

## A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas

The design gradation' influence according to Bailey, FAD and Marshall methodologies on the asphalt mixtures' permanent deformation performance

Daniela Muniz D'Antona Guimarães<sup>1</sup> , Laura Maria Goretti da Motta<sup>2</sup>, Ben-Hur Albuquerque Silva<sup>3</sup>, Marco Antônio Fritzen<sup>2</sup>, Carlos Eduardo Neves de Castro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Amazonas, Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão, Bairro Coroado 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte, 69080-900, Manaus, AM, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon, 550, Cidade Universitária, 21941-901, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, 22290, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Federal do Amazonas, Grupo de Pesquisa em Geotecnia, Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão, Bairro Coroado 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte, 69080-900, Manaus, AM, Brasil.

e-mail: danielamuniz@ufam.edu.br, laura@coc.ufrj.br, benhuralbuquerque@yahoo.com.br, marcos.antonio@coc.ufrj.br, carlosnvscastro@gmail.com

### RESUMO

A deformação permanente nos revestimentos asfálticos constitui-se em um dos principais defeitos encontrados em pavimentos rodoviários e urbanos. Nesse contexto, estudos têm sido realizados sobre a contribuição da granulometria para minimizar esse tipo de problema. O trabalho em pauta avaliou a influência da estrutura mineral no desempenho mecânico, quanto: Índice de Densificação na Compactação, Índice de Densificação pelo Tráfego, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Ensaio Uniaxial de Carga Repetida – Flow Number e Dano por Umidade Induzida. Pesquisaram-se duas misturas asfálticas. A primeira, composição referência, M0, habitualmente aplicada nos pavimentos manauaras e projetada segundo a metodologia Marshall. A segunda, a formulação proposta no presente estudo, M1, utilizou critérios mais atuais de dosagem, tais como: metodologia Superpave, Métodos Bailey e Faixa de Agregados Dominantes, fundamentada num forte esqueleto pétreo de gradação graúda, excluindo a areia natural presente na M0. Os resultados mostraram que a mistura asfáltica M1, relativa à composição asfáltica M0, alcançou melhor desempenho para vias com alto volume de tráfego e em condições severas, pois apresentaram deformações permanentes menores em relação a Mistura M0 comumente usadas nos pavimentos Urbanos.

**Palavras-chave:** Afundamento em trilha de roda; *Flow Number*; Método de Bailey; Metodologia da Faixa de Agregados Dominantes; Índice  $\kappa$ .

### ABSTRACT

Asphalt mixtures rutting is one of the main distresses that can happen at road and urban pavements. In this context, researches have been carried out on the aggregate gradation contribution to reduce this type of problem. This paper evaluated the influence of the mineral structure on the mechanical performance, regarding: Compaction Densification Index, Traffic Densification Index, Diametral Compression Tensile Strength, Uniaxial Repeated Load Test, Flow Number; and Moisture Induced Damage. Two asphalt mixtures were investigated. The first, reference composition M0, usually applied to Manaus pavements and designed according to the Marshall methodology. The second (M1), which is the formulation proposed in the present study, used the most current dosage criteria, such as: Superpave methodology, *Bailey Method and Dominant Aggregate Size Range*

*model*, based on a strong stone skeleton of coarse grade, excluding natural sand, present at M0. The results revealed that the asphalt mixture M1, relative to the asphalt composition M0, achieved better performance for roads with high traffic volume and under severe conditions, as they presented smaller permanent deformations in relation to M0 mixture commonly used in urban pavements.

**Keywords:** Rutting; Flow Number; Bailey method; Dominant Aggregate Size Range model; Structural index ( $\kappa$ ).

## 1. INTRODUÇÃO

A deformação permanente nos revestimentos asfálticos constitui-se em um dos principais defeitos encontrados em pavimentos rodoviários e urbanos. Sua ocorrência é resultado de repetitivas deformações cisalhantes ocasionadas pela ação da carga imposta pelo tráfego e, em menor grau, pela densificação da camada [1–4], respondendo por mais de 80% dos danos iniciais ao pavimento asfáltico [5].

Tendo em vista a minimizar a presença de deformações e ao mesmo tempo contribuir com a longevidades dos pavimentos, pesquisas vêm sendo realizadas sobre a composição granulométrica das misturas asfálticas. Na literatura constam trabalhos com esse enfoque, como os métodos de Bailey e da Faixa de Agregados Dominantes (FAD) [6–10]. HORAK *et al.* [11] mencionaram que as citadas metodologias se baseiam na otimização do empacotamento volumétrico, porém, diferem entre si por suas diferentes abordagens [11]. Enquanto o método Bailey usa várias proporções de agregados graúdos, miúdos e de enchimento para desenvolver uma composição ideal por tentativa e erro, a metodologia FAD faz uso da porosidade como propriedade fundamental para estimar a eficiência do empacotamento [11].

Nesse contexto, tem-se a investigação de FERREIRA *et al.* [12], que por meio dos parâmetros  $\alpha$  e C, fundamentado no método FAD, avaliaram a qualidade da distribuição granulométrica concernente à deformação permanente em misturas asfálticas. Em particular, os parâmetros  $\alpha$  e C caracterizam o grau de intertravamento e à quantidade de partículas relativamente maiores dentro da estrutura, respectivamente. No mencionado estudo inseriu-se um terceiro parâmetro k, para representar a contribuição do ligante, bem como determinou-se, o Flow Number (FN) por meio do ensaio axial de carga repetida. Os autores realçam a boa correlação entre os mencionados parâmetros e os valores de *Flow Number*.

Referente ao emprego do método de Bailey, a literatura apresenta o trabalho de GHUZLAN *et al.* [8], em que estudaram misturas asfálticas segundo o que prescreve a *Superpave*. Os autores observaram que, composições situadas acima da zona de restrição granulométrica *Superpave* possuíam maior valor de FN. No entanto, as misturas asfálticas localizadas nessa condição, além de alcançar resultados apreciáveis podem implicar maior economia, visto que a técnica proporciona misturas com boa resistência à deformação permanente, menos consumo de ligante e menor número de giros no compactador giratório. Contudo, atualmente o método Superpave desconsidera a zona de restrição.

Na busca de granulometrias com intertravamento adequado para resistir à deformação permanente, FERREIRA *et al.* [13] avaliaram e compararam os métodos Bailey e da Faixa de Agregados Dominantes (FAD) para oito misturas asfálticas produzidas com materiais de diferentes regiões do Brasil. Identificaram forte correlação entre a porosidade FAD e o FN. Enfatizaram ainda que, relativo ao método Bailey, a metodologia FAD destacou-se por utilizar apenas a porosidade FAD. Além disso, diferentemente do método FAD, no qual todas as suas previsões de comportamento mecânico foram confirmadas para as misturas estudadas, as avaliações segundo o método Bailey não se mostraram totalmente coerentes.

Na pesquisa de RODRIGUES *et al.* [14], os autores encontraram interdependência na relação entre o FN e o método FAD, ao passo que, apenas um dentre os três parâmetros analisados pela metodologia Bailey apresentou indicação de correlação com FN e, ainda assim, segundo um baixo valor. Assim, concluíram que os intervalos de valores concernentes aos parâmetros prescritos por Bailey são difíceis de serem integralmente obedecidos, mesmo para misturas com bons resultados de acordo com o ensaio uniaxial de carga repetida.

Alusivo ao *Flow Number*, o estudo de WITCZAK *et al.* [15], citam que esse parâmetro, determinado pelo ensaio uniaxial de carga repetida, é que melhor se correlaciona com afundamento em trilha-de-roda. O FN vem sendo correlacionado quanto ao desempenho em função do tráfego [16–19]. No Brasil, diversas pesquisas avaliando a deformação permanente em composições asfálticas vem sendo realizado [20–24]. Recentemente, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) divulgou o novo método de dimensionamento de pavimentos, MeDiNa, e relativo à deformação permanente, os valores de *Flow Number* são indicados para classificar as misturas asfálticas, em conformidade com as condições de solicitação de tráfego [25].

