

ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Kamilla Lima Vasconcelos¹

Materials & Pavement Division - Texas Transportation Institute - TTI
Texas A&M University - TAMU

Francisco Evangelista Junior²

Jorge Barbosa Soares²

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - Petran
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

Um concreto asfáltico é um material heterogêneo e consiste de agregados, vazios e ligante asfáltico. O arranjo das partículas de agregados, em termos da distribuição espacial, distribuição direcional e pontos de contato é responsável pela formação do esqueleto mineral. Essas distribuições resultam do proporcionamento e propriedades dos materiais, além da forma de compactação. A diferença nas propriedades de uma mesma mistura imposta a diferentes métodos de compactação deve-se principalmente às diferenças na estrutura, em particular a distribuição e orientação dos agregados graúdos. O presente trabalho utilizou o programa de análise *Imagetool*, a fim de se obter informações da estrutura de agregados de três Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQs), compactados através do Superpave Gyratory Compactor (SGC) e do compactador Marshall. A análise das misturas foi realizada através de três parâmetros: (i) vetor magnitude; (ii) média dos ângulos de inclinação com a horizontal; e (iii) uniformidade da distribuição espacial dos agregados. As análises realizadas mostraram que à medida que se diminui o tamanho dos agregados, a distribuição destes tende a ser bem mais uniforme sem muita diferença entre os métodos de dosagem. Desta forma o que determina alguma concentração de distribuição e uma conseqüente anisotropia das misturas é a distribuição de partículas maiores que $\frac{3}{8}$ ".

ABSTRACT

Asphalt mixtures are heterogeneous materials consisting of aggregates, air voids, and asphalt. The arrangement of the aggregate particles in terms of spatial distribution, directional distribution and contact points is referred as the aggregate skeleton. The internal structure distribution is the result of proportions and properties of materials as well as a function of the compaction method. Differences in the properties of a same mixture, compacted by different methods, can be related to differences on its structure, mostly on the distribution and orientation of the coarse aggregates. This work used the *Imagetool* program to analyze the internal structure of three different Hot Mix Asphalts (HMA), compacted with the Superpave Gyratory Compactor (SGC) and the Marshall compactor. The analysis of the mixtures was performed through three parameters: (i) vector magnitude; (ii) average angle of inclination from the horizontal; and (iii) uniformity in the spatial distribution of the aggregates. The analyses show more uniform distributions for shorter aggregates particles without difference between the design methodologies. It is also observed that particles longer than $\frac{3}{8}$ " have an important role in the concentration of the aggregates inside the overall mixture.

1. INTRODUÇÃO

O concreto asfáltico é um material heterogêneo e consiste de agregados, vazios e ligante asfáltico. O comportamento deste composto é influenciado por muitos fatores incluindo o tipo de ligante asfáltico, a graduação e a forma dos agregados, e o grau de compactação da mistura (Masad *et al.*, 1999a). O método adotado para compactação de amostras em laboratório tem influência direta na dosagem e na caracterização mecânica das misturas asfálticas (Button *et al.*, 1994). Para se obter uma caracterização mecânica realista é necessário que as amostras de laboratório sejam fabricadas de forma a simular a compactação que ocorre em campo. Essa simulação está relacionada com a distribuição de agregados e o volume de vazios dentro da mistura, referida por diversos autores como estrutura interna.

O arranjo das partículas de agregados, em termos da distribuição espacial, distribuição direcional e pontos de contato, é responsável pela formação do esqueleto mineral. Essas distribuições resultam do proporcionamento e propriedades dos materiais, além da forma de

compactação, conforme mencionado anteriormente. Esses fatores são levados em consideração durante os procedimentos de dosagem por meio dos limites impostos para granulometria, forma dos agregados, parâmetros volumétricos, propriedades mecânicas, etc (propriedades macroscópicas). As metodologias de dosagem geralmente impõem limites para alguns desses parâmetros a fim de assegurar que a estrutura interna de determinada mistura seja capaz de suportar o tráfego para o qual esta será projetada.

A diferença nas propriedades de uma mesma mistura imposta a diferentes métodos de compactação deve-se principalmente às diferenças na estrutura, em particular a distribuição e orientação dos agregados graúdos. A microestrutura das misturas asfálticas vem sendo cada vez mais associada às suas propriedades mecânicas, bem como a resistência aos defeitos comumente encontrados em campo (deformação permanente, fadiga, trincas a baixas temperaturas, etc). Em muitos modelos mecanísticos, porém, o material compósito é assumido como homogêneo e isotrópico, sendo sua microestrutura negligenciada. Segundo Yue *et al.* (1995), tal fato deve-se a dificuldade associada às medidas quantitativas da microestrutura das misturas, bem como a natureza de distribuição aleatória dos agregados. Esta dificuldade vem sendo superada atualmente com a aplicação do Processamento Digital de Imagens (PDI) que vem se mostrando uma importante ferramenta para o estudo da microestrutura das misturas asfálticas de forma quantitativa.

No presente estudo utilizou-se o programa de análise *Imagetool*, a fim de se obter informações da estrutura de agregados de algumas misturas asfálticas. O programa foi desenvolvido pelo *Department of Dental Diagnostic Science* da *Texas Health Science Center* (IMAGETOOL, 1997 *apud* Masad *et al.*, 1999a) e tem capacidade de analisar imagens para diferentes finalidades. Foram selecionados três Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQs), e dois processos de compactação, impacto (Marshall) e amassamento (Superpave). As seis misturas foram analisadas através de três parâmetros: (i) uniformidade da distribuição espacial dos agregados, (ii) vetor magnitude e (iii) média dos ângulos de inclinação com a horizontal. Os passos adotados na análise, bem como as características das misturas, encontram-se descritos nos itens a seguir.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Harvey e Monismith (1993) avaliaram diversos métodos de compactação e concluíram que a seleção do procedimento de compactação tem pelo menos o mesmo efeito no desempenho das misturas que o tipo de agregado, tipo de ligante, percentual de finos, ou volume de vazios. Consuegra *et al.* (1989) compararam cinco diferentes processos de compactação com amostras obtidas em campo. Dentre os cinco processos analisados estão: (i) *Mobile steel wheel simulator*; (ii) *Texas gyratory compactor* (amassamento); (iii) *California kneading compactor*; (iv) compactador Marshall (impacto); e (v) *Arizona vibratory-kneading compactor*. A comparação dos resultados foi realizada através de propriedades como módulo de resiliência, resistência à tração e o ensaio de *creep*. Dos cinco processos de compactação investigados, o giratório foi o que apresentou maior semelhança de resultados com relação às amostras de campo, enquanto as amostras obtidas por impacto apresentaram os piores resultados, juntamente com as amostras compactadas através do *vibratory-kneading*.

A comparação entre processos de compactação de campo e de laboratório é normalmente realizada através do comportamento mecânico das amostras. A diferença entre os procedimentos de compactação é manifestada através da estrutura interna da mistura

(distribuição dos agregados e vazios associados). Dessa forma a análise da estrutura interna das misturas compactadas é uma importante ferramenta de comparação entre os procedimentos de compactação de campo e de laboratório (Tashman *et al.*, 2001).

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos no intuito de avaliar a capacidade de sistemas de compactação em laboratório simularem a compactação ocorrida em campo através da análise da estrutura interna dos corpos-de-prova (CP) (Yue *et al.*, 1995; Yue e Morin, 1996; Masad *et al.*, 1998, 1999a; Tashman *et al.*, 2001; Saadeh *et al.*, 2002). Outros comparam ainda diferenças na estrutura interna dos CPs para diferentes processos de compactação apenas em laboratório, também pela análise da estrutura interna (Yue *et al.*, 1995; Yue e Morin, 1996; Masad *et al.*, 1999b). Esse enfoque vem sendo explorado com mais frequência nos últimos anos devido ao processo não incluir as incertezas inerentes nas medidas de propriedades mecânicas, que assume as amostras como homogêneas e isotrópicas.

Segundo Masad e Sivakuma (2004), a tecnologia de imagens vem sendo implementada em diversas áreas da engenharia civil, entre elas: análise de defeitos em pavimentos, acesso a condições estruturais, transporte de sedimentos em córregos, transporte de contaminantes em meios porosos, deformação de solos, distribuição de partículas por tamanho e análise da forma de partículas. A utilização do processamento digital de imagens para misturas asfálticas vem sendo aprimorada como uma forma de caracterização da estrutura interna. O processamento digital de imagens consiste na conversão da imagem digital e aplicação de vários procedimentos matemáticos a fim de extrair informações da imagem. Dentre as informações que podem ser obtidas desse processo, podem-se citar: orientação e propriedades físicas dos agregados, anisotropia do CP, segregação, etc. Segundo Tashman (2000), as imagens a serem analisadas devem estar em escala de cinza, pois o limite dos agregados é mais preciso em relação à imagem em preto e branco.

Diversos trabalhos já foram publicados com análises de imagens produzidas através de compactação giratória, muitos deles pelo *Superpave Gyratory Compactor* (SGC). Além da comparação com amostras obtidas de campo, também foram realizadas variações nas características de compactação como: ângulo de giro, altura da amostra, pressão aplicada, etc. Saadeh *et al.* (2002) concluíram que os agregados das amostras que passaram por compactação giratória tiveram, em média, menos anisotropia que as amostras extraídas de campo. Concluíram ainda que o ângulo de compactação, bem como a altura da amostra, são fatores importantes para orientação, porém a pressão de aplicação da carga não, sendo o mesmo observado por Tashman *et al.* (2001). Quando usados diferentes números de giros, Masad *et al.* (1999a) concluíram que as amostras obtidas do compactador giratório atingem a orientação encontrada nas amostras de campo para um alto número de giros. Para o volume de vazios, porém, acontece o oposto. É necessário um pequeno número de giros para que o volume de vazios da amostra do giratório iguale o volume de vazios obtido em campo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Seleção dos Materiais

Foram utilizados neste trabalho agregados de origem granítica provenientes da Pedreira de Itaitinga na Região Metropolitana de Fortaleza. Como agregado graúdo adotou-se brita $\frac{3}{4}$ " e como agregado miúdo pó de pedra. Para confecção dos CPs os agregados foram fracionados da peneira $\frac{3}{4}$ " à peneira N° 200, passando por toda a série especificada pelo DNIT, de forma a assegurar a menor variação possível das granulometrias originais. Como ligante, utilizou-se o

CAP 50/60 produzido do petróleo Fazenda Alegre refinado na Lubrificantes do Nordeste (Lubnor)/Petrobras.

3.2. Curvas Granulométricas

Conforme anteriormente mencionado, foram analisadas 3 granulometrias contínuas (CBUQs). Optou-se por selecionar uma curva que passasse abaixo da Zona de Restrição – RZ (BRZ), conforme sugerido por diversos autores, uma acima da ZR (ARZ) e uma através da mesma (TRZ). As distribuições granulométricas investigadas apresentam Tamanho Máximo Nominal – TMN de 12,5mm e a mesma granulometria até a peneira de 4,76mm, de forma que a variação entre as 3 curvas se deu quase totalmente na fração miúda. A Figura 1 ilustra as 3 granulometrias segundo especificações Superpave, sendo todas enquadradas na Faixa C do DNIT.

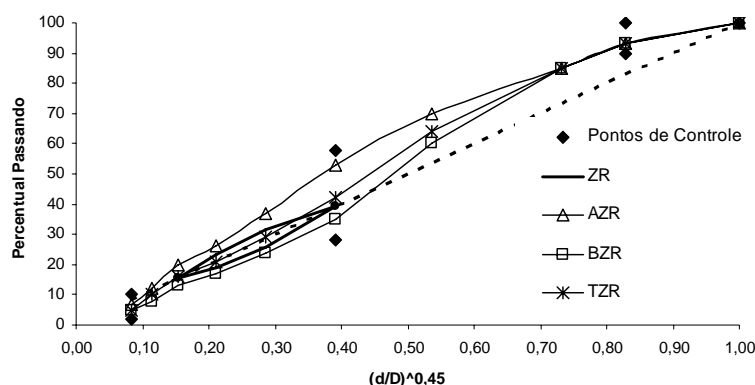


Figura 1: Distribuição granulométrica das misturas contínuas segundo especificações Superpave para misturas com 12,5mm de TMN

3.3. Parâmetros Volumétricos e Teor de Projeto

As misturas foram preparadas de acordo com os 2 procedimentos de dosagem descritos em Vasconcelos (2004): Marshall, no caso da compactação por impacto, e Superpave, por amassamento. As misturas foram compactadas com 75 golpes por face na dosagem Marshall e 96 giros na Superpave. Este número de giros foi baseado no tráfego e temperatura para os quais a mistura estava sendo projetada ($N_{projeto}$). A compactação por impacto foi realizada com soquete Marshall, com características descritas em DNER ME-043. A compactação por amassamento foi realizada pelo *Superpave Giratory Compactor* (SGC) com pressão de 600kPa, 30rpm e ângulo de 1,25°. Os parâmetros volumétricos, incluindo o Teor de Projeto (TP), dos CPs obtidos para as 6 misturas encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros volumétricos dos CPs moldados no teor de projeto

| | ARZ | | BRZ | | TRZ | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | M | S | M | S | M | S |
| Densidade aparente - Da | 2,329 | 2,318 | 2,344 | 2,313 | 2,331 | 2,337 |
| Volume de vazios - Vv (%) | 3,6 | 3,6 | 3,0 | 2,4 | 4,1 | 2,9 |
| Volume cheio com betume - VCB (%) | 13,7 | 14,3 | 13,3 | 14,3 | 12,6 | 13,7 |
| Vazios no agregado mineral - VAM (%) | 17,3 | 17,9 | 16,3 | 16,7 | 16,6 | 16,7 |
| Relação betume/vazios - RBV (%) | 79,3 | 80,0 | 81,7 | 85,5 | 75,6 | 82,4 |
| Teor de projeto - TP (%) | 6,0 | 6,3 | 5,8 | 6,3 | 5,5 | 6,0 |

O percentual de ligante de cada mistura foi determinado através das dosagens das mesmas, ou seja, para um volume de vazios de 4% tornando a espessura do filme de ligante relativamente

semelhante para todas as misturas. Desta forma permite-se a comparação tanto entre os métodos de dosagens como entre as misturas de granulometrias diferentes.

3.4. Processamento das Imagens

O processamento das imagens foi realizado a fim de analisar a uniformidade da distribuição espacial dos agregados, bem como a orientação (ângulo do maior eixo do agregado com a horizontal) para misturas com granulometrias e processos de compactação diferentes. Um resumo do procedimento adotado encontra-se resumido abaixo e também ilustrado em Vasconcelos (2004):

- Moldagem de 5 CPs no teor de projeto;
- Serragem de cada um dos CPs a aproximadamente 2cm do topo e também 2cm do fundo;
- Digitalização da imagem através de *scanner*;
- Correção da imagem, a fim de retirar a cor existente no fundo da mesma e separar agregados graúdos que por ventura estejam em contato; e
- Processamento da imagem, utilizando o programa *Imagetool* versão 3.0.

Um total de 19 características dos agregados pode ser obtido através do *Imagetool*. Dentre as principais características que podem ser obtidas estão:

- Área: medida do número de *pixels* em um polígono;
- Perímetro: comprimento do contorno externo do objeto;
- Alongamento: razão entre o comprimento do eixo maior e o comprimento do eixo menor;
- Diâmetