométricos e características de forma com o FN

A Tabela 6 apresenta todos os valores dos elementos obtidos de ensaios em laboratório. Tais resultados foram utilizados para obter as correlações (Tabela 7) entre a variável dependente (FN) das nove misturas analisadas e as variáveis independentes (teor de CAP, porosidade FAD, proporções AG, GAM e FAM, esfericidade, textura, forma 2D, angularidade do agregado graúdo e angularidade do agregado miúdo).

Tabela 6: Resultados de FN, parâmetros FAD, Bailey e AIMS

Misturas	FN	Teor	Porosidade FAD (%)	AG	GAM	FAM	Esfericidade	Textura	Forma 2D	Ang. Graúdo	Ang. Miúdo
		CAP (%)									
M1	165	4,00	43,96	0,30	0,57	0,25	0,70	270,30	8,12	2877,83	3517,50
M2	41	6,00	47,53	1,00	0,24	0,33	0,67	267,07	8,42	2764,00	3789,07
M3	164	4,70	39,53	1,09	0,42	0,25	0,69	365,23	7,98	3176,40	3112,97
M4	105	4,20	38,41	0,92	0,44	0,24	0,66	288,27	8,28	2944,90	3702,77
M5	30	5,80	83,60	1,99	0,24	-	0,60	267,70	8,00	2791,50	3436,50
M6	1214	4,70	46,40	0,60	0,59	0,41	0,66	227,80	8,20	2967,20	3705,70
M7	1487	4,70	40,50	0,73	0,46	0,46	0,69	501,80	7,80	2829,80	3075,80
M8	92	4,70	49,00	0,18	0,76	0,68	0,65	345,60	8,40	2936,60	3673,30
M9	337	4,50	48,10	0,23	0,73	0,63	0,65	344,60	8,20	3026,70	3654,90

Dos resultados das correlações apresentados na Tabela 7, percebe-se que a variável FN mostrou maior correlação com a característica de forma 2D ($r = 0,51$). Entre os parâmetros Bailey melhor correlação foi obtida com a proporção AG ($r = 0,21$), mas ainda baixa. Quanto à porosidade FAD *versus* FN, a influência do intertravamento na resistência à deformação permanente também foi baixa ($r = 0,28$).

Ao avaliar isoladamente os resultados de porosidade FAD e *FN* verificou-se que as misturas M6 e M7, que apresentaram porosidade FAD com grande resistência à deformação permanente (46,4 e 40,5%, respectivamente), obtiveram os maiores valores de *FN* (1214 e 1487, respectivamente). A mistura M5, que indicou porosidade FAD com baixa resistência à deformação permanente (83,6%), resultou em um baixo *FN* de 30. Estes resultados (Tabela 6) demonstram que há concordância entre a porosidade FAD e o *FN*, indicando a capacidade da metodologia FAD, como uma característica de avaliação quanto à resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Espera-se que a mistura M7 apresente um bom desempenho em campo com relação à deformação permanente, pois obteve o maior valor de *FN* e um baixo resultado de porosidade FAD.

Tabela 7: Correlação entre os valores de *FN*, parâmetros FAD, Bailey e *AIMS*

Variáveis	<i>FN</i>	Teor CAP (%)	Porosidade FAD (%)	AG	GAM	FAM	Esfericidade	Textura	Forma 2D	Ang. Graúdo	Ang. Miúdo
<i>FN</i>	1,00										
Teor de CAP	-0,19	1,00									
Porosidade FAD	-0,28	0,62	1,00								
AG	-0,21	0,66	0,66	1,00							
GAM	0,18	-0,68	-0,37	-0,87	1,00						
FAM	0,16	0,07	0,68	-0,69	0,73	1,00					
Esfericidade	0,28	-0,53	-0,86	-0,52	0,16	-0,66	1,00				
Textura	0,45	-0,18	-0,32	-0,17	0,15	0,31	0,35	1,00			
Forma 2D	-0,51	0,11	-0,11	-0,34	0,22	0,19	-0,16	-0,58	1,00		
Ang. Graúdo	-0,05	-0,52	-0,44	-0,28	0,45	-0,01	0,27	0,12	-0,09	1,00	
Ang. Miúdo	-0,36	0,10	0,06	-0,27	0,20	0,18	-0,32	-0,72	0,91	-0,24	1,00