Consoante a localidades com altas temperaturas, como ocorre em regiões tropicais, a deformação permanente constitui-se em um dos principais meios de desgaste dos pavimentos asfálticos [1, 18, 26]. Nesse contexto tem-se a incidência recorrente desse defeito nos pavimentos da cidade de Manaus-AM [27–28]. Ressalta-se que

as características da região, seja do clima regional, com elevadas temperaturas, e longos e intensos períodos de chuva [29], bem como pela deficiência de jazidas de material pétreo superficial [7, 30–33], contribuem para a ocorrência desse tipo de manifestação patológica verificada nos pavimentos da cidade região [27–28].

Com intuito de contribuir com propostas mitigadoras à região de Manaus, Melo [33] estudou, por meio do método de Bailey, a deformação permanente em misturas asfálticas com resíduo de construção e demolição (RCD) oriundos da cidade de Manaus-AM. Nesse similar contexto, D'Antona e Frota [7] avaliaram a suscetibilidade a deformação permanente em concretos asfálticos, com objetivo de melhorar as propriedades reológicas do ligante, ao adicionar 4% do polímero EVA ao CAP 50/70. Constatou-se melhor desempenho das misturas contendo o ligante modificado, sendo indicado sua utilização como revestimento asfáltico para as vias da Capital do Estado do Amazonas.

Em conformidade com a temática apresentada realizou-se o trabalho em pauta. Reconstituiu-se em laboratório uma mistura asfáltica usada tradicionalmente em diversas vias da cidade de Manaus (mistura de referência). Após essa etapa, as composições elaboradas com os materiais formadores dessas habituais formulações foram submetidas a uma nova dosagem e, nesse caso específico, em conformidade com as metodologias Superpave, granulométricas de Bailey e da Faixa de Agregados Dominantes (mistura alternativa). Por conseguinte, projetou-se uma mistura asfáltica segundo uma composição granulométrica com forte esqueleto pétreo, maior atrito interno e melhor intertravamento, assim como, um adequado teor de ligante. Ao conjunto dessas formulações asfálticas (referência e alternativa) determinou-se o parâmetro *Flow Number*, com o propósito de avaliar à deformação permanente, almejando uma mistura asfáltica mais estável e resistente.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho em apreço investigou duas composições asfálticas. A mistura asfáltica referência, M0, revestimento frequentemente construído nos pavimentos urbanos manauaras, em que participaram: areia residual, pó de pedra, brita 0, brita 1, e o ligante asfáltico comercializado na região. Tais materiais também integraram a composição asfáltica, proposta como alternativa, denominada M1, porém, segundo diferente metodologia concernente ao projeto de dosagem Superpave, utilizando o compactador giratório e composição mineral.

### 2.1. Materiais

O ligante asfáltico integrante do estudo é produzido na Refinaria Isaac Sabbá (REMAN), sediada em Manaus, e habitual componente das obras de pavimentação do Estado do Amazonas. Foi doado para realização do trabalho pela empresa ARDO Construtora. Sua caracterização fundamentou-se nas classificações reológicas dos ligantes asfálticos estabelecidas pela *Superpave*: (i) *Performance Graded* (PG) – Classificação de desempenho (AASHTO M 320-17); (ii) *Continuous Grade* (PG-C) – Classificação contínua de desempenho (ASTM 7643-16); (iii) *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) – Fluência e recuperação sob tensão múltipla (AASHTO M 332-14).

Na condição de agregados foram incluídos: pó de pedra, brita 0, brita 1 e brita 2 comercializado pela Empresa Brasileira de Agregados Minerais (EBAM). Tais partícipes provêm da pedreira de rocha granítica pertencente a Fazenda Joel, localizada no km 134 da BR174, Município de Presidente Figueiredo – AM, distante 145 km de Manaus. No caso da areia residual, esta é procedente do areal Lagoa Azul, situado no ramal Bandeirantes, km 23 da BR 174, localizada cerca de 30 km de Manaus. Caracterizaram-se os mencionados materiais, em conformidade com os ensaios normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a citar: Massa Específica Aparente (DNER-ME 413/2019), Massa Específica Real (DNIT-ME 413/2019; DNIT-ME 411/2019), Absorção (DNIT-ME 413/2019), Equivalente Areia (DNER-ME 054/97), Massa Específica Solta (ASTM C29) e Massa Específica Compactada (ASTM C29).

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Metodologia Bailey

Robert Bailey desenvolveu uma metodologia [6] para seleção da curva granulométrica de misturas asfálticas, fundamentado na análise do intertravamento dos agregados, contribuindo, de tal modo, para uma formulação mais resistente à deformação permanente, por meio do ajuste do volume de vazios ( $V_v$ ) e do volume de agregado mineral (VAM).

Na aplicação desse método, inicialmente, verifica-se se a composição tem granulometria grossa ou fina, segundo a Peneira de Controle Primário (PCP) (AASHTO M323/2013). Na sequência, examina-se o comportamento em conformidade como o volume de vazios disponível na fração graúda ( $VCA_{RUW}$ ) e o volume

ocupado pela fração miúda ( $VCA_{MIX}$ ) (ASPHALT INSTITUTE, 2011). Prosseguindo, calculam-se as proporções do agregado graúdo, graúda do agregado fino e fina do agregado fino ( $AG$ ,  $FA_G$ , e  $FA_F$ ), conforme as equações 1 a 3. 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.

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

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

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

onde:

PM: peneira média (mais próxima da metade do TMN);

PCP: peneira de controle primário (mais próxima da TMN $\times$ 0,22);

PCS: peneira de controle secundário (mais próxima da PCP $\times$ 0,22);

PCT: peneira de controle terciário (mais próxima da PCS $\times$ 0,22);

AG: proporção do agregado graúdo;

$GA_f$ : proporção graúda do agregado fino;

$FA_f$ : proporção fina do agregado fino;

### 2.2.2. Metodologia FAD

No método da Faixa de Agregados Dominantes (FAD), que visa também melhorar o entrosamento granulométrico, deve-se encontrar, inicialmente, o diagrama de interação das peneiras [9], e dando continuidade, calcula-se a porosidade pelas equações 4 a 6.

$$\eta_{FAD} = \frac{V_{v(FAD)}}{V_{T(FAD)}} = \frac{V_{IC,ag} + VAM}{V_{TM} - V_{ag>FAD}} \quad (4)$$

$$V_{IC,ag} = \frac{\sum \%ret < FAD}{G_{sb}} \times 100 \quad (5)$$

$$V_{ag>FAD} = \frac{\sum \%ret > FAD}{G_{sb}} \times 100 \quad (6)$$

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;

$V_{IC,ag}$ : 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);

$\sum \%ret < FAD$ : soma dos percentuais retidos nas peneiras menores do que a FAD;

$\sum \%ret > FAD$ : soma dos percentuais retidos nas peneiras maiores do que a FAD;

$G_{sb}$ : massa específica aparente dos agregados.

No entanto, FERREIRA *et al.* [12] realçam algumas limitações da modelagem FAD, pois o principal parâmetro de avaliação depende das informações obtidas no final do projeto de mistura (ou seja, teor de ligante). Desta forma, os autores sugeriram três novos parâmetros, fundamentado na hipótese da existência de uma estrutura principal de agregados responsável por absorver e transmitir tensões sem desenvolver deformação plástica.

Dois desses parâmetros foram propostos para caracterizar tal estrutura. O primeiro,  $\alpha$ , distingue o grau de intertravamento, intitulada Faixa de Tamanho Agregado Dominante (FAD). Aponta o quanto a matriz pétreia de interesse não contribui para a resistência a deformação permanente da mistura asfáltica (equação 7).

$$\alpha = \frac{M_{ag,int}}{M_{ag,int} - M_{ag,dom}} \quad (7)$$

onde:

$\alpha$  – proporção de agregados não estruturais;

$M_{ag,int}$  – massa dos agregados intersticiais;

$M_{ag,dom}$  – massa dos agregados dominantes.

O segundo parâmetro,  $G$ , avalia apenas a estrutura dos agregados dominantes, sendo relacionado à quantidade de partículas relativamente maiores. Identifica-se pela análise de interação entre as peneiras, denominado como proporção graúda dominante ( $G$ ), e definido como a razão entre a porcentagem de material retido na maior peneira e a soma das porcentagens retidas nas demais peneiras FAD, respectivamente (equação 8).

$$G = \frac{P_{ret(maior\#FAD)}}{P_{ret(demais\#FAD)}} \quad (8)$$

onde:

$G$  – proporção graúda dominante;

$P_{ret(maior\#FAD)}$  – porcentagem de material retido na maior peneira FAD;

$P_{ret(demais\#FAD)}$  – soma das porcentagens retidas nas demais peneiras FAD.

O terceiro índice,  $\kappa$ , qualifica a mistura asfáltica associada à resistência a deformação permanente/formação de trilha de roda. É uma combinação dos parâmetros de graduação ( $\alpha$  e  $C$ ), teor e viscosidade do ligante (equação 9).

$$k = \frac{L}{1 + e^{\left[\frac{\mu}{L} \left(\frac{1}{\alpha} + G\right)\right]}} \quad (9)$$

onde:

$\mu$  – viscosidade rotacional do ligante a 135°C;

$L$  – teor de ligante da mistura asfáltica;

$\alpha$  – proporção de agregados não estruturais;

$G$  – proporção graúda dominante.

### 2.2.3. Misturas asfálticas – referência e alternativa

A mistura M0 (referência), projetada de acordo com dosagem Marshall, caracteriza uma das formulações tradicionalmente implementadas em obras da pavimentação manauara. Foi reconstituída usando o compactador giratório, e de acordo com a dosagem Marshall, projetada pela própria usina que a fabricou e aplicou.

Com o propósito de melhorar o desempenho quanto à deformação permanente, pela interferência de um melhor intertravamento dos agregados e, portanto, um aumento do atrito interno, investigou-se uma composição alternativa, M1. Para integrar essa formulação selecionaram-se dois agregados, brita 0 e pó de pedra, cuja dosagem acompanhou:

- Indicações para a composição granulométrica considerando o Método Bailey e verificação pela Faixa de Agregados Dominantes (FAD);
- Enquadramento da granulometria na faixa Superpave;
- Confecção dos corpos de prova por amassamento, tendo sido selecionando o número de giros para tráfego médio a alto (DNIT 178/2018 ME);

- d) Determinação da Gmm – densidade máxima da mistura solta (DNIT 427/2020) pelo *Rice test*, com vista ao cálculo mais preciso do volume de vazios;
- f) Critério volumétrico Superpave para o cálculo do teor de ligante.

Na determinação do teor de ligante de projeto realizou-se a compactação de 3 corpos de provas (CPs) no teor inicial previsto, e nos teores  $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1,0\%$  do valor inicial. Também se mediu, para cada teor, a massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) da mistura não compactada. Destaca-se que, previamente à compactação, as composições foram envelhecidas em estufa durante o tempo de duas horas. Enfatiza-se igualmente que se projetou a formulação M1 para atender um tráfego médio a alto. Deste modo, compactaram-se os corpos de prova com número de giros igual a 100.

A partir dos valores das densidades aparentes dos CPs, e da Gmm, calcularam-se os parâmetros volumétricos: Volume de vazios (Vv), Volume de Vazios no agregado mineral (VAM) e a relação betume-vazios (RBV). Estabeleceu-se o teor de ligante de projeto para o volume de vazios igual a 4%, e, na sequência, determinaram-se e verificaram-se os demais parâmetros.

#### 2.2.4. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Examinou-se o comportamento das misturas asfálticas pelos seguintes ensaios: Índice de Densificação na Compactação (CDI) e Índice de Densificação pelo Tráfego (TDI) – DNIT 426/2020; Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) – DNIT 136/2018; Ensaio Uniaxial de Carga Repetida, *Flow Number* (FN) – DNIT 184/2018; e Dano por Umidade Induzida (DUI) – DNIT 180/2019.

Confeccionaram-se os corpos de prova destinados aos citados experimentos e no projeto de dosagem usando o compactador giratório, em conformidade com os procedimentos indicados na norma DNIT 178/2018 – PRO. No processo de produção dessas amostras, as temperaturas de usinagem e compactação foram iguais a 165 °C e 145 °C, respectivamente.

##### 2.2.4.1. Ensaio uniaxial de carga repetida – *flow number*

Destinados ao ensaio uniaxial de carga repetida moldaram-se corpos de prova com diâmetro de 100 mm e altura igual a 150 mm. O cálculo da deformação plástica específica, equações 10 e 11, acompanharam a prescrição da norma DNIT 184/2018 – ME.

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\Delta L_{pi}}{H_{ri}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi}}{NS} \quad (11)$$

onde:

$\varepsilon_{pi}$  – deformação plástica vertical uniaxial no LVDT i, em micro-deformações;

$\Delta L_{pi}$  – deslocamento plástico vertical uniaxial no LVDT i, em milímetros (mm);

$H_{ri}$  – altura de referência da medida do deslocamento plástico vertical uniaxial no LVDT i, em milímetros (mm);

$\varepsilon_p$  – deformação plástica vertical uniaxial, em micro deformações;

NS – número de sensores.

Adotou-se o modelo de potência mencionado no trabalho de WITCZAK *et al.* [15] para representar o acúmulo da deformação permanente com o número de ciclos. Enfatiza-se que, os parâmetros A e B (equação 12 e Figura1) são derivados da porção linear (zona secundária). Tais constantes ignoram a zona terciária de deformabilidade do material e são dependentes das condições de combinação de tensão, temperatura do ensaio e do material.

$$\varepsilon = AN^B \quad (12)$$

onde:

A – deformação permanente no ciclo  $N = 1$ ;

B – taxa de variação da deformação permanente em função da variação nos ciclos de carregamento.

Analisou-se igualmente a taxa de deformação na zona secundária, definida como “ $\alpha$ ”, a partir de uma função linear, equivalente à declividade da reta na citada zona (Figura 1), em conformidade com a expressão 13.

$$\alpha = \frac{\epsilon_{pFN} - \epsilon_{pN_{Sec}}}{FN - N_{Sec}} \tag{13}$$

onde:

$\epsilon_{pFN}$  – deformação plástica específica indicativa do ciclo de FN;

$\epsilon_{pN_{Sec}}$  – deformação plástica específica referente ao ciclo na região secundária;

FN – número do ciclo de *flow number*;

$N_{Sec}$  – número do ciclo alusiva à região secundária, determinado visualmente no gráfico, cujos eixos são plotados no modo linear.

### 2.2.4.2. Índice de Densificação na Compactação (CDI) e Índice de Densificação pelo Tráfego (TDI)

O Índice de Densificação na Compactação (CDI) está relacionado à energia necessária para compactar a mistura asfáltica em campo durante a construção, com respeito a trabalhabilidade e capacidade de resistir à deformação permanente [34]. Define-se como a área a partir do oitavo giro (N = 8) até 92% da Gmm na curva de densificação obtida com o compactador giratório Superpave.

Consoante ao Índice de Densificação pelo Tráfego – TDI, este é associado à energia do tráfego de veículos necessária para a compactação da mistura asfáltica até atingir 98% da Gmm, com vista a capacidade do material resistir à deformação permanente pelo esforço transmitido pelo tráfego [34].

Específico aos parâmetros mencionados, a avaliação do tráfego mediante o conjunto dos parâmetros (CDI, TDI, FN) não constam em normas, porém tem-se o estudo de NASCIMENTO [21] que sugeriu os seguintes requisitos para evitar o surgimento de afundamento de trilha de roda, baseado em para corpos de prova com 100 mm de diâmetro:

- Tráfego Médio – CDI > 50; TDI > 250 e FN > 300
- Tráfego Pesado – CDI > 50; TDI > 400 e FN > 750

### 2.2.4.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Dano por Umidade Induzida (DUI)

A resistência à tração indireta de corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica obtém-se por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura, sendo prescrito na norma DNIT 136/2018, e calculada equação pela equação 14. O resultado adotado para esse parâmetro considera-se como a

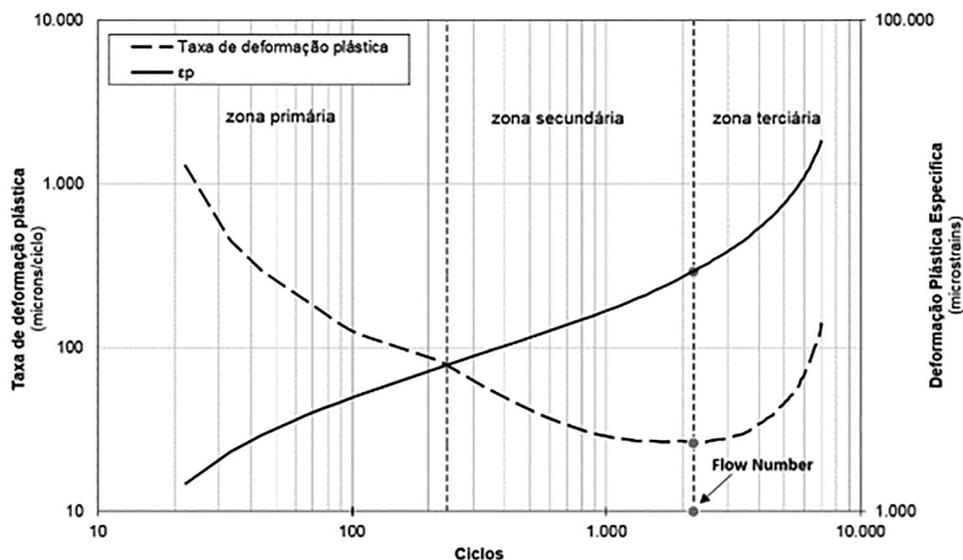


Figura 1: Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida. Fonte: DNIT 184/2018 – ME.

média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de  $\pm 10\%$ .

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (14)$$

Onde:

$\sigma_R$  – resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro de corpo de prova, em mm;

H – altura do corpo de prova (espessura), em mm.

O ensaio de Dano Por Umidade Induzida – DUI avalia a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água, ou seja, o comprometimento das propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Determina-se pela relação entre a resistência à tração por compressão diametral das amostras condicionadas e em condições normais de preparação, respectivamente (equação 15). Foi executado conforme preconizado a norma DNIT 180/2019. O processo de condicionamento consiste em saturar os corpos de provas em água destilada, e, posteriormente submetê-los ao resfriamento em temperatura de  $-18,0 \pm 3,0$  °C, durante 16 horas. A seguir, tais amostras são imersas em água sob temperatura de 60°C por 24 h  $\pm$  1 h. Na sequência, são submersos em um banho de água a 25 °C  $\pm$  1 °C, por duas horas. Finalmente, ensaiam-se tais corpos de prova quanto a resistência à tração por compressão diametral.

$$RRT = \frac{RT_C}{RT} \times 100\% \quad (15)$$

onde,

RRT – resistência a tração retida

$RT_C$  – resistência à tração por compressão diametral do primeiro conjunto, submetido ao condicionamento, sendo a média da resistência à tração proveniente dos dados de três corpos de prova.

RT – resistência à tração por compressão diametral do segundo conjunto, sem condicionamento, cuja a média da resistência à tração resultou dos valores de três corpos de prova.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. Ligante asfáltico

Os resultados contidos no certificado de ensaio N° 0450-17 G, fornecido pela REMAN, sobre o ligante asfáltico, mostram que atendem aos requisitos da especificação brasileira correspondente ao cimento asfáltico de petróleo (ANP, 2005), e o classifica como CAP 50-70. Esse material, baseado na metodologia SUPERPAVE – ASTM D6373/2016, indicou: a) PG 64-22 – adequado para tráfego padrão e regiões com temperatura máxima de pavimento até 64 °C. Esta temperatura é inferior, em 1°C, da temperatura máxima igual a 65 °C. Tal valor máximo foi determinado usando a conceituação descrita em *High Pavement Temperature Model With Reliability* (1998) e considerando dados referente a latitude ( $-3,107^\circ$ ) e a média de temperaturas máximas dos sete dias mais quentes de ano 2015 – INMET, desde 1925 (37,7 °C); b) PG 67,1-27,4 – pertinente ao tráfego padrão e regiões com temperatura máxima de pavimento até 67,1°C. Valor superior à temperatura máxima referida aos pavimentos urbanos regionais; e c) O ensaio de Fluência e recuperação sob tensão múltipla (*Multiple Stress Creep Recovery – MSCR*) indicou PG 64S – correspondente ao tráfego padrão, e regiões com temperatura máxima de pavimento até 64°C. A partir dessas classificações, sugere-se que este CAP seja utilizado nas vias construídas na cidade de Manaus que apresentem tráfego padrão, ou seja, *single axle loading* (ESAL) < 10 milhões.

##### 3.1.2. Agregados

A Tabela 1 mostra os dados laboratoriais concernentes aos agregados graúdos, miúdo e pó de pedra. Ressalta-se que, os resultados de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035, 1998) e adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 078, 1994), foram concedidos pela empresa EBAM. Nota-se na mencionada tabela, alusivo aos

materiais graúdos, semelhantes valores da massa específica real com referência a brita 1, pó de pedra e areia, e resultado ligeiramente superior para a brita 0, embora seja de mesma procedência dos demais agregados. Além disso, assinala-se a baixa absorção evidenciada pela brita 0 e brita 1. Concernente aos agregados miúdos, o parâmetro equivalente areia atendeu aos requisitos seja da metodologia *Superpave*, mínimo igual a 45%, ou da especificação DNIT ES 031-06, igual ou superior a 55%.

Na Figura 2 tem-se que a brita 0 e a brita 1 apresentaram graduação uniforme de tamanho correspondente à fração pedregulho, e o pó de pedra classificado como bem graduado, contendo frações areia e pedregulho. A areia natural evidenciou frações correspondentes a uma areia fina, média a grossa.

### 3.2. Misturas asfálticas referência M0 e alternativa M1

Os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica M0, referência, como também aqueles alusivos à formulação alternativa, mistura M1, são apresentados na Tabela 2. Observa-se que, a composição M0 segue todos as condições da norma DNIT 031/2006-ES. Porém, quanto aos requisitos *Superpave*, atende parcialmente, porquanto o resultado do volume de vazios é inferior a 4%. Por outro lado, a mistura M1 satisfaz o recomendado pela metodologia do *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Nota-se também que, essa formulação difere da composição M0 somente na estrutura granulométrica, tendo suas proporções balizadas pelo procedimento Bailey e pela Faixa de Agregados Dominantes (FAD). Os dados de entrada para implementação da sistemática Bailey constam na Tabela 3. Na Tabela 4 encontram-se os resultados dos demais parâmetros determinados e de acordo com os critérios da AASHTO M 323/2013.

Na Figura 3 e Tabela 4 evidenciam-se as características finais das composições estudadas, a referência M0 e a alternativa M1, alusivas as granulométricas e a dosagem. Em particular, na Figura 3 assinala-se o enquadramento dessas formulações nas faixas C/DNIT e 12,5/*Superpave*. Igualmente registra-se que a curva granulométrica M1 delineou um formato “S”, tendo parte de sua composição localizada acima da linha de máxima densidade e a outra abaixo desta referência, e a mistura M0 situou-se acima da linha de máxima densidade. Nota-se ainda que, a mistura padrão possui granulometria mais fina relativa à composição M1, bem como situa-se acima da linha de máxima densidade.

Tabela 1: Caracterização dos agregados.

ENSAIO	BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	AREIA
Massa Esp. Aparente (g/cm³) (DNER-ME 413/2019)	2,621	2,671	–	–
Massa Esp. Real (g/cm³) (DNIT-ME 413/2019; DNIT-ME 411/2019)	2,650	2,778	2,653	2,651
Absorção (%) (DNIT-ME 413/2019)	0,4%	1,4%	–	–
Equivalente Areia (%) (DNER-ME 054/97)	–	–	56%	72%
Massa Específica Solta (kg/m³) (ASTM C29)	1.441,67	1.453,1	–	–
Massa Específica Compactada (kg/m³) (ASTM C29)	1.550,5	1.553,4	1.350,1	1.248,5
Abrãso Los Angeles (%) (NBR-NM51:01)	12%	9%	–	–

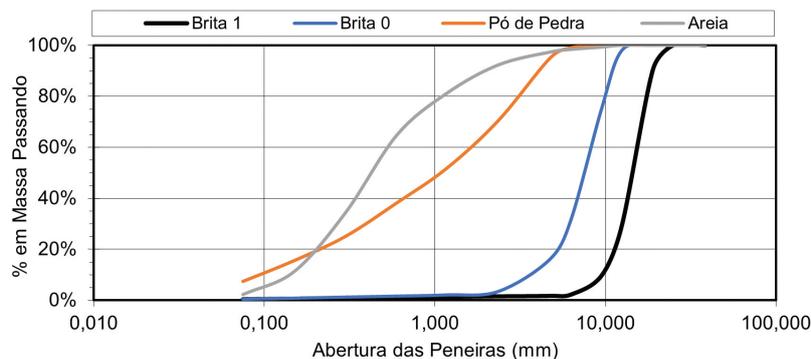


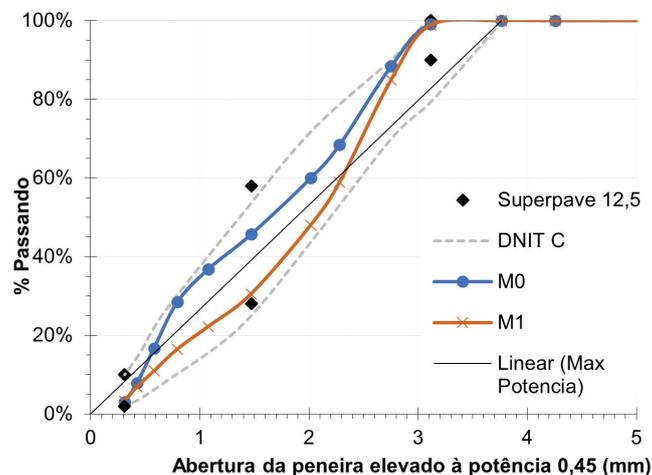
Figura 2: Curva granulométrica dos agregados graúdos e finos.

**Tabela 2:** Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas.

	MARSHALL	COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE		
	REQUISITOS DNIT (DNIT 031/2006 – ES)	M0	M1	REQUISITOS SUPERPAVE (AASTHO 323-13) NMS = 12,5MM
Teor (%)	–	5,00	4,60	–
Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	–	2,487	2,526	–
Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	–	2,625	2,629	–
MEA (g/cm <sup>3</sup> )	–	2,395	2,424	–
Vv (%)	3 a 5	3,6	4,0	4,0
VCB (%)	–	12,0	11,2	–
VAM (%)	15 min	15,7	15,2	>14
RBV (%)	75 a 82	76	73,6	65–75
%G <sub>mm</sub> @N <sub>inicial</sub> = 8 (%)	–	–	86	<89
%G <sub>mm</sub> @N <sub>máximo</sub> = 205 (%)	–	–	97%	<98%

**Tabela 3:** Dados de entrada para efetivação da metodologia Bailey.

ENSAIO	BRITA 0	PÓ DE PEDRA
Massa específica solta (MES), kg/m <sup>3</sup>	1.434	–
Massa específica compactada (MEC), kg/m <sup>3</sup>	1.508	1.350
Massa específica aparente (MEA), g/cm <sup>3</sup>	2,671	2,569
Massa específica escolhida (MEE)	0,95	–
Percentual por volume	1	1
Resultado	60%	40%
Massa específica solta (MES), kg/m <sup>3</sup>	1.434	–


**Figura 3:** Curva granulométrica, TNM =12,5 – misturas M0 e M1.

**Tabela 4:** Dosagem final das misturas asfálticas M0 e M1.

	DOSAGEM	CAMADA	LIGANTE	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	AREIA
M0	Marshall	Rolamento	5,0%	43%	28%	24%
M1	Superpave	Rolamento	4,6%	57%	38,4%	–

Ademais salienta-se que, na mistura alternativa, a utilização da ferramenta Bailey permitiu um maior contato grão a grão do agregado graúdo, visto que a areia natural foi excluída, acarretando numa redução dos grãos miúdos na composição geral da mistura, por conseguinte aumentou-se o intertravamento e o atrito interno. Além disso, a seleção do teor de ligante usando a densidade máxima da mistura solta, considerando a absorção de ligante pelos agregados, concomitante à utilização do compactador giratório Superpave, suscitou na redução no teor de ligante relativo à mistura de referência. Tais procedimentos usualmente conduzem a um teor de ligante inferior ao determinado pelo método Marshall.

Em síntese, a mistura M1 alternativa, respeitante à formulação referência, resultou em um forte esqueleto pétreo, contempla maior quantidade de partículas com maior diâmetro (Brita 0), não contém areia natural em sua composição, e ainda, apresentou uma redução de 0,4% de CAP em relação a M0, gerando uma economia na produção da mistura asfáltica, visto que o ligante asfáltico é o seu componente mais oneroso. Infere-se se igualmente que, as citadas características, alusivas ao esqueleto pétreo, aliadas ao teor de ligante mais adequado favorecem a um melhor desempenho no tocante a deformação permanente.

### 3.2.1. Avaliação das granulometrias resultantes pelo método Bailey

De acordo com o método Bailey (AASHTO M323/2013), classificaram-se as misturas a partir da granulometria. Assim, a composição M0 tipificou-se como fina, pois detém 45,7% das suas partículas passando na PCP, indicando que o esqueleto pétreo é formado pelo contato dos grãos da fração fina. Diferente dessa formulação referência, a mistura M1 projetada pelo método Bailey, resultou como graduação graúda com 30,5% passando pela PCP, ou seja, com um esqueleto pétreo constituído com maior contato de agregados graúdos.

Os parâmetros AG,  $G_{AF}$ ,  $F_{AF}$ , presentes na metodologia Bailey, mostram o comportamento das misturas quanto ao intertravamento, suscetibilidade à segregação e facilidade/dificuldade de compactação. A Tabela 5 apresenta os resultados desses parâmetros em conformidade com os intervalos recomendados por VAVRIK *et al.* [6].

Em particular, a relação AG examina o intertravamento da parte graúda na estrutura mineral e, portanto, verifica a estrutura de vazios, sendo considerado um fator importante no processo construtivo. As misturas com baixo valor de AG costumam ter a tendência à segregação [6]. Em contrapartida, composições com o valor de AG acima do limite podem mostrarem-se de difícil compactação em campo [6], tal como demonstra o resultado da Mistura alternativa M1.

Consoante VAVRIK *et al.* [6], a porção grossa do agregado fino, representado pelo parâmetro  $G_{AF}$ , cria vazios que são preenchidos com a porção fina desse tipo de agregado. Tal como acontece com o agregado grosso, é desejável preencher esses vazios com um volume apropriado da parcela fina do agregado fino. Da mesma forma deve-se evitar valores superiores a 0,50, por exemplo, quando se tem uma quantidade excessiva de areia natural e/ou uma areia natural excessivamente fina. Tais evidências identificam um valor nesse limite de 0,50 correspondente a formulação M1, embora esta mistura não seja constituída por areia natural. Também deve ser lembrado que, quando esse parâmetro é menor do que os limites, é indício que a curva granulométrica não seja contínua, geralmente apresentando lacunas em algumas peneiras, e uma “barriga” no gráfico de granulometria Superpave com potência 0,45, o que pode indicar instabilidade, e ainda, levar a problemas de compactação [6]. Nesse contexto, a mistura M0 explicita esse parâmetro suavemente abaixo do especificado.

Específico a porção fina do agregado fino,  $F_{AF}$ , conceitua o preenchimento dos vazios criados pela porção grossa do agregado fino. Igualmente influencia os vazios que permanecerão na parcela do agregado fino da mistura, visto que representa as partículas que preenchem os menores vazios. Baseado nessas observações, tem-se que a composição M1 possui valores dentro dos limites, enquanto a formulação M0 não apresenta este parâmetro, por ser de graduação fina, e o TNM = 12,5 mm.

Em resumo, nota-se que a mistura M1 atendeu ao parâmetro  $F_{AF}$  e quanto aos demais mostrou valores próximos dos limites superiores. Tal dificuldade de enquadrar integralmente todos os parâmetros Bailey, é relatado em outras pesquisas [14, 20]. Enfatiza-se ainda que, embora a mistura alternativa tenha apresentado valor de

**Tabela 5:** Avaliação pelo método de Bailey.

MISTURA	GRADUAÇÃO	AG			Gaf			FAf		
		AG	LIMITE	ANÁLISE	Gaf	LIMITE	ANÁLISE	FAf	LIMITE	ANÁLISE
M0	Miúda	0,9	0,6–1,0	ok	0,3	0,3–0,5	ok	–	–	–
M1	Graúda	0,69	0,5–0,65	x	0,5	0,3–0,5	ok	0,4	0,3–0,5	ok

AG levemente acima do limite, considera-se que ambas as composições atenderam aos parâmetros preconizados pelo método Bailey.

### 3.2.2. Verificação das granulometrias resultantes pelo método FAD

As estruturas granulométricas pelo método FAD presentes no diagrama de interação na Figura 4, contêm quais peneiras compõem a FAD das misturas investigadas, ou seja, o grupo de peneiras que interagem entre si, as proporções relativas dos agregados retido entre as proporções 2,33 e 0,43, assim como os dados de porosidade.

Nota-se pelos resultados que, as formulações M0 e M1 explicitam interações entre os mesmos grupos de peneiras, 9,5 – 6,25 e 4,75 – 2,36 – 1,18. Representativo da porosidade, o conjunto das composições asfálticas resultaram valor entre 38 e 48%, que expressam a tendência de melhor intertravamento de agregados e boa resistência à deformação permanente [13]. Ainda examinando a porosidade, o intervalo de valores entre 48 e 52%, designado como porosidade marginal, que estima a resistência à deformação permanente, mostra-se variável segundo KIM *et al.* [9]. Resultado apontado apenas pela formulação M1 (porosidade = 49%). Enfatiza-se, neste contexto, a mistura referência não tem indicação bom desempenho.

Em semelhante pesquisa FERREIRA, SOARES E BASTOS [13] realizaram um estudo sobre a porosidade FAD em diferentes misturas asfálticas. Observaram que, as composições com altos valores desse parâmetro (acima de 70%) possuíam baixos valores de FN. Esse trabalho igualmente corroborou que as formulações que mostram a porosidade FAD na faixa marginal (48 a 52%) realmente apresentavam valores de FN variáveis, oscilando entre 112 e 1.535.

A Tabela 6 exibe os valores de porosidade FAD, bem como os parâmetros  $\alpha$ , G e  $\kappa$  propostos por FERREIRA *et al.* [12], e os valores do *Flow Number* para as misturas M0 e M1. Os autores afirmaram que, maiores valores de  $\kappa$  estão associados a misturas asfálticas menos resistentes à deformação permanente. Desta forma, registra-se que a mistura M1 alcançou menor valor de  $\kappa$ , corroborando o resultado do FN. Segundo os critérios propostos por FERREIRA *et al.* [12], a mistura M0 é adequada para uso em vias com tráfego médio, enquanto a composição M1 é compatível com tráfego intermediário.

Em síntese, a metodologia FAD desconsidera a utilização da mistura M0 em qualquer nível de tráfego (valor do parâmetro N), enquanto a classificação proposta por FERREIRA *et al.* [7] sugere aplicação dessa mistura em vias que possuam o volume de tráfego médio ( $3 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$ ) conforme indicado na Tabela 6.

### 3.2.3. Avaliação dos resultados dos ensaios de desempenho

Na Tabela 7 constam os resultados referentes aos ensaios de desempenho: Índice de Densificação na Compactação (CDI), Índice de Densificação pelo Tráfego (TDI) Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Ensaio Uniaxial de Carga Repetida, *Flow Number* (FN), e Dano por Umidade Induzida (DUI).

#### 3.2.3.1. Índice de Densificação na Compactação, Índice de Densificação pelo Tráfego, Resistência à Tração e Dano por Umidade Induzida

Na Tabela 7 observa-se valor extremamente baixo do Índice de Densificação na Compactação (CDI) da composição referência, embora tenha atingido o valor do Índice de Densificação pelo Tráfego (TDI) indicado para tráfego pesado. Tal resultado pode estar associado ao uso do método Marshall de dosagem. A outra formulação, a mistura alternativa, obteve maiores valores tanto de CDI (146) quanto de TDI (542), e ambos compatíveis para utilização em tráfego pesado.

Concernente resistência à tração indireta (RT), as duas misturas atingiram valores acima do limite mínimo de 0,65 MPa indicado pela especificação DNIT 031/2004-ES. Individualmente a composição M0 alcançou valor ligeiramente superior ao resultado da composição alternativa.

Consoante ao dano por umidade induzida (DUI), a mistura M0, mesmo contendo areia, apresentou valor da resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) igual 77%, logo, descartando a necessidade de uso de

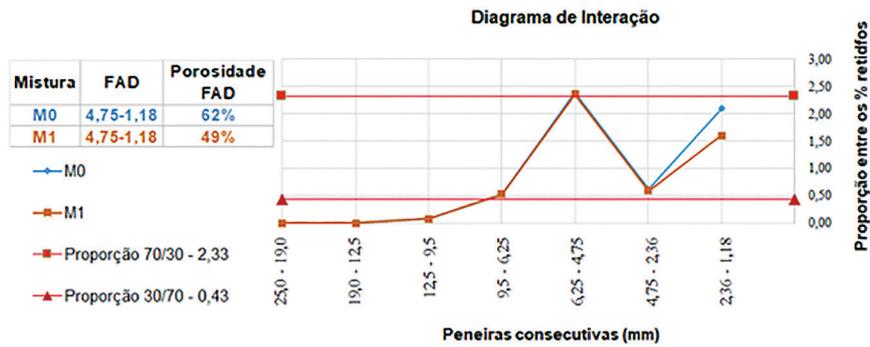


Figura 4: Diagrama de interação, faixa de agregados dominantes, porosidade FAD.

Tabela 6: Parâmetros da estrutura pétreo e Índice estrutural da mistura asfáltica.

	POROSIDADE FAD	PROPORÇÃO $\alpha$	G	$\kappa$	CRITÉRIOS PROPOSTOS POR FERREIRA <i>et al.</i> [12] EM FUNÇÃO DO TRÁFEGO “N*”		FN
					$k < 2,5$	$3 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$ (médio)	
M0	62%	0,5	0,37	2,2	$k < 2,5$	$3 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$ (médio)	308,0
M1	49%	0,4	0,42	2,0	$k < 2,0$	$1 \times 10^7 < N \leq 3 \times 10^7$ (intermediário)	1208,0

\* N é o número de repetições (ou operações) dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante o período considerado de vida útil do pavimento.

Tabela 7: Dados de desempenho das misturas M0 e M1.

MISTURA	M0	M1
CDI	3	146
TDI	485	542
RT (MPa)	1,4	1,2
Flow Number – FN	300	1.000
Classificação MeDiNa – FN	3	4
Dano por umidade induzida – RRT	77%	–

melhoradores de adesividade. Este ensaio não se realizou para a formulação M1, posto que os materiais formadores dessa mistura são os mesmos integrantes da composição referência.

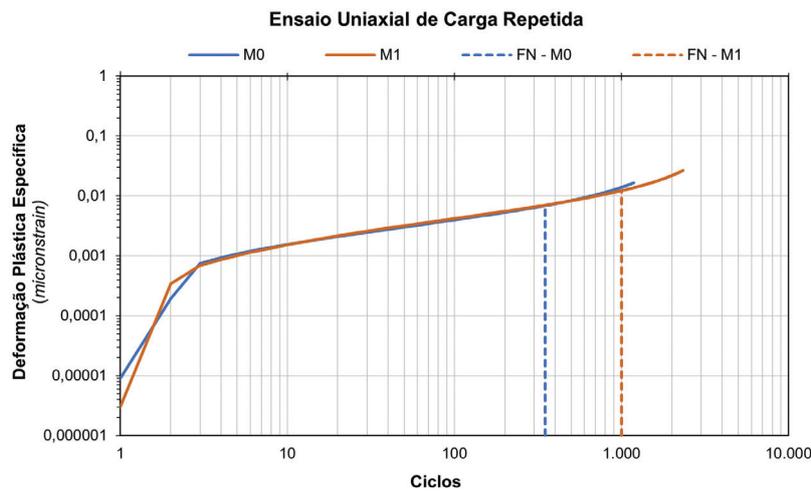
### 3.2.3.2. Ensaio uniaxial de carga repetida

Na avaliação de desempenho pelo ensaio uniaxial de carga repetida analisaram-se: os valores de FN; os parâmetros A e B, determinados a partir da análise de regressão de uma função potencial aplicada à região linear da deformação permanente versus número de ciclos (equação 11 e Figura 1); e a inclinação da reta ( $\alpha$ ), dado pela função linear referente à região secundária da curva (Figura 1), descrito na equação 12. Tais resultados constam na Tabela 8 e Figura 5.

As curvas das misturas M0 e M1, presentes na Figura 5, mostram que a composição M1 alcançou FN igual a 1.000, ou seja, superior ao valor, igual a 300, correspondente ao da formulação referência M0. Desta forma, assinalando melhor desempenho quanto à deformação permanente. Contudo, nota-se que, as curvas se sobrepõem na zona secundária, e apenas no ciclo igual a 600 começam a se diferenciar. Assim, porque mostram-se sobrepostas admite-se desempenho semelhante na região secundária. Entretanto, pelos citados valores de FN, pode-se esperar que a mistura referência venha a falhar primeiro relativo à composição alternativa.

**Tabela 8:** Parâmetros do ensaio uniaxial de carga repetida.

	$N_{SEC}$	$\epsilon p_{Nsec}$	FN	$\epsilon p_{FN}$	$\alpha$	A	B
M0	200	0,0053	350	0,0069	1,0E-05	0,0006	0,4171
	200	0,0069	250	0,0078	1,7E-05	0,0907	0,4418
			300		1,4E-05	0,0457	0,4295
M1	500	0,0083	1.000	0,0120	7,4E-06	0,0050	0,4531
	500	0,0089	950	0,0117	6,2E-06	0,1457	0,3323
			975		6,8E-06	0,0754	0,3927



**Figura 5:** Curvas do ensaio Flow Number para as misturas asfálticas M0 e M1.

O intertravamento dos agregados e suas características (forma, tamanho, angularidade e textura) foram apontados na literatura [4] como os maiores responsáveis pela resistência quanto à deformação permanente. Tal intertravamento foi alcançada nessa investigação pelas metodologias usadas, posto que, os agregados participantes das formulações asfálticas tinham mesma origem geológica e foram processados pela mesma empresa de pavimentação.

Isto posto, infere-se que um forte esqueleto pétreo aliado ao teor de ligante adequado favoreceram o excelente desempenho da mistura alternativa [6, 8, 11], ressaltando que não foi realizada modificação no ligante asfáltico. Por conseguinte, a seleção da composição granulométrica mostra-se uma importante etapa no projeto da mistura asfáltica.

Observa-se ainda na Tabela 8, que quanto menor taxa de deformação na zona secundária ( $\alpha$ ), maior o valor de FN. Em contrapartida, não se constata relação direta entre os parâmetros A e B e o FN. Por outro lado, FACCIN *et al.* [16] verificaram em sua pesquisa uma grande variação do parâmetro Flow Number, com resultados entre 37 a 10.000 ciclos, sem atingir FN, nas misturas aplicadas nos pavimentos rodoviários no Estado do RS. Além disso, o parâmetro FN foi considerado como critério adequado para avaliação da formação de trilha de rodas em misturas a quente, pois, apresentou, em geral, boa correspondência com o resultado de campo [16].

A Tabela 9 evidencia critérios para FN mínimo em função do volume de tráfego, em que se depreende que NASCIMENTO [21] recomenda menores valores considerando os mesmos níveis de tráfego relativo ao trabalho de BASTOS, *et al.* [22]. Observando o gráfico da Figura 5 e a investigação de NASCIMENTO [21], as misturas asfálticas M0 e M1 atendem ao nível de tráfego pesado e extremamente pesado, respectivamente.

No novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNIT, MeDiNa, os valores de FN mínimos a serem atendidos pelos concretos asfálticos são indicados na Tabela 10. De acordo com DNIT, (2018) o citado programa gera duas curvas, definindo um número interpolado para cada número de repetições de carga

**Tabela 9:** Critérios de FN mínimo para diferentes níveis de tráfego, Tensão 204 kPa e Vv de 5 a 7 %.

REFERÊNCIA	TEMP (°C)	LEVE	MÉDIO	PESADO	EXTREMAMENTE PESADO
		$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$>3 \times 10^7$
NASCIMENTO [21]	60	–	100	300	>1000
BASTOS, <i>et al.</i> [22]	60	–	300	750	–

**Fonte:** Adaptado de BASTOS, *et al.* [22].

**Tabela 10:** Critérios de FN mínimo para diferentes níveis de tráfego adotados pelo método MeDiNa.

CLASSE	FLOW NUMBER (FN)	N RECOMENDADO CONDIÇÕES NORMAIS	N RECOMENDADO CONDIÇÕES SEVERAS	CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS DESTA PESQUISA	DNIT
3	$300 \text{ ciclos} \leq \text{FN} < 750 \text{ ciclos}$	$1e7 \leq N < 1e8$	$1e6 \leq N < 1e7$	M0	Pesado
4	$750 \text{ ciclos} \leq \text{FN} < 2000 \text{ ciclos}$	$N \geq 1e8$	$1e7 \leq N < 1e8$	M1	Extremamente Pesado

**Fonte:** Manual do MeDiNa (DNIT, 2018), adaptado.

(N), visando eliminar a descontinuidade do FN, ao longo do N (Recomendado para Condições Normais e para Condições Severas).

A Tabela 10 também apresenta a tipificação das misturas asfálticas pesquisadas, alcançando as diversas classificações do MeDiNa para deformação permanente, no intervalo de 1 a 5. Assim, a composição referência M0 resultou no valor 3, adequada para ser utilizada em condições normais e tráfego pesado ( $10^7 \leq N < 10^8$ ), bem como para condições severas e volume de tráfego médio ( $10^6 \leq N < 10^7$ ). Já a mistura asfáltica (M1) proposta, alcançou a classificação 4, podendo ser aplicada em condições normais e volumes de tráfego extremamente pesado ( $N \geq 10^8$ ), ou no caso de condições severas e volumes de tráfego pesado ( $10^7 \leq N < 10^8$ ). Ressalta-se que essa excelente classificação da composição alternativa decorre da alteração das diferenciais características, alteração da estrutura pétreo e do teor de ligante, não presentes na formulação referência.

Em síntese, a classificação proposta por FERREIRA *et al.* [12] relativa ao Fator K corrobora com os resultados do Flow Number, assim como, se aproxima das classificações do método Medina. Considerando ainda que, no cálculo do fator K foram incluídos os dados do teor e da viscosidade do ligante sugere-se esse parâmetro como uma importante ferramenta no projeto de misturas asfálticas, ou seja, na avaliação dessas composições quanto suscetibilidade a deformação permanente, notadamente anterior a realização dos ensaios de desempenho. Por outro lado, sublinha-se que a metodologia FAD descartou misturas consideradas adequadas para aplicação em tráfego pesado (classe 3) em conformidade com o método MeDiNa.

#### 4. CONCLUSÕES

A mistura M1 foi proposta nesta pesquisa almejando aumentar o atrito interno e o intertravamento da mistura, dessa forma utilizou-se o método de Bailey, referenciado como boa ferramenta para compor um forte esqueleto pétreo com menor suscetibilidade quanto a deformação permanente. Obteve-se, então, maior contato grão a grão do agregado graúdo, cuja curva granulométrica delineou um formato “S”, tendo parte de sua composição acima e outra abaixo da linha de máxima densidade, respectivamente. Diferenciando-se da outra formulação cuja curva se posicionou totalmente acima da linha de máxima densidade, contendo areia e a predominância de agregados miúdos.

Nesse contexto, o método Bailey indicou que as misturas M0 e M1 distinguem-se por terem esqueleto pétreo de graduação miúda e graúda, respectivamente. Realça-se que, a citada metodologia mostrou-se como uma adequada ferramenta para análise da composição granulométrica, embora, tenha havido dificuldade em enquadrar integralmente todos os parâmetros em cada composição analisada. Por outro lado, o método FAD apontou que formulação M1 apresenta porosidade marginal, enquanto a composição M0 não tem indicação

de bom desempenho. Do mesmo modo, o índice  $\kappa$  também assinalou melhor desempenho para a mistura M1, segundo limites propostos por FERREIRA *et al.* [12], ao passo que a formulação M0 pode ser aplicada em vias com tráfego médio.

