

# AVALIAÇÃO DA POROSIDADE MARGINAL DA FAIXA DE AGREGADOS DOMINANTES EM MISTURAS ASFÁLTICAS

**Manoel Gualberto Portela Neto**

**Jorge Barbosa Soares**

Universidade Federal do Ceará

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN

## RESUMO

A Faixa de Agregados Dominantes (FAD) é um método de seleção granulométrica com critérios baseados na porosidade da mistura asfáltica. O conceito chave deste método é a existência de uma faixa de agregados graúdos dominantes que é responsável por resistir à deformação permanente. Embora já tenha sido reportado na literatura a correlação da porosidade FAD com, por exemplo, o *Flow Number* (FN) de misturas asfálticas, há, todavia, uma porosidade compreendida entre 48 a 52%, chamada de marginal, em que os resultados mostram-se inconsistentes. O presente trabalho visa identificar por meio de parâmetros designados FAD-CI (Componentes Intersticiais) quais fatores geram tais inconsistências, de modo a avaliar o efeito nos valores de FN. Objetiva-se explicar o comportamento da mistura com base em tais resultados cuja seleção granulométrica tenha sido feita pela metodologia FAD, dentro e fora da porosidade marginal.

## ABSTRACT

The Dominant Aggregate Range (DASR) is an aggregate gradation selection method based on the porosity of the asphalt mixture. The key concept of this method is the existence of a range of dominant large aggregates that is responsible for resisting permanent deformation. Although the correlation of the DASR porosity with, for example, the Flow Number (FN) of asphaltic mixtures has been reported in the literature. However, there is a porosity range, between 48 and 52%, called marginal, in which the results present inconsistencies. The present paper aims to identify by means of parameters called FAD-CI (Interstitial Components) which factors generate such inconsistencies, in order to evaluate the effect on FN values. It is intended to explain the behavior of the mixtures based on such results, whose gradation was selected by the DASR methodology, inside and outside the marginal porosity.

## 1. INTRODUÇÃO

O método de seleção granulométrica denominado Faixa de Agregados Dominantes (FAD), proposto no Brasil por Ferreira (2015), sobressai pela sua simplicidade conceitual e de execução, conferindo praticidade à especificação e análise. Permite determinar para as misturas asfálticas uma distribuição granulométrica capaz de conferir estabilidade e intertravamento adequados para resistir à deformação permanente e ao trincamento por fadiga. Ou melhor, identifica quais proporções e tamanhos de agregados resistem efetivamente a esses danos. O comportamento mecânico quanto a resistência à deformação permanente das misturas que utilizam o método FAD é analisado no presente artigo. A literatura aponta uma boa correlação de parâmetros do método com o *Flow Number* (FN) obtido a partir do ensaio uniaxial de carga repetida (ABNT NBR 16505, 2016).

Entretanto, existe uma porosidade marginal compreendida entre 48 a 52% na metodologia FAD que resulta em FN com grandes oscilações (KIM, 2006; ROQUE, *et al.* 2006; GUARIN, 2009; GREENE, 2011). A presente pesquisa visa identificar quais fatores geram tais inconsistências e também analisar a estrutura interna da mistura asfáltica considerando-se diferentes taxas de deformação no ensaio uniaxial de carga repetida. Objetiva-se explicar o comportamento da mistura cuja seleção granulométrica tenha sido feita pela metodologia FAD e dentro da porosidade marginal, de modo a jogar mais luz sobre as inconsistências reportadas na literatura quando a granulometria dos agregados leva a esta situação supostamente indesejável, ou seja, a da porosidade marginal.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

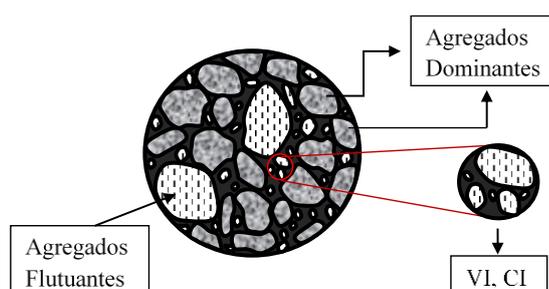
O método FAD, baseado nas especificações do *DASR model* proposto originalmente por Kim (2006), constrói a estrutura granulométrica por meio de contatos intergranulares suficientemente graúdos de modo a conferir melhor estabilidade à mistura. Para tanto, é importante observar a interatividade granular imprescindível para garantir o melhor desempenho da mistura (GREENE *et al.*, 2014).

### 2.1. Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

O método FAD consiste em determinar efetivamente quais tamanhos de agregados interagem entre si para a formação de um esqueleto pétreo estável na mistura, proporcionando boa capacidade de resistir à deformação permanente. Essa interação entre os agregados pode ser composta por um tamanho de partículas ou vários, desde que sejam iguais ou maiores que 1,18mm (Nº 16) entre peneiras sucessivas (KIM, 2006). É reconhecido que só isso não garante um bom desempenho em campo da mistura, pois tal desempenho depende também, entre outros aspectos externos à mistura, de características e propriedades dos componentes mais finos da mesma.

A mistura asfáltica é composta pelos agregados pertencentes à FAD e pelo Volume Intersticial (VI). Os primeiros formam uma rede primária suficientemente graúda que contribui para resistir à deformação permanente. O segundo forma a rede interativa secundária da estrutura FAD, cujas propriedades influenciam no trincamento por fadiga e na energia de ruptura das misturas asfálticas (KIM, 2006; GREENE *et al.*, 2014). Os espaços deixados entre os agregados graúdos são preenchidos por partículas menores que a FAD, ligante e vazios com ar. Tais preenchimentos são chamados de Componentes Intersticiais (CI).

Os agregados maiores que a FAD, segundo Kim (2006), simplesmente flutuam na mistura, não participando da matriz estrutural responsável por resistir à deformação permanente. A Figura 1 ilustra os elementos constituintes determinados pela metodologia FAD.



**Figura 1:** Elementos constituintes de uma mistura asfáltica conforme a metodologia FAD  
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

A FAD é composta pelos agregados retidos a cada duas peneiras consecutivas, sempre que a proporção relativa esteja entre 70/30 e 30/70. Ou seja, dentro desse intervalo os agregados mantêm um espaçamento relativamente constante e proporcionam um contato efetivo, o que é necessário para formar o intertravamento granular. O diagrama de interação da curva granulométrica é utilizado para melhor visualização e identificação de quais tamanhos de agregados possuem proporções consecutivas que estejam entre 30/70 e 70/30 para formar a FAD. A abcissa representa a identificação das peneiras consecutivas (maiores que 1,18mm) e a ordenada representa a porcentagem entre essas peneiras (FERREIRA, 2015).

Kim (2006) expandiu o conceito de porosidade de solo analogamente para misturas asfálticas no método FAD. Os grãos de um solo equivalem aos agregados dominantes, enquanto os vazios entre esses grãos seriam equivalentes ao VI. Numa mistura asfáltica, o volume de vazios do agregado mineral (VAM) é o espaço disponível entre os agregados de uma mistura compactada, ou seja, o espaço a ser ocupado pelo ligante e pelos vazios de ar. Da Equação 1 calcula-se a porosidade FAD.

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

Onde,  $\eta_{FAD}$  = porosidade da FAD (%);  $V_{V(FAD)}$  = volume de vazios dentro da FAD (%);  $V_{T(FAD)}$  = volume total de agregado disponível para a FAD;  $V_{CI,ag}$  = volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD); VAM = volume de vazios no agregado mineral; VTM = volume total da mistura;  $V_{ag > FAD}$  = volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

## 2.2. Porosidade marginal e FAD-CI

Misturas que apresentam porosidades FAD entre 48% a 52%, ou seja, marginais, representam contato intergranular indefinido (KIM, 2006; ROQUE *et al.*, 2006; GUARIN, 2009; GREENE, 2011). Logo, surgiu a necessidade de outros estudos que ajudassem a dar subsídio aos resultados e análises de comportamentos dessas misturas asfálticas.

Atualmente, vários trabalhos (GUARIN, 2009; ROQUE *et al.*, 2011; GREENE *et al.*, 2014) tem estabelecido que a composição da curva granulométrica de uma mistura pode ser expressa separando a granulometria em duas: a Faixa de Agregados Dominantes (FAD) e Componente Intersticial (CI). As características destes componentes, determinadas pela teoria do empacotamento que proporciona uma adequada distribuição do tamanho das partículas, ajudam na escolha de agregados para melhor desempenho da mistura asfáltica. Os parâmetros do modelo FAD-CI utilizados neste trabalho foram o Fator de Ruptura (FR) e o parâmetro PGF / PFF, ambos com o objetivo de determinar o efeito potencial da porção mais fina da curva granulométrica na mistura.

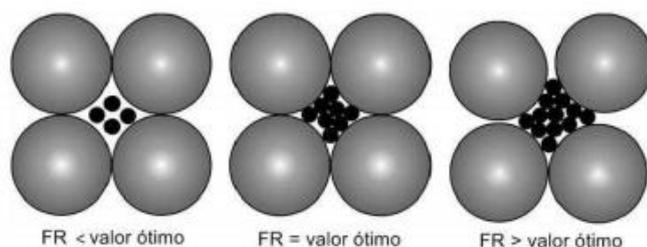
### 2.2.1. Fator de Ruptura (FR)

Kim (2006) e Roque *et al.* (2006) constataram que misturas na porosidade marginal apresentaram resultados com grandes variações no desempenho das misturas à deformação permanente. A partir daí, estudou-se as propriedades dos agregados e as características intrínsecas da curva granulométrica de modo a analisar a influência do comportamento interno granular na deformação permanente no revestimento asfáltico.

