

## O EFEITO DA SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Suyanne Costa Silva

Juceline Batista dos Santos Bastos

Jorge Barbosa Soares

Departamento de Engenharia de Transportes  
Universidade Federal do Ceará

### RESUMO

A deformação permanente é um dos principais defeitos que afeta a vida de serviço dos pavimentos asfálticos. O desempenho das misturas asfálticas em campo quanto a esse defeito está relacionado diretamente ao arranjo dos agregados. Assim, o objetivo deste artigo é investigar o impacto das variações granulométricas no desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas. Para tanto, utilizou-se o método convencional (DNIT) para seleção granulométrica e o método Bailey para análise dessas granulometrias, o método Superpave para dosagem das misturas asfálticas e o ensaio uniaxial de carga repetida para avaliação quanto à deformação permanente de duas misturas. A metodologia Bailey forneceu indícios de que a mistura asfáltica de granulometria graúda é mais resistente à deformação permanente, verificado pelos resultados do ensaio uniaxial de carga repetida, quando comparada a mistura asfáltica de granulometria fina.

**Palavras-chave:** Agregados, Método Bailey, Deformação Permanente.

### ABSTRACT

Rutting is one of the main distresses that affect the service life of asphalt pavements. The performance of asphalt mixtures in the field and the referred distress are directly related to the arrangement of aggregates within the mix. The objective of this article is to investigate the impact of gradation variation in the performance of asphalt mixtures. The conventional method of gradation selection (DNIT) as well as the Bailey method, along with the Superpave design methodology for mixtures are used. The uniaxial repeated load test is the one used for evaluating the mixture mechanical behavior. The results provided evidence that the asphalt mixture with coarser gradation is more resistant to permanent deformation, when considering the uniaxial repeated load test, in comparison to the mixture with finer gradation.

**Key-words:** Aggregates, Bailey method, Rutting.

## 1. INTRODUÇÃO

Os agregados representam em média 95% do volume total das misturas asfálticas. A granulometria pode ser relacionada com muitos aspectos de desempenho da mistura em campo, como compactação, densificação, permeabilidade, durabilidade e resistência à deformação permanente. No entanto, não é raro que as curvas granulométricas sejam selecionadas empiricamente por meio de procedimentos de tentativa e erro, de modo que atenda as especificações estabelecidas pelo órgão regulador, no Brasil, a especificação de serviço 031/2006 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Convencionalmente, o projetista combina os agregados utilizando porcentagens típicas que foram desenvolvidas a partir de experiências práticas. Como resultado, a seleção granulométrica realizada de forma empírica tem concebido, frequentemente, misturas suscetíveis a danos.

A metodologia Superpave ressalta a importância de se estudar as características dos agregados, inclusive o efeito da granulometria, mas não dispõe de procedimentos acurados para seleção e avaliação granulométrica. Os procedimentos desta metodologia se limitam a pontos de controle e a zona de restrição (Cominsky *et al.*, 1994).

O método Bailey pode ser uma ferramenta útil para analisar e selecionar sistematicamente

granulometrias que visam um melhor desempenho de misturas asfálticas, pois oferece, de forma simplificada, uma explicação mecânica da estrutura dos agregados e procedimentos de seleção e avaliação de granulometrias. A metodologia Bailey se baseia no arranjo das partículas a fim de formar uma matriz de agregados resistente através do intertravamento máximo das partículas obtido pela distribuição das partículas por tamanho.

O objetivo desta pesquisa é analisar o desempenho de duas misturas asfálticas quanto à deformação permanente, por meio do método Bailey e do ensaio uniaxial de carga repetida.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Deformação Permanente

A deformação permanente também chamada de afundamento de trilha de roda, apesar de ser indesejada, é o defeito estrutural mais comum nos pavimentos asfálticos do Brasil (Guimarães, 2009). Ela é definida como o acúmulo de pequenas quantidades de deformação não recuperável, resultantes da aplicação das cargas dos veículos. Esse defeito cria uma perda de capacidade de drenagem do pavimento, resultando em danos causados pela água. Além disso, o pavimento torna-se susceptível a fissuração por fadiga como resultado do afinamento da estrutura sob a trilha da roda. Considerações graves de segurança também surgem como resultado da acumulação de água nos afundamentos de trilha de roda. Esse defeito pode ser atribuído ao revestimento, às camadas subjacentes, ao subleito ou ainda à combinação de defeitos em diversas camadas.

O estudo da resistência à deformação permanente de pavimentos asfálticos no Brasil vem se dando em várias frentes: (i) solos e britas por meio do ensaio triaxial de carga repetida (Guimarães, 2009; Ribeiro, 2013); (ii) misturas asfálticas por meio do ensaio uniaxial de carga repetida (Nascimento, 2008; Onofre, 2012; Wargha Filho, 2013; Oliveira, 2013; Borges, 2014; Pazos, 2015), e também do ensaio triaxial de varredura de tensões (Borges, 2014) e ainda por simuladores de laboratório (Fritzen, 2005; Aragão *et al.*, 2007; Nascimento, 2008; Chaves *et al.*, 2013); (iii) o somatório das deformações permanentes acumuladas no subleito, nas camadas granulares e no revestimento asfáltico utilizando simuladores de verdadeira grandeza (Albano, 2005; Fritzen, 2005; Vale, 2008; Victorino, 2008; Moura, 2010). Embora todas as camadas desempenhem algum papel no desenvolvimento desse defeito, a maioria das falhas de deformação permanente tem origem na deformação excessiva do revestimento asfáltico (White *et al.*, 2002).

A deformação permanente nas misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo de material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano nesse material, representado pela formação e pela propagação de microtrincas (Bernucci *et al.*, 2010). Os principais fatores que contribuem para a formação deste defeito são: (i) percentual de ligante asfáltico elevado, (ii) granulometria com alto teor de finos, (iii) ligante asfáltico com consistência baixa para a temperatura da região, (iv) agregados com baixa angularidade, baixa rugosidade e forma esférica, (v) temperaturas elevadas e (vi) compactação insuficiente.

A preocupação com os agregados é uma das características da dosagem Superpave, concebida como produto do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), com o objetivo de melhorar a qualidade e a durabilidade dos revestimentos asfálticos produzidos nos Estados Unidos. No entanto, o maior fruto do SHRP foi relacionado à especificação de ligantes asfálticos. Atualmente, essa especificação é adotada para a dosagem de misturas asfálticas nos Estados

Unidos, sendo continuamente refinada por outros países, incluindo o Brasil (Tonial e Leite, 1995; Motta *et al.*, 1996; Viana *et al.*, 1996; Marques, 2004).

Diversos trabalhos publicados na literatura mostraram que as principais propriedades de agregados minerais que influenciam a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas são: (i) angularidade, (ii) forma e (iii) textura. Sanders e Dukatz (1992) e Stiadly *et al.* (2002) concluíram que agregados com maior angularidade (maior número de faces fraturadas) tendem a compor misturas asfálticas com maior resistência à deformação permanente. Mahmoud e Bahia (2004) mostraram que agregados com textura mais rugosa geram misturas asfálticas com maior resistência à deformação permanente.

Para a *Federal Highway Administration* (FHWA) os agregados respondem por 80% da responsabilidade de prevenir a deformação permanente na mistura asfáltica. Isso mostra a importância de se ter um esqueleto mineral bem dimensionado e de se estudar as propriedades dos agregados minerais. Mostra também a responsabilidade atribuída aos agregados na resistência à deformação permanente se comparado ao ligante asfáltico.

Assim, uma mistura asfáltica resistente à deformação permanente deve combinar as características físicas e químicas dos agregados com um método de seleção granulométrica que permita o intertravamento máximo do esqueleto mineral capaz de absorver um teor de ligante suficiente para manter a estrutura coesa, resistente e estável.

## 2.2. Método Bailey

O Método Bailey foi desenvolvido por Robert Bailey do Departamento de Transportes de Illinois nos EUA como uma forma de combater a deformação permanente de misturas asfálticas, mantendo as características de durabilidade adequadas. O Método Bailey busca, sobretudo, projetar granulometrias de misturas asfálticas com base na distribuição dos agregados por tamanho cuja finalidade é obter um esqueleto mineral resistente através de procedimentos sistemáticos simples (Vavrik *et al.*, 2002).

O método Bailey define como agregados graúdos, partículas que em um determinado volume criam vazios, e agregados miúdos, partículas que preenchem os vazios criados pelos agregados graúdos. A partir dessa definição, mais de único Tamanho Máximo Nominal (TMN) de agregado é necessário para definir graúdos ou miúdos. A divisão entre agregado graúdo depende do TMN da mistura. O TMN será, portanto, a peneira superior a peneira que reter mais do que 10% de agregado (Vavrik *et al.*, 2002).

O método divide os agregados em diferentes tamanhos agrupando-os em porções usando peneiras de tamanhos específicos que separam porções graúdas e miúdas ou finas, e mais finas. A Peneira de Controle Primário (PCP) é a peneira que divide agregados graúdos e miúdos. Os agregados passantes na PCP são denominados miúdos. A partir da quantidade passante na PCP, avalia-se a mistura de agregados como mistura de granulometria graúda ou miúda. Se 49,9% ou menos passa na PCP a mistura é considerada graúda. Se 50% ou mais passa na PCP a mistura é considerada miúda. Os agregados graúdos são divididos em porções de partículas pequenas e grandes pela peneira média (PM), as partículas pequenas são denominadas de “interceptoras” e as partículas grandes são denominadas de “pluggers”. Os agregados miúdos são divididos em uma porção graúda e uma porção fina por meio da Peneira de Controle Secundário (PCS). Por fim, os agregados finos passantes na PCS são

novamente divididos em uma porção graúda e uma porção mais fina esta por meio da Peneira de Controle Terciário (PCT).

As peneiras de controle foram selecionadas para diversos TMN com base na análise espacial dos agregados cuja finalidade é preencher os vazios de cada fração de material da peneira anterior com o material da peneira posterior, sucessivamente (Denneman *et al.*, 2007). A Tabela 1 apresenta as peneiras que devem ser utilizadas de acordo com o tamanho máximo nominal correspondente.

**Tabela 1:** Peneiras de Controle utilizadas na Metodologia Bailey

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

Tamanho Máximo Nominal (TMN) (mm)	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
Peneira Média (PM) (mm)	19,0	12,5	9,5	6,25	4,75	2,36
Peneira de Controle Primário (PCP) (mm)	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Peneira de Controle Secundário (PCS) (mm)	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Peneira de Controle Terciário (PCT) (mm)	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075

Uma granulometria ideal para deformação permanente deve ter o máximo de agregado graúdo para formar um esqueleto resistente e uma quantidade suficiente de agregado fino para preencher os vazios dos agregados graúdos, sem excesso de filer, assegurando a estabilidade da estrutura. Assim para esse arranjo é necessário obter a massa específica dos agregados escolhida (solta e compactada) dos agregados.

A Massa Específica Escolhida (MEE) é uma porcentagem da massa específica solta dos agregados graúdos. Ela aponta o quanto de espaço vazio deve ser preenchido pelo agregado fino, o que influencia diretamente no tipo de mistura e na distribuição da quantidade de agregado em cada fração entre as peneiras de controle (Daniel e Rivera, 2009). A Massa Específica Solta (MES) de um agregado é a quantidade de agregado que preenche um determinado volume sem ser aplicado esforço de compactação (Vavrik *et al.*, 2002). A Massa Específica Compactada (MEC) é quantidade de agregado que preenche um determinado volume com um esforço de compactação específico aplicado (Vavrik *et al.*, 2002).

O método Bailey utiliza essas massas para obter três proporções, o percentual de Agregado Graúdo (AG), o percentual Graúdo no Agregado Miúdo (GAM) e o percentual Fino no Agregado Miúdo (FAM), que ajudam na compreensão e na previsão do comportamento dos agregados na mistura.

A Tabela 2 descreve os quatros principais parâmetros do método Bailey, MEE, AG, GAM, FAM, com equações e limites recomendados pelo método. A Tabela 3 mostra como as alterações percentuais nesses parâmetros influenciam o volume de vazios do agregado mineral (VAM) e o comportamento da mistura. Da Tabela 3, nota-se que se a proporção de AG aumenta, aumenta o VAM. Se a relação de AG é muito baixa, há um excesso de “pluggers” e mesmo que a combinação satisfaça ao VAM, a mistura será susceptível a segregação. Se a relação de AG é próxima ou maior do limite superior, geralmente, ocorrem as curvas em formato de “S” que podem formar misturas difíceis de compactar no campo. Geralmente não se recomenda misturas com proporções de AG acima do limite superior do intervalo correspondente, mas com frequência as misturas selecionadas pela metodologia Bailey possuem as proporções fora do intervalo recomendado pelo método em função dos

parâmetros do próprio método que são influenciados, principalmente, pelas peneiras de controle.

**Tabela 2:** Parâmetros do método Bailey.  
Fonte: Adaptado de Daniel e Rivera (2009).

Parâmetros	Cálculos (%passante nas respectivas peneiras)	Limites recomendados
MEE	Nenhum	<95% → misturas finas 95%-105% → misturas graúdas 110%-125% → misturas SMA
AG	$(PM - PCP) / (100 - PM)$	0,50-0,65 (TMN de 12,5 mm) 0,60-0,75 (TMN de 19,0 mm)
GAM	PCS / PCP	0,35-0,50
FAM	PCT / PCS	0,35-0,50

**Tabela 3:** Efeitos das alterações nos parâmetros do método Bailey na previsão de vazios do agregado mineral e nas características gerais da mistura.

Fonte: Adaptado de Daniel e Rivera (2009) e de Gierhart (2007).