Sublinha-se além disso que, a mistura alternativa alcançou excelente desempenho na totalidade dos resultados laboratoriais, assim como atingiu valor de FN igual 1.000. Enfatiza-se que, apenas alterando a granulometria sem modificar o ligante, foi possível gerar uma mistura compatível com alto volume de tráfego pela classificação MeDiNa. Por conseguinte, realça-se a importância da seleção da granulometria no projeto da mistura asfáltica. Em adição, além de apresentar melhor comportamento mecânico quanto a deformação permanente, a mistura M1 apresentou uma economia de 0,4% de CAP, em decorrência da melhor interação dos grãos por meio do método Bailey e da metodologia usada na compactação dos corpos de prova. Por fim, recomenda-se aplicar a mistura projetada M1 em pavimentos com diferentes volumes de tráfego acompanhada de um monitoramento.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prof.<sup>a</sup> Laura Motta e equipe do Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina/COPPE-UFRJ, à Prof.<sup>a</sup> Juceline Bastos do Centro de Tecnologia em ASFALTO DET/UFC, aos diretores Eng. José Otemar e Eng. Alexandre Evangelista da empresa Ardo Construtora e Pavimentação.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALMAALI, Y.A., AL-BUSALTAN, S., “Permanent deformation characteristics of modified thin overlay bitumen mixtures comprising waste polymers”, *Materials Today: Proceedings*, v. 42, pp. 2717–2724, 2021.
- [2] LEANDRO, R.P., SAVASINI, K.V., BERNUCCI, L.L.B., BRANCO, V.T.F.C., “Influência das propriedades de forma da fração graúda do agregado no controle da deformação permanente de misturas asfálticas densas”, *Transportes*, v. 29, n. 2, pp. 2395–2395, 2021.
- [3] KANDHAL, P.S., COOLEY Jr., L.A., “Accelerated laboratory rutting tests: evaluation of the asphalt pavement analyzer”, NCHRP Report n. 508. Washington: National Cooperative Highway Research Program, 2003.
- [4] SOUSA, J. B., CRAUS, J., MONISMITH, C.L., “Summary report on permanent deformation in asphalt concrete”, *SHRP-A/IR-91-104*. Washington: Strategic Highway Research Program, 1991.
- [5] ZHANG, K., XIE, W., ZHAO, Y., “Permanent deformation characteristic of asphalt mixture under coupling effect of moisture, overload and loading frequency”, *Construction and Building Materials*, v. 272, 121985, 2021.
- [6] VAVRIK, W.R., HUBER, G., PINE, W., *et al.*, “Bailey method for gradation selection in HMA mixture design”, *Transportation Research Circular Number E-C044*, 2002. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec044.pdf>
- [7] D’ANTONA, D.M.G., FROTA, C.A., “Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus – AM”, *Polímeros*, v. 21, n. 1, pp. 13–18, 2011.
- [8] GHUZLAN, K.A., BARA’W, A.M., AL-MOMANI, A.S., “Rutting performance of asphalt mixtures with gradations designed using Bailey and conventional Superpave methods”, *Construction and Building Materials*, v. 261, 119941, 2020.
- [9] KIM, S., ROQUE, R., BIRGISSON, B., “Identification and assessment of the Dominant Aggregate Size Range (DASR) of asphalt mixture”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 75, pp. 789–814, 2006.
- [10] KIM, S., ROQUE, R., BIRGISSON, B., *et al.*, “Porosity of the dominant aggregate size range to evaluate coarse aggregate structure of asphalt mixtures”, *Journal of materials in civil engineering*, v. 21, n. 1, pp. 32–39, 2009.
- [11] HORAK, E., SEBAALY, H., MAINA, J.W., *et al.*, “Relationship between Bailey and Dominant Aggregate Size Range methods for optimum aggregate packing and permeability limitation”, In: *Southern African Transport Conference*, Pretoria, 2017.
- [12] FERREIRA, J.L., BABADOPULOS, L.F., BASTOS, *et al.*, “A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection”, *Construction and Building Materials*, v. 236, 117531, 2020.
- [13] FERREIRA, J.L.S., SOARES, J.B., BASTOS, J.B.S., “Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente”, *Transportes*, v. 24, n. 2, pp. 46–52, 2016.

- [14] RODRIGUES, A.L.N., SOARES, F.L., SOARES, J.B., *et al.*, “Influência da forma e dos parâmetros granulométricos no resultado de *Flow Number*”, In: *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, pp. 1778–1789, Camboriú, 2019.
- [15] WITCZAK, M.W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., *et al.*, “Simple Performance Test for Superpave Mix Design”, *NCHRP Report 465*. Washington: National Cooperative Highway Research Program, 2012.
- [16] FACCIN, C., SPECHT, L.P., SCHUSTER, S.L., *et al.*, “Flow Number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes applied in Brazil Southern region”, *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, pp. 1–13, 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1880580>
- [17] BONAQUIST, R., “Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property”, WHRP 12–01. Madison: Wisconsin Highway Research Program, 2012.
- [18] ZHANG, J., ALVAREZ, A.E., LEE, S.I., *et al.*, “Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation”, *Construction and Building Materials*, v. 4, pp. 391–398, 2013.
- [19] WALUBITA, L.F., ZHANG, J., DAS, G., *et al.*, “Comparison of the Hamburg, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation”, In: *91st TRB Annual Meeting*, Washington, 2012.
- [20] BASTOS, J.B.D., *Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- [21] NASCIMENTO, L.A.H., *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [22] BASTOS, J.B.S., SOARES, J.B., NASCIMENTO, L.A.N., “Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo”, *Revista Transportes*, v. 25, n. 2, pp. 19–40, 2017. <https://doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1284>.
- [23] BARROS, L.M., LIMA, C.D.A, NASCIMENTO, L.A.H., *et al.*, “Aspectos dos ensaios de deformação permanente e a perspectiva brasileira para utilização no dimensionamento de pavimentos asfálticos”, In: *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, pp. 1156–1167, Santa Catarina, 2019.
- [24] ALMEIDA JR, P.O., BOEIRA, F.D., SPECHT, L.P., *et al.*, “Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas”, *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 1–15, 2018.
- [25] FRANCO, F.A.C.P., MOTTA, L.M.G, *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.
- [26] LEON, L.P., GAY, D., “Gene expression programming for evaluation of aggregate angularity effects on permanent deformation of asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, v. 211, pp. 470–478, 2019.
- [27] CAVALCANTE, D.G., CRISÓSTOMO, P.H.S., SILVA, L.C.P., *et al.*, “Levantamento visual das patologias na cidade de Manaus-Am Visual Survey of pathologies in city of Manaus-Am”, *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 19, pp. 77–87, 2012.
- [28] SIMAS, L.P., VALENÇA, P.D.M.A., FROTA, C.A., “Análise superficial de revestimentos do tipo areia asfalto no município de Manaus (AM)”, *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v. 9, n. 1, pp. 1–10, 2013.
- [29] COSTA, R.F., FEITOSA, J.R.P., FISCH, G., *et al.*, “Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia”, *Acta Amazônica*, v. 28, n. 4, pp. 395–408, 1998.
- [30] SARGES, R.R., NOGUEIRA, A.C.R., FROTA, *et al.*, “Depósitos argilosos Cenozóicos do Estado do Amazonas: Utilização como Agregados de Argilas Calcinadas para Pavimentações na Região Amazônica”, *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, v. 1, n. 1, pp. 33–49, 2010.
- [31] RIKER, S.R.L., LIMA, F.J.C., MOTTA, M.B., *et al.*, *Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas: escala de integração 1:500.000: estado do Amazonas*. Manaus: Serviço Geológico do Brasil, 2016.

- [32] BENTO, A.H., FROTA, C.A., “Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Manaus em seu Aspecto Ambiental”, In: *4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, pp. 71–77, Rio de Janeiro, 1999.
- [33] MELO, D.M., *Estudo de misturas asfálticas com resíduo de construção e demolição oriundo do município de Manaus-AM*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.
- [34] MAHMOUD, A.F.F., BAHIA, H., “Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures”, *WHRP 05–01*. Madison: Wisconsin Highway Research Program, 2004.