Para Guarin (2009), os agregados com diâmetros menores que 1,18mm detêm importância no combate ao trincamento por fadiga e à deformação permanente em misturas asfálticas, possuindo capacidade de melhorar seu desempenho no pavimento. O Fator de Ruptura (FR) desenvolvido pelo referido autor é capaz de proporcionar uma melhor análise das misturas asfálticas na porosidade marginal (FERREIRA, 2015). O FR pode ser denominado como partículas de CI potencialmente rompedoras da estrutura FAD (Equação 2), ou seja, o volume de CI maior ou menor do que os vazios formados pelo contato entre os agregados acima da interatividade FAD, como ilustra a Figura 2.

$$FR = \frac{\text{Volume de partículas CI potencialmente rompedoras}}{\text{Volume de vazios da FAD}} \quad (2)$$

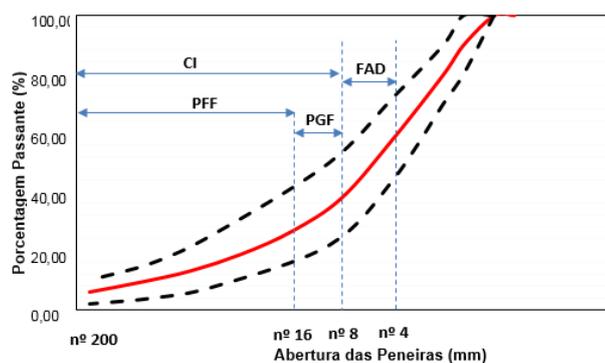
Para Guarin (2009), o conceito implica a existência de uma faixa ótima de FR caracterizada como critério para compor a melhor distribuição volumétrica dos componentes intersticiais de modo a preencher adequadamente os vazios da FAD. Chun *et al.* (2012) apresentam valores preliminares aceitáveis para o FR entre 0,5 e 0,95, faixa indicativa de um melhor desempenho da mistura asfáltica quanto à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.



**Figura 2:** Representação de diferentes valores de FR  
Fonte: Adaptada de Guarin *et al.* (2013).

### 2.1.2. PGF / PFF

Roque *et al.* (2011) estabeleceram o parâmetro PGF / PFF, definido pela relação da partícula graúda da porção fina do CI (PGF) pela porção mais fina restante do CI (PFF), que tem como objetivo caracterizar a composição granulométrica pertencente ao componente intersticial da mistura asfáltica. Esse parâmetro serve para quantificar a finura dos agregados que fazem parte do componente intersticial. Para o referido autor, a razão PGF / PFF está relacionada com a resposta de fluência ou resposta dependente do tempo da mistura. A Figura 3 descreve os princípios básicos da determinação da PGF / PFF.



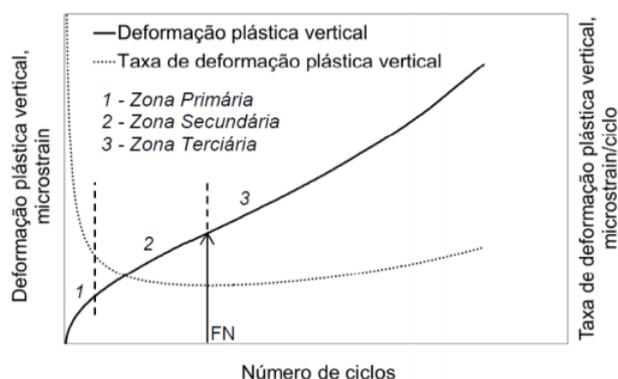
**Figura 3:** Parâmetro PGF / PFF  
Fonte: Adaptada de Roque *et al.* (2011).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Ensaio uniaxial de carga repetida

A norma para avaliação laboratorial da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas no Brasil é a NBR 16505 (2016). A mistura é submetida inicialmente a um pré-carregamento de compressão (acomodação da carga no corpo de prova), seguido de um carregamento de compressão de 204kPa durante 0,1s e permitindo que a amostra repouse por 0,9s. Esse repouso ocorre com o carregamento de 5% da tensão principal (10,2kPa) e a

deformação permanente acumulada em função do tempo é encontrada em função do número de ciclos. O ensaio é realizado a uma temperatura constante de 60°C (WITCZAK *et al.*, 2002). A deformação permanente acumulada pode ser dividida em 03 regiões: primária, secundária e terciária. Inicialmente ocorre uma deformação com taxa elevada e variável (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 entre a zona secundária e zona terciária, conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 4:** Regiões da curva de deformação plástica e o resultado do FN.  
Fonte: ABNT 16505 (2016).

Para a análise da resistência à deformação permanente, obtém-se o *Flow Number* (FN), definido como o número do ciclo inicial da zona terciária, onde a taxa de deformação chega ao valor mínimo e o corpo de prova se rompe. A mistura asfáltica terá maior capacidade de resistir 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) (FERREIRA, 2016).

### 3.2. Misturas Asfálticas

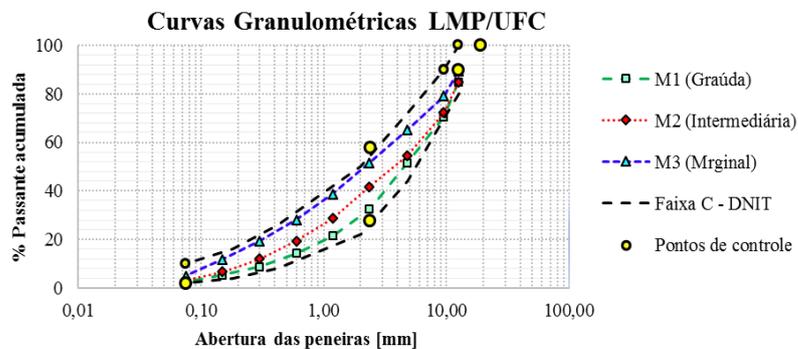
Neste trabalho são contempladas 3 misturas, sendo o objetivo avaliar o efeito da modificação da composição granulométrica sobre a porosidade e a resistência à deformação permanente. O estudo conta ainda com 6 misturas na porosidade marginal, a partir de um banco de dados do grupo de pesquisa da UFC. Dessa forma, foi feita a análise da influência da interatividade, da porcentagem de agregados graúdos e do CI na porosidade marginal FAD de diferentes misturas sob a perspectiva da deformação permanente. A Tabela 1 resume algumas características das misturas, dos ligantes e dos agregados.

**Tabela 1:** Características gerais das misturas asfálticas avaliadas

Misturas	Referência	Dosagem	Teor de Ligante (%)	TMN (mm)	Vv de projeto (%)	Tipo de ligante	Origem dos agregados	Gsb	Gmm
M1			5,5		4,09				2,287
M2	Autor	Superpave	5,0	12,5	3,73	50-70	Fonolítico	2,471	2,351
M3			4,5		4,30				2,241
M4	Nascimento	Marshall	4,9	19,0	4,00	50-70	Gnáisse-	2,672	2,534
M5	(2008)		4,6	12,5	4,00	50-70	Granítico	2,673	2,541
M6	CCR (ANTT	Superpave	4,9		4,40	30-45	Granítico	2,747	2,563
M7	- 2018)		4,7	19,0	4,10	50-70	Granítico	2,747	2,569
M8	Bastos (2016)		4,5		3,90	50-70	Gnáisse	2,615	2,524
M9	Almeida	Marshall	3,7		4,00	50-70	Diabásico	2,953	2,665

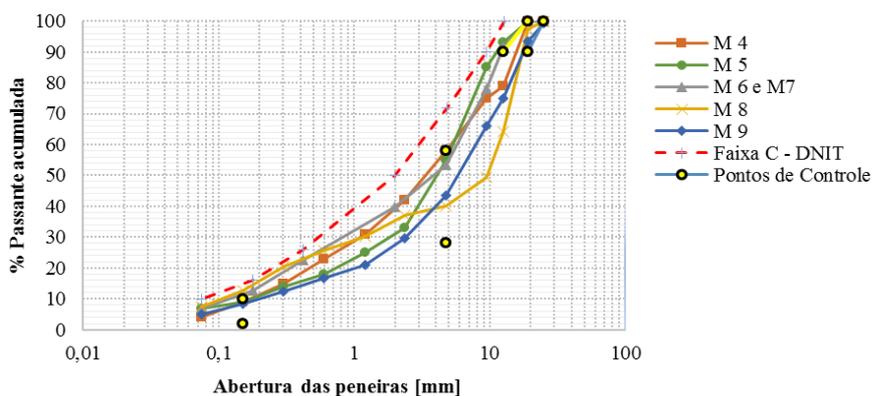
A partir da curva granulométrica da mistura M2, foi elaborada uma curva com maior porcentagem de agregados graúdos dominantes, isto é, cuja proporção entre a porcentagem de agregados retidos estivesse acima da abertura da peneira 1,18mm (Nº 16). Do mesmo modo, elaborou-se outra curva com maior quantidade de agregados retidos que formam os componentes intersticiais, ou seja, abaixo da referida abertura de peneira. Dessa forma, percebe-se a grande influência das proporções entre os agregados retidos na porosidade FAD das misturas em relação teor de ligante e vazios de ar (Figura 5). Importante ressaltar que não houve variação do tipo de agregado mineral e do ligante, nem da origem e quantidade total de agregados. Isso possibilitou analisar a influência das distintas curvas granulométricas nos resultados de FN das misturas.

As curvas granulométricas de projeto das misturas M1, M2 e M3 (Figura 5) foram enquadradas na Faixa C do DNIT 031/2006 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – ES e dentro dos pontos de controle da norma americana AASHTO M 323 (2013).



**Figura 5:** Curvas granulométricas de projeto das misturas M1, M2 e M3.

As 3 curvas granulométricas das misturas M1, M2 e M3 são contínuas, apresentando uma proporcionalidade semelhante entre todos os tamanhos de partículas de cada curva. A mistura M1 possui composição granulométrica mais próxima do limite inferior do DNIT e também dos pontos de controle inferior da AASTHO, caracterizando assim, uma curva graúda dentre as misturas dosadas. Na mistura M3, a curva de projeto possui maior quantidade de miúdos (menores que 1,18mm), caracterizada dentro da porosidade marginal FAD ( $\eta = 48\%$ ). A curva da mistura M2, possui a média das proporções da M1 e M3. Quanto ao banco de dados, o mesmo é composto por agregados de diferentes origens, sendo oriundos de dois estados brasileiros, Ceará e Rio de Janeiro. As curvas granulométricas são mostradas na Figura 6.

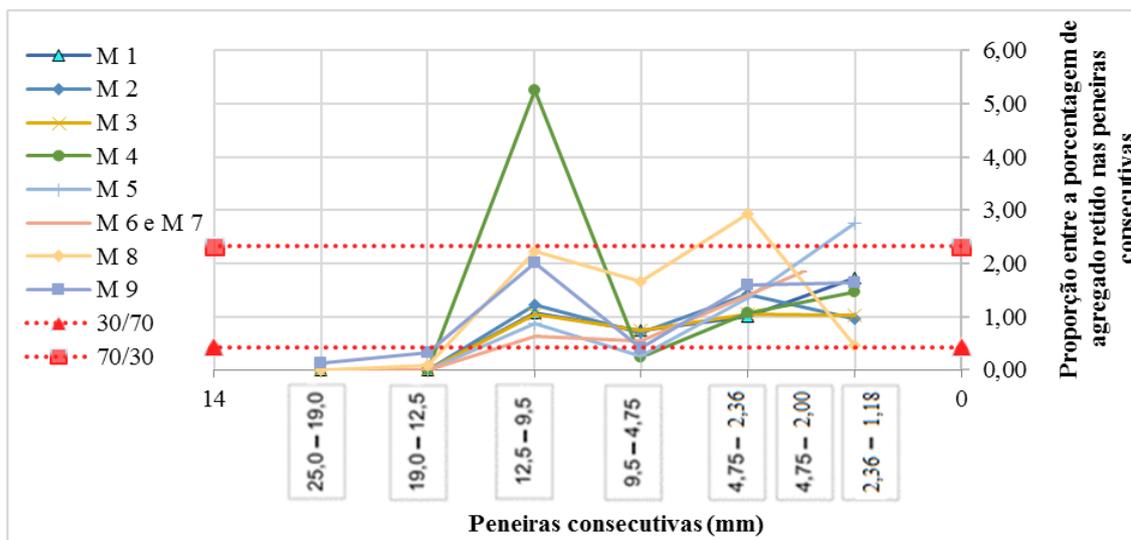


**Figura 6:** Curvas granulométricas do banco de dados

## 4. ANÁLISES

### 4.1. Aplicação da metodologia FAD

O diagrama de interação, ilustrado na Figura 7, para cada mistura asfáltica investigada é obtido por meio da determinação das proporções relativas do percentual retido entre peneiras consecutivas. Por meio dele é possível observar quais tamanhos de agregados compõem o intertravamento granular das misturas asfálticas. A FAD de cada mistura é formada por uma peneira ou grupo de peneiras consecutivas que interagem entre si, dentro do intervalo de proporção 70/30 a 30/70 e com a menor porosidade.



**Figura 7:** Diagrama de interação FAD

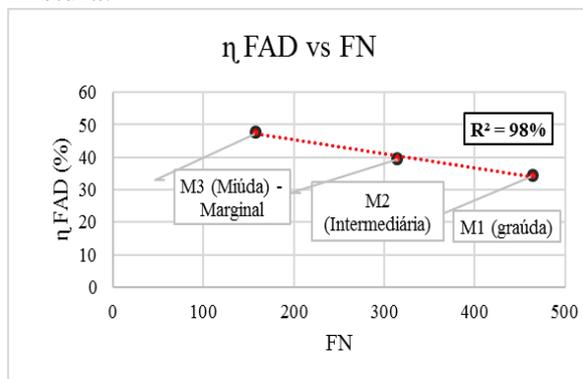
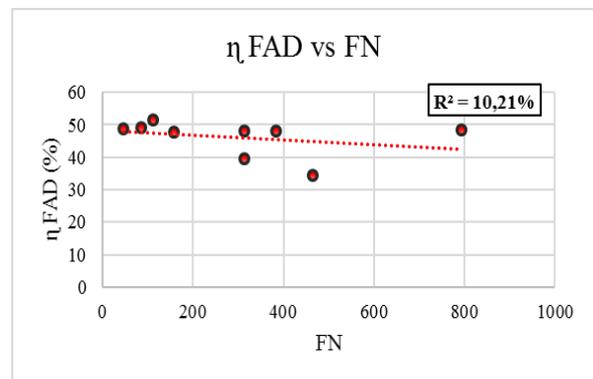
Da Figura 7, constata-se a interatividade entre todas as peneiras da FAD (12,5 – 1,18 mm) nas misturas dosadas em laboratório (M1, M2 e M3). As misturas M6 e M7 seguem o método de seleção granulométrica do DERSA, enquadrados na Faixa III e possuem interatividade FAD de 12,5 mm a 2,00 mm. A Tabela 2, mostra a interatividade FAD das misturas.

A porosidade FAD foi calculada para cada mistura de acordo com a Equação 1 e com os valores encontrados na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta a porosidade FAD e os valores de FN encontrados, resultados estes de baixa correlação.

**Tabela 2: Resultados da interatividade e FN**

Misturas	Interatividade FAD	Porosidade FAD (%)	FN
M1		34	465
M2	12,5 – 1,18	39	315
M3		48	158
M4	4,75 – 1,18	51	112
M5	4,75 – 2,36	48	384
M6	12,5 – 2,00	49	87
M7	12,5 – 2,00	49	48
M8	12,5 – 4,75	48	795
M9	4,75 – 1,18	48	314

A Figura 8a apresenta a correlação encontrada entre a porosidade FAD e o FN para as misturas asfálticas dosadas no LMP/UFC, cuja única diferença são as proporções de agregados retidos entre as peneiras consecutivas maiores que 1,18 mm (Nº 16). A Figura 8b mostra a correlação de todas as misturas entre a porosidade FAD e o FN da respectiva mistura.

**Figura 8a: FAD x FN (LMP)****Figura 8b: FAD x FN (Todas as misturas)**

Pode-se observar também que para variações apenas na composição dos agregados (misturas M1, M2 e M3), mantendo o mesmo número de interações, tipo de ligante e quantidade total de agregados da mistura asfáltica, a correlação tende a ser satisfatória, mesmo incluindo uma mistura na porosidade marginal. É, contudo, importante se obter uma maior quantidade de dados para validar tal hipótese. No entanto, a Figura 8b, quando se adiciona misturas com diferentes origens de agregados, método de dosagem, ligante, curvas granulométricas, tem-se uma baixa correlação dos parâmetros (porosidade FAD e FN) quando se considera as misturas na porosidade marginal.

Observando-se as curvas granulométricas da Figura 5 juntamente com o diagrama de interação da Figura 7, obtém-se a Tabela 3 nas quais as misturas apresentaram uma ordem crescente nos valores de FN correspondentes a quantidade de agregados graúdos para misturas com mesma origem de agregado e mesmo método de dosagem. Nas misturas M1 a M3, a medida que aumenta a quantidade de agregado na FAD e diminui o CI, aumenta o resultado de FN. A mistura M5 possui FN maior que a M4, devido a uma maior porcentagem de agregados na FAD, apesar da menor quantidade de peneiras interagindo. Também pode ser explicado pelo fato de que a M5 possui interação entre as peneiras de 12,5 e 9,5mm e entre as peneiras de 4,75 a 2,36mm, mas não há interação entre as de 9,5 e 4,75mm. Portanto, as séries de peneiras não estão consecutivas com as próximas. Desse modo, embora a proporção entre as peneiras de 9,5 e 4,75mm esteja próxima ao limite de interatividade, são desconsideradas no cálculo da FAD, mas exercem influência no resultado de FN. Pois segundo a metodologia

FAD, são consideradas apenas a interação granular com menor porosidade.

Quanto as misturas M6 e M7, cuja única diferença está no tipo de ligante, notou-se uma diferença de valor de FN, em que o CAP 30-45, por ser mais viscoso, resultou num maior FN. No que diz respeito as misturas M8 e M9, apesar de possuírem diferentes agregados e método de dosagem, observou-se que a M8, por apresentar interatividade entre os maiores tamanhos de agregados, maior quantidade de partículas na FAD e menor porcentagem de agregados flutuantes, teve maior valor de FN do que a mistura M9, como apresenta a Tabela 3.

**Tabela 3: Porcentagem de agregados FAD, flutuantes e CI**

Misturas	Interatividade FAD	FN	Ag. Flutuantes (%)	Ag. FAD (%)	CI (%)
M1		465	0	79	21
M2	12,5 - 1,18	315	0	71	29
M3		158	0	61	39
M4	4,75 - 1,18	112	25	44	31
M5	4,75 - 2,36	384	15	52	33
M6	12,5 - 2,00	87	0	60	40
M7	12,5 - 2,00	48	0	60	40
M8	12,5 - 4,75	795	3	57	40
M9	4,75 - 1,18	314	34	45	21

Na Tabela 3 é possível identificar que a porcentagem de agregados que compõem a FAD na mistura asfáltica é responsável por influenciar em grande parte os valores bastante distintos de FN. Quanto mais agregados graúdos dentro da estrutura FAD, maior será o FN. Conforme a Equação 1, a porosidade FAD é função teor de ligante asfáltico, porcentagem de agregados FAD e de CI, porém os agregados influenciam significativamente em tal parâmetro. Assim, a diferença entre as porcentagens de agregados que formam a FAD da mistura M1 para M2 e de M2 para M3 foram de 7,27% e 9,98%, implicando o aumento de FN, cerca de 1,5 e 2,0 vezes, respectivamente. Isso mostra o impacto dos agregados graúdos da FAD nos resultados de FN. Para o caso da mistura M3 (que possui maior quantidade de agregados de CI que a M2), a menor porcentagem de agregados graúdos na FAD e, conseqüentemente, uma maior porcentagem de componente intersticial, conferiu um aumento da porosidade e um menor valor de FN em relação as outras duas misturas.

#### 4.2. Análise das misturas na porosidade marginal pelo FR e (PGF / PFF)

Para Guarin (2009), somente a porosidade FAD pode não representar adequadamente o comportamento mecânico da mistura asfáltica, ainda mais quando se consideram as misturas com porosidade FAD marginal. De acordo com as recomendações do referido autor, a determinação do FR dos agregados é capaz de avaliar misturas com mau desempenho. Observando os parâmetros da FAD-CI (FR e PGF / PFF), apresentados na Tabela 4, pode-se obter análises do comportamento da mistura a partir dos componentes intersticiais da curva granulométrica. Estes componentes podem fornecer subsídios para a avaliação nos valores de FN das diferentes misturas, mesmo na porosidade marginal.

**Tabela 4: Parâmetros FAD-CI**

Misturas	Porosidade FAD (%)	FN	FR	PGF / PFF
M1	34	465	0,65	0,50
M2	39	315	0,96	0,49

M3	48	158	1,11	0,38
M4	51	112	0,87	0,35
M5	48	384	0,53	0,32
M6	49	87	1,35	0,75
M7	49	48	1,35	0,75
M8	48	795	0,61	0,32
M9	48	314	0,54	0,27

Em seus estudos, Chun *et al.* (2012) recomendam valores de FR entre 0,50 a 0,95 para que misturas tenham bom comportamento. Valores de FR acima de 0,95 indicam uma estrutura granulométrica dispersa, sem contatos granulares adequados, conseqüentemente levando a uma diminuição da resistência à deformação permanente. Valores de FR abaixo de 0,50 indicariam misturas com vazios maiores que o preenchimento, ou melhor, predominantemente graúdas.

As misturas asfálticas M3, M6 e M7 possuem valores de FR acima da faixa ótima, justificando os menores valores de FN dentre as misturas investigadas. Não há correlação linear entre o FR e o FN, pois o que caracteriza uma boa mistura pelo FR é a mesma estar próxima do intervalo 0,50 a 0,95 e não o fato de apresentar valores de FR mais próximos de 0,95. Com relação ao parâmetro FAR, mostrado na Tabela 4, as misturas M4, M5, M8 e M9, podem apresentar melhor desempenho ao trincamento, pois a quantidade de agregados que fazem parte do componente intersticial está dentro dos valores recomendados por Roque *et al.* (2011), i.e., entre 0,28 a 0,36. Quanto as demais misturas, pode-se dizer que há um excesso de finura na curva granulométrica capaz de prejudicar o comportamento ideal segundo as pesquisas do referido autor. A RAF também é um parâmetro para avaliar as misturas na porosidade marginal, sendo que resultados mais baixos de FN corresponderam aos valores mais distantes do referido intervalo.

Os diferentes valores de FN das misturas M4 e M9, as quais possuem a mesma interatividade em tese e alta porcentagem de agregados flutuantes, pode ser explicado pelo limite de interatividade FAD, ou seja, a proporção 30/70 a 70/30. Observando o diagrama de interação (Figura 8), a mistura M4 não possui agregado interagindo acima da FAD e também com proporções longe do referido intervalo. No entanto, a mistura M9 possui interatividade acima da FAD, ou seja, entre as peneiras 12,5 mm e 9,5 mm e também com a proporção entre as peneiras 9,5 mm e 4,75 mm próxima ao limite inferior, igual a 0,41. Pelo fato de não serem consecutivas, tais peneiras correspondem a agregados flutuantes, sendo que, no resultado de FN, há influência. Desse modo, o intervalo do fator de empacotamento deve ser analisado tendo em vista as propriedades dos agregados, como por exemplo, a esfericidade, em que se possa considerar proporções dos agregados fora do referido intervalo.

## 5. CONCLUSÕES

As misturas dentro da porosidade marginal FAD possuem grandes oscilações do FN devido em grande parte a granulometria, além da origem dos agregados e do tipo de dosagem. Para proporções muito próximas do limite superior (70/30 ou 2,33) do intervalo da interatividade FAD, há maior quantidade de agregados na peneira superior do que na inferior subsequente. Isso explica o porquê de se obter resultados de FN mais altos comparativamente a quando se está dentro da porosidade marginal. Outra consideração importante é que quanto maior a quantidade de interação e mais graúdo for o tamanho dos agregados que compõem a FAD,

maior será o FN. Além de formarem uma matriz granular altamente intertravada devido a interação, são compostas por agregados predominantemente graúdos. Obtém-se, assim, melhores resistências à deformação permanente. Portanto, para misturas com porosidade marginal, é necessário avaliar o nível e a graudez do intertravamento granular FAD, já que suas porosidades são quase as mesmas (entre 48 e 52%). Além disso, faz-se necessário o estudo do intervalo do fator de empacotamento, estabelecido por partículas esféricas, pois caso tenha interação entre os agregados acima da FAD ou próxima a proporção 30/70 e 70/30, há sim, interferência nos resultados de FN. Desse modo, justifica o estudo das propriedades dos agregados quanto ao grau de esfericidade, forma e textura superficial no fator de empacotamento.

Se uma mistura possui intertravamento FAD entre as peneiras 2,36 e 1,18mm, haverá grande quantidade de agregados flutuantes que não desempenham papel importante na resistência, podendo causar uma desestabilização na estrutura granular. No cálculo da porosidade FAD, quanto mais agregados flutuantes, maior a porosidade. A quantidade desses agregados pode resultar em misturas com baixo valor de FN. O contrário, se a matriz granular é composta por todas as proporções dentro da rede interativa, não havendo agregados flutuantes, o nível de intertravamento pétreo será maior. Ou seja, todos os tamanhos de agregado maiores que 1,18mm compõem a FAD e irão trabalhar efetivamente para resistir melhor à deformação permanente.

Identificou-se uma forte correlação entre a porosidade FAD e o FN entre as misturas dosadas para presente pesquisa, ou seja, cuja única diferença está na proporção entre os agregados retidos entre as peneiras subsequentes da FAD, com mesma origem de agregados e método de dosagem. Portanto, se mantivermos tais características é possível ranquear as misturas com uma boa correlação. A considerável melhora do FN (variação de 294%) entre as misturas M1 (graúda) e M3 (miúda), 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, sem necessariamente inserir aditivos, modificando apenas a granulometria.

Com relação aos parâmetros FAD-CI, para as 6 misturas na porosidade marginal, o FR mostrou-se um parâmetro capaz de identificar misturas com má interação granular. As misturas marginais que obtiveram um FR dentro do intervalo proposto tiveram altos valores de FN. O parâmetro PGF / PFF contribuiu satisfatoriamente na avaliação dos FN nas misturas com porosidade marginal, pois preenche adequadamente os vazios das partículas FAD com o CI, o que leva a melhor resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AASHTO (2012) *M 323 - Standard specification for Superpave volumetric mix design, mixtures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ABNT (2016) *NBR 16505 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- BASTOS, J. B. S. (2016) *Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico*. Dissertação de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará–Petran/UFC. Fortaleza, Brasil.
- CHUN, S., ROQUE, R.; ZOU, J. (2012) Effect of gradation characteristics on performance of Superpave mixtures in the field. *Transportation Research Record* 1540, Washington D.C., pp. 43-52.
- DNIT 031 (2006) *Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- FERREIRA, J. L. S. (2015) *Melhoramento da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pela escolha granulométrica a partir da metodologia da faixa de agregados dominantes*. Projeto de

Graduação Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

- GREENE, J.; S. CHUN; 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., KIM, S. e CHOUBANE, B. (2011) Validation of HMA gradation-based performance evaluation method through Accelerated Pavement Testing. Washington, DC: *Transportation Research Board*, Paper No 11-0895.
- GUARIN, A. (2009) *Interstitial Component characterization to evaluate asphalt mixture performance*. PhD dissertation. University of Florida, Gainesville.
- KIM, S. (2006) *Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture*. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Florida, Gainesville.
- 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.
- ROQUE, R., BIRGISSON, B., KIM, S. e GUARIN, A. (2006) *Desenvolvimento de diretrizes para Projetos visando melhor desempenho das misturas asfálticas*. Relatório final do Departamento de Transporte, Universidade da Flórida, Gainesville, FL.
- ROQUE, R. S.; CHUN, J.; ZOU, G.; LOPP, C. (2011) VILLIERS. *Continuation of Superpave Projects Monitoring*. Contract BDK-75, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
- VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; HUBER, G. A. (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.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H. (2002b) Aggregate blending for asphalt mix design – Bailey Method. *Transportation Research Record*, n°. 1789 – Paper n° 02-3629, p°. 146-153.
- WANG, L. (2011) *Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics*. McGraw-Hill Companies, Inc.