Entre o parâmetro AG e o *FN* das misturas observou-se que todos os resultados de *FN* são coerentes com os valores de AG. Dessa forma, as misturas M6 e M7 classificadas como finas apresentaram a proporção AG (0,6 e 0,73, respectivamente) dentro dos limites recomendados de 0,6 a 1,0 e com os maiores valores de *FN*, em que apresenta um comportamento da mistura asfáltica resistente com relação à deformação permanente. Vale ressaltar que essas misturas satisfazem o critério para extremamente tráfego pesado, conforme foi sugerido por Bastos (2016), pois apresentaram *FN* com valores superiores a 1000 ciclos. Com relação à forma 2D, a mistura M7, classificada como semicircular (7,8) para as duas metodologias analisadas, apresenta partículas mais arredondadas, no entanto apresentou um valor de *FN* alto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tentativa de contribuir para a escolha de uma granulometria mais resistente à deformação permanente de misturas asfálticas, este artigo relacionou os métodos Bailey e FAD com o *Flow Number* de misturas asfálticas. Além disso, os agregados que compõem as misturas asfálticas foram caracterizados por meio do *AIMS*, no qual os agregados foram classificados segundo duas metodologias. Com relação aos resultados obtidos na metodologia FAD, verificou-se que a relação entre os valores de porosidade FAD e *FN* foram bem coerentes, informando que esse método é promissor como indicador para avaliar a resistência à deformação permanente. Ao correlacionar o *FN* com as variáveis independentes (parâmetros de dosagem, forma e granulometria), maiores correlações foram observadas para a forma 2D, a porosidade FAD e o parâmetro AG do Bailey. Na comparação entre as classificações de propriedade de forma (Al Rousan, 2004 e Ibiapina *et al.*, 2018), observou-se que um agregado pode ser classificado de diferentes maneiras, dependendo da metodologia de classificação

adotada. Percebe-se que apesar de diferentes classificações, os resultados quanto à esfericidade e angularidades dos agregados graúdos e miúdos foram iguais. Isto expõe a semelhança das características de forma dos agregados de diferentes regiões.

Agradecimentos

Ao IFCE e a UFC pelos equipamentos para os diversos ensaios, além do IFCE - PROINFRA e ao CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M 323. *Standard specification for Superpave volumetric mix design*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2013.
- Al Rousan, T. M. *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Dissertation. Texas A&M University, 2004.
- ASTM C136/136M: *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. West Conshohocken, 2014.
- Bastos, J. B. S. *Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico*. Tese (Doutorado) - Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Bessa, I. S. *Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- Cunha, M. B.; Gouveia, L. T.; Júnior, J. L. F.; Motta, L. M. G. *Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do método Bailey*. Transportes, São Paulo, v. 18, n. 1, p.115-126, 2010
- Chen, J. S.; Lin, K. Y.; Chang, M. K. *Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures*. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 1062-1075, 2005.
- DNER ME 081: *Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- DNER ME 083: *Agregados – análise granulométrica*. Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- DNER ME 085: *Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real*. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- DNIT ES 031 (2006) *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT ME 184 (2018) *Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.
- Ferreira, J. L. S.; Soares, J. B.; Bastos, J. B. S. *Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente*. Transportes, Fortaleza, v. 24, n. 2, p.46-52, 2016.
- Greene, J.; Kim, S.; Choubane, B. (2014) *Validation of HMA gradation-based performance evaluation method through accelerated pavement testing*
- Ibiapina, D. S.; Castelo Branco, V. T. F.; Diógenes, L. M.; Motta, L. M. G.; Freitas S. M. (2018) *Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil*. Transportes, v. 26, n. 4, p.116-128.
- KIM, S. *Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture*. Dissertation. Florida University, Gainesville, Florida, 2006.
- Lugo, A. E. A.; Mercado, E. A.; Spinel, S. C. *Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados*. Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 28, No. 2, pp 142-151, 2008.
- Mahmoud, A. F. F.; Bahia, H. *Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures, Wisconsin highway research program*. Projeto Número 0092-01-02, 2004.
- Mendes, L. O.; Marques, G. L (2012) *Avaliação da influência do método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas*. Transportes, v. 20, n. 4, p.35-43.
- Pazos, A. G. (2015) *Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Singh, D.; Zaman, M.; Commuri, S. (2012) *Inclusion of aggregate angularity, texture, and form in estimating dynamic modulus of asphalt mixes*. Road Materials and Pavement Design, v. 13, n. 2, p. 327-344.
- Vavrik, W. R.; Huber, G.; Pine, W. *Bailey method for gradation selection in HMA mixture design*. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, DC, 2002.