Parâmetros	Mudança no parâmetro	Previsão de VAM	Características gerais da mistura
AG	+0,2	+ 0,5% para + 1,0%	Altos valores: dificulta a compactação. A curva granulométrica tende ao formato “S”. Baixos valores: torna a mistura susceptível a segregação
GAM	+0,05	- 0,5% para - 1,0%	Altos valores: a mistura tende a ser mais deformável e diminui a permeabilidade
FAM	+0,05	- 0,5% para - 1,0%	Altos valores: a mistura tende a ser mais deformável e propensa a exsudação e de menor permeabilidade
MEE (%)	+0,5	+ 0,5% para + 1,0%	-

A literatura (Khosla e Sadasivam, 2005; Zaniewski e Mason, 2006; Denneman *et al.*, 2007; Gierhart, 2007; Cunha, 2009; Daniel e Rivera 2009; Mendes, 2011; Dash, 2013) mostra a importância da utilização do método Bailey para melhorar a qualidade de misturas asfálticas, principalmente, quanto a deformação permanente. No entanto, o método Bailey possui algumas limitações. Essas incluem ausência de procedimentos para avaliar granulometrias que não se enquadram nos critérios do método (AG, GAM, FAM). O método também não fornece meios para comparar misturas de granulometrias graúdas e finas com o propósito de prever mudanças de VAM (Daniel e Rivera, 2009).

Embora haja vários pontos do método que adverte o engenheiro a não esquecer as demais propriedades dos agregados, como tamanho, angularidade, textura e resistência, que afetam o desempenho das misturas, não existem cálculos ou procedimentos que descrevem como incluir essas propriedades. Dependendo das demais propriedades dos agregados, o valor da



porcentagem de vazios do agregado mineral pode ser diferente da porcentagem prevista método (Daniel e Rivera, 2009).

O método não dispõe de procedimentos detalhados para trabalhar com agregado reciclado. O principal motivo é a falta ou a incerteza dos dados de entrada para obtenção das massas específicas aparente, solta e compactada já que há ligante asfáltico presente nos agregados, no caso de material fresado. Devido a isso, o método Bailey recomenda ao projetista usar apenas agregados virgens nos cálculos e ajustar os percentuais dos agregados virgens para os agregados reciclados. No entanto, não menciona como os percentuais do agregado virgem devem ser alterados e como as proporções de agregados finos devem ser incluídas. Novamente, o método de ajuste é deixado para o projetista.

Finalmente, o método para obtenção das massas específicas soltas e compactadas é bastante variável. Não há procedimentos que mensurem o esforço de compactação para condição solta nem a intensidade dos golpes para condição compactada, ficando assim o resultado bastante sensível ao operador.

Portanto, recomenda-se aos engenheiros que utilizam o método Bailey buscar outros projetos que tenham dados similares e comparar os resultados dos cálculos e, principalmente, avaliar os dados com sua própria experiência e fazer um julgamento sensato.

### 2.3. Ensaio Uniaxial de Carga Repetida (*creep* dinâmico)

O ensaio uniaxial de carga repetida é considerado o ensaio mais representativo dentre os ensaios comumente utilizados para avaliar a deformação permanente em misturas asfálticas. Neste ensaio a mistura asfáltica é submetida a um carregamento cíclico de compressão com frequência de 0,1s de carga e 0,9s de descanso. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204kPa no período de 0,1s e de 5,2kPa durante os 0,9s de repouso. As deformações acumuladas são obtidas em função do número de ciclos. O ensaio é realizado à temperatura de 60°C. O ensaio chega ao fim se pelo menos uma das condições forem atingidas: (i) o corpo de prova (CP) romper; (ii) a porcentagem de deformação atingir 2% para CPs não confinados; (iii) após aplicação de 10.000 ciclos de carregamento ao CP. O resultado deste ensaio é o chamado *Flow Number* (FN) que corresponde ao ciclo em que a taxa de deformação plástica do corpo de prova é mínima.

Para rodovias de tráfego médio, visando um adequado desempenho em termos de deformação permanente para a camada de rolamento, recomenda-se um *Flow Number* mínimo de 300 (Nascimento, 2008).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho serão comparadas misturas asfálticas distintas utilizando: a metodologia de dosagem Superpave, seleção granulométrica convencional (granulometria 1 e 2) avaliada através do método Bailey. O ensaio uniaxial de carga repetida é usado como parâmetro para avaliação do comportamento mecânico das misturas quanto à deformação permanente.

### 3.1. Ligante asfáltico

Utilizou-se um ligante asfáltico convencional, classificado como 50/70 e PG 70S-XX (S relativo a *Standard Traffic*, ou seja,  $N < 10$  milhões, e sem classificação na temperatura inferior, uma vez que é usado em clima tropical), oriundo da refinaria Petrobras-Lubnor, em

Fortaleza-CE. Foram realizados os ensaios reológicos conforme a metodologia Superpave e os ensaios empíricos conforme a caracterização convencional.

O teor de projeto de CAP foi definido por meio da metodologia Superpave para um volume de vazios (Vv) de 4%. Dessa forma, a Mistura 1 foi compactada com 100 giros e atingiu um Vv de 4,1%, resultando em 4,3% de ligante asfáltico. Para a Mistura 2, fixou-se o teor de ligante em 4,3%, sendo necessário reduzir o número de giros (80 giros) para atingir o Vv alvo.

### 3.1.1 Ensaios Empíricos

Foram realizados ensaios de caracterização do ligante asfáltico adotado nesta pesquisa, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultados dos Ensaios Empíricos

Propriedade ou parâmetro	NORMAS	CAP	
		INICIAL	RTFOT
Penetração @ 25°C (dmm)	ASTM D5, 2006	59	41
Ponto de amolecimento (°C)	ASTM D36, 2009	50,0	56,0
Índice de susceptibilidade térmica	Read e Whiteoak, 2003	-0,819	-0,276
Perda de massa (%)	ANP, 2005	-0,1307	

### 3.1.2. Ensaios Reológicos

A caracterização reológica foi realizada através do ensaio de viscosidade rotacional, i.e., um viscosímetro Brookfield, modelo DV-II+viscometer, acoplado a um controlador de temperatura Thermosel. As temperaturas de usinagem e de compactação foram obtidas graficamente (ASTM D2493, 2009), com base nas medidas de viscosidade obtidas nas três temperaturas de ensaio (135, 150 e 177°C). A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 5:** Resultados obtidos para a temperatura de Compactação e Usinagem

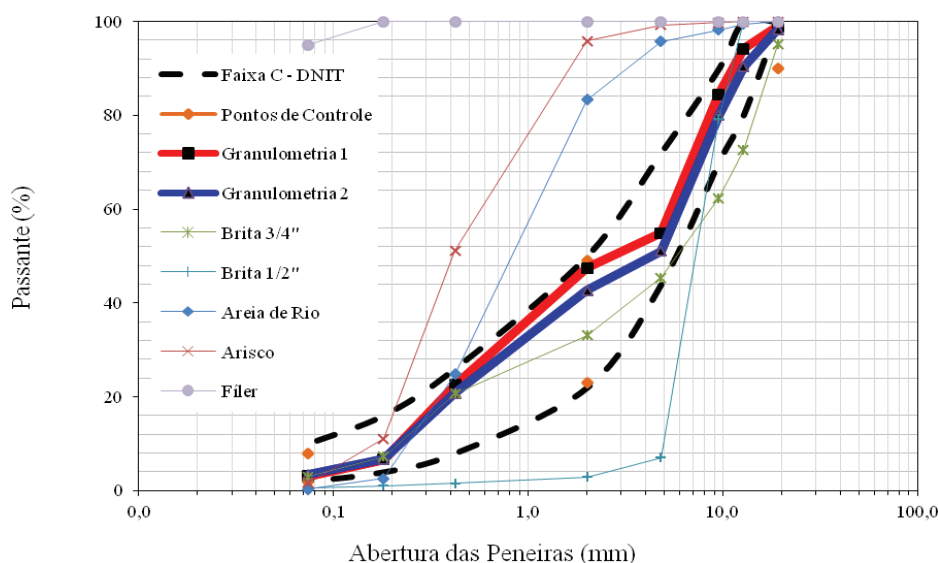
Ligante asfáltico	Temperatura (°C)					
	Compactação			Usinagem		
	Inferior	Superior	Média	Inferior	Superior	Média
CAP	150	155	152,5	163	170	166,5

## 3.2. Agregados

Para caracterização dos agregados foram realizados ensaios normatizados pelo DNIT e AASHTO. As misturas asfálticas estudadas possuem TMN 12,5 mm e os agregados são de origem gnáissica.

### 3.2.1. Caracterização das curvas granulométricas DNIT 031/2006

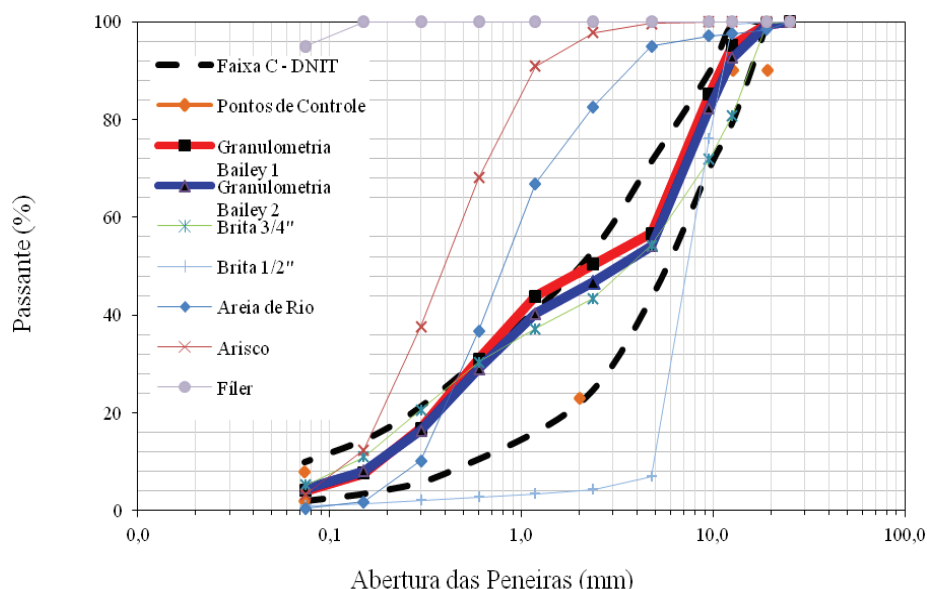
A granulometria 1 (21% de brita 3/4", 35% de brita 1/2", 22% de areia de rio, 20% de arisco e 2% de cal hidratada do tipo CH-1), foi aplicada na BR-222, Ceará e a granulometria 2 (35% de brita 3/4", 31% de brita 1/2", 20% de areia de rio, 12% de arisco e 2% de cal hidratada do tipo CH-1) obtida a partir da granulometria 1. A Figura 1 apresenta as granulometrias de cada material e as curvas de projeto das granulometrias das duas misturas analisadas.



**Figura 1:** Curvas Granulométricas (metodologia convencional, DNIT 031/2006)

### 3.2.2. Análise das curvas granulométricas utilizando a metodologia Bailey.

As curvas granulométricas obtidas pela metodologia Bailey diferenciam-se das curvas obtidas através da metodologia do DNIT pela utilização procedimentos sistemáticos para análise e seleção granulométrica que utilizam a série de peneiras norte americanas. A partir do percentual de material passante na PCP a granulometria 1 foi classificada como fina e a granulometria 2 foi classificada como graúda. As curvas granulométricas utilizadas nas análises Bailey são representadas na Figura 2. Os limites da metodologia estão apresentados nas Tabelas 7 e 8.



**Figura 2:** Curvas granulométricas obtidas pelo método Bailey através da série de peneiras norte americana.



### 3.3. Ensaio Uniaxial de Carga Repetida

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios (*Universal Testing Machine* – UTM 25). Os CPs foram ensaiados a 60°C. Inicialmente ocorreu um pré-carregamento de 15kPa. Em seguida aplicou-se um carregamento de 204kPa durante 0,1s e repousando durante 0,9s. Durante o repouso ocorreu com carregamento de 5% da tensão principal, 10,2kPa. O ensaio foi interrompido quando as misturas atingiram o *Flow Number* (Dongré *et al.*, 2009).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados das análises Bailey. Esses resultados mostram que nem todos os parâmetros se enquadraram nos limites estabelecidos pela metodologia Bailey.

**Tabela 7:** Parâmetros da análise Bailey para a granulometria 1

Parâmetros	Resultados obtidos	Limites do método
AG	0,31	0,60 – 1,0
GAM	0,62	0,35 – 0,50

**Tabela 8:** Parâmetros da análise Bailey para a granulometria 2

Parâmetros	Resultados obtidos	Limites do método
AG	0,52	0,50 – 0,65
GAM	0,62	0,35 – 0,50
FAM	0,28	0,35 – 0,50

Na granulometria 2 a proporção de Agregado Graúdo (AG) foi de 0,52 dentro do limite do método Bailey. Espera-se que a mistura asfáltica com tal granulometria não apresente problemas de susceptibilidade a segregação e dificuldade de compactação. Quando tal parâmetro resulta em um valor abaixo do limite (0,50) é um indicativo de susceptibilidade a segregação e quando esse valor está acima do limite (0,65) espera-se que as misturas apresentem dificuldade de compactação em campo.

A proporção de agregado Graúdo no Agregado Miúdo (GAM) foi de 0,62 e ficou acima do limite (0,50) recomendado pelo método. Tal diferença também foi encontrada em Wargha Filho (2013). Isso representa um alto VAM. A quantidade de fino presente na mistura de granulometria graúda tende a piorar o desempenho quanto à deformação permanente da mistura uma vez que os agregados finos apenas flutuam na estrutura e não compõem o esqueleto mineral, responsável em transmitir as cargas na estrutura (Denneman, 2007).

O parâmetro de agregado Fino no Agregado Miúdo (FAM) foi de 0,28, abaixo do limite estabelecido pelo método Bailey (0,35). Isso representa uma diminuição do VAM. Assim, o efeito do GAM combinado com o efeito do FAM tende a equilibrar o VAM. Nota-se ainda que há dificuldade de enquadrar as granulometrias estudadas aos parâmetros da metodologia Bailey e essa dificuldade é recorrente em pesquisas nacionais (Cunha, 2009; Mendes, 2011; Wargha Filho, 2013) e internacionais (Khosla e Sadasivam, 2005; Zaniewski e Mason, 2006; Denneman *et al.*, 2007; Daniel e Rivera 2009), onde pelo menos um parâmetro da metodologia Bailey não foi atendido.

Os parâmetros do método Bailey encontrados para a granulometria 1 não se enquadraram nos limites propostos nesse método, o que dificulta a análise, uma vez que a diferença é

significativa.

A granulometria 1 apresentou AG de 0,31 que está muito abaixo do valor mínimo recomendado (0,60). Isso representa um excesso de “pluggers” e mesmo que o VAM seja adequado a mistura será susceptível à segregação. Tal diferença também é encontrada em Zaniewski e Mason (2006). O GAM foi de 0,62, estando acima do limite máximo (0,50), representando um alto VAM já que aumenta a compactabilidade das frações finas. Granulometrias finas cujo TMN é 12,5mm são avaliadas apenas com os parâmetros AG e GAM. A Tabela 9 apresenta os resultados de *Flow Number* obtidos para as 02 misturas.

**Tabela 9:** Resultados do ensaio Uniaxial de Carga Repetida

CP	Mistura 1			Mistura 2		
	FN	$\epsilon$	Vv (%)	FN	$\epsilon$	Vv (%)
1	109	0,7	6,0	303	0,8	5,4
2	115	0,6	5,9	243	0,8	5,8
<b>Média</b>	112	0,7	-	273	0,8	-
<b>Desvio Padrão</b>	4,2	0,1	-	42,4	0,0	-
<b>CV (%)</b>	4	15	-	16	3	-

Legenda: *Flow Number* (FN);  $\epsilon$  (deformação plástica); Vv (Volume de vazios)

A mistura 2 apresentou FN médio de 273 e a mistura 1 de 112. O resultado da granulometria 1 (granulometria fina) é coerente com um desempenho inferior quanto à deformação permanente quando comparada a mistura 2, já que a mistura 1 apresentou um esqueleto mineral predominantemente fino. Embora, os agregados graúdos utilizados possuam forma angular, a presença de areia tende a piorar o desempenho das misturas quanto à deformação permanente. Conclui-se que o melhor desempenho da mistura 2 (granulometria graúda) foi resultado de um esqueleto mineral capaz de suportar e acomodar melhor as cargas a ele aplicadas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados das curvas granulométricas e do ensaio uniaxial de carga repetida é possível concluir que somente a seleção convencional da faixa granulométrica, como indica o DNIT, não é suficiente para fornecer subsídios para um esqueleto mineral ideal, que resulte em misturas asfálticas mais resistentes à deformação permanente. Os resultados obtidos através da metodologia Bailey são indicativos para compreender o comportamento mecânico das misturas asfálticas em laboratório, que pode ser estendido ao desempenho da mistura em campo. Para análise realizada através da metodologia Bailey a mistura graúda apresenta melhor desempenho do que mistura fina avaliada pelo ensaio uniaxial de carga repetida.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos de fomento a pesquisas CNPq e Funcap pelas bolsas concedidas.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBANO, J. F. (2005) *O Efeito dos Excessos de Carga sobre a Durabilidade de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO T 19M/T 19-09. *Standard Method of Test for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. EUA, 1997.
- \_\_\_\_\_. AASHTO T 27/84: *Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. EUA, 1984.

- \_\_\_\_\_. AASHTO M 323-04: *Superpave Volumetric Mix Design*, EUA, 2006.
- ARAGÃO, F. T. S.; LUTIF, J.E.S.; KIM, Y.R.; SOARES, J.B (2007). *Avaliação da Zona de Restrição como Critério Limitador em Misturas Asfálticas Utilizadas em Vias de Baixo Volume de Tráfego*. Anais da XXI ANPET, Rio de Janeiro, RJ.
- ASTM D2493 *Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 2009.
- ASTM D36 *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 2009.
- ASTM D5 *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 2009.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA.
- BORGES, R. L. (2014) *Utilização de um Modelo Viscoplastico para Análise de Deformação Permanente em Misturas Asfálticas*. Qualificação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará – Petran/UFC. Fortaleza, CE.
- CHAVES, J. M. C; SILVA, A. H. M; BERNUCCI, L. B; ALBA, VAGNER; FLORÊNCIO, HUGO (2013) *Desenvolvimento de Equipamento de Compactação por Rolagem para Laboratório*. 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Santos, SP.
- CHOI, Y. T. (2013) *Development of a Mechanistic Prediction Model and Test Protocol for the Permanent Deformation of Asphalt Concrete*. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.
- COMINSKY, R.; R. B. LEAHY; E. T. HARRIGAN, (1994) *Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction and Conditioning (SHRP-A-408)*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC
- CUNHA, M.B. (2004) *Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - área de transportes). Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- DANIEL, J. S; RIVERA, F (2009). *Application of The Bailey Method to New Hampshire Asphalt Mixtures*. Technical Report Documentation.
- DASH, S. S. (2013) *Effect of Mix Parameters on Performance and Design of Cold Mix Asphalt*. Thesis. Department of Civil Engineering National Institute of Technology. Odisha, India, 2013.
- DENNEMAN, E; VERHAEGHE, B. M. J. A.; SADZIK, E. S. (2007) *Aggregate Packing Characteristics of Good and Poor Performing Asphalt Mixes*. Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference.
- DONGRÉ, R., D'ANGELO, J., COPELAND, A. (2009) *Refinement of Flow Number as Determined by Asphalt Mixture Performance Tester: Use in Routine Quality Control - Quality assurance practice*. Transportation Research Record, No. 2127, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 127-136.
- FRITZEN, M.A. (2005) *Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimentos Asfálticos com Simulador de Tráfego na Rodovia*. Rio Teresópolis. Dissertação (mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- GIERHART, Danny. *Analysis of Oklahoma Mix Designs for The National Center for Asphalt Technology Test Track Using the Bailey Method*. Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Mix Design and Production Quality Control Testing, p. 33, 2007.
- GUIMARÃES, A. C. R. (2001) *Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- KHOSLA, N. Paul; SADASIVAM, S (2005). *Determination of Optimum Gradation for Resistance to Permeability, Rutting and Fatigue Cracking*. Final Report FHWA/NC/2004-12. Department of Civil Engineering North Carolina State University.
- MAHMOUD, A.F.F.; BAHIA, H. (2004) *Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixture*. Wisconsin Highway Research Program. Projeto número 0092-01-02.
- MARQUES, G. L. O. (2004) *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por impacto e giratória*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MENDES, L. O (2011) *Utilização do Método Bailey para a Seleção de Agregados em Dosagem de Misturas Asfálticas*, 2011. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora.
- MOTTA, L. M. G.; SÁ, M. F. P.; OLIVEIRA, P. M. F.; SOUSA, A. M. (1996) *O Ensaio de Creep Estático e Dinâmico na Avaliação das Misturas Asfálticas*. In: Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA. 115-135.

- MOURA, E. (2010) *Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, J. A. (2013) *Avaliação do Desempenho de misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará.
- ONOFRE, F. C. (2012) *Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Polímeros*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- PAZOS, A. G. (2015) *Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas*; 2015; Dissertação (Mestrado em Programa de Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa. Rio de Janeiro, RJ.
- READ J. e WHITEOAK D. (2003) *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth Edition, London.
- RIBEIRO, M. M. P. (2013) *Contribuição ao Estudo da Deformação Permanente dos Solos de Subleito*. 2013. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos.
- SANDERS, C. A. e DUKATS, E. L. (1992) *Evaluation of Percent Fracture of Hot-Mix Asphalt Gravels in Indiana. Effect of Aggregate and Mineral Filler on Asphalt Mixture Performance*, R. C. Meininger, American Society for Testing and Materials, STP 1147. Philadelphia, PA.
- STIADY, J.; HAND, A.; WHITE, T. (2002) *Quantifying Contributions of Aggregate Characteristics Using PURWheel Laboratory Tracking Device*. In: *Aggregate Contribution to Hot-Mix Asphalt Performance – ASTM STP 1412*, 1-15, Florida, EUA.
- TONIAL, I. e LEITE, L. (1995) *Qualidade dos Cimentos Asfálticos Brasileiros Segundo as Especificações SHRP*. Anais do 12º Encontro de Asfalto IBP, p. 94–119.
- VAVRIK, W. R.; HUBER G. A.; PINE W. J.; CARPENTER S.H.; BAILEY R. (2002) *Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design*. Transportation Research Record, Circular nº E-C044. EUA, 2002.
- VALE, A. F. (2008) *Método de Uso de Simuladores de Tráfego Linear Móvel de Pista Para Determinação de Comportamento e Previsão de Desempenho de Pavimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- VIANA, M. A.; SILVEIRA, M. A.; VASCONCELOS, J. A. G.; CHAVES, F. J.; CASTELO BRANCO, J. V.; LIMA, J. F. P.; PAIVA, J. A. A.; RODRIGUES, G. F.; LEITE, L. M.; TONIAL, I. e MOTTA, L. M. G. (1996) *Trecho Experimental/CE: Monitoramento do Pavimento que Testa a Aplicação da Especificação Superpave na Região Nordeste*. In: 13º Encontro de Asfalto – IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- VICTORINO, D. R. (2008) *Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR 290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- WARGHA FILHO, N. (2013) *Avaliação da Influência da Redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas*. Dissertação. Departamento de Engenharia de Transporte. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- WHITE, T.D.; HADDOCK, J. E.; HAND, A. J.; FANG, J. (2002) *Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements*. National Cooperative Highway Research Program Report 468. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- ZANIEWSKI, J. P.; MASON, C. (2006) *An Evaluation of The Bailey Method to Predict Voids in The Mineral Aggregate*. West Virginia University, 2006a. ISBN 97805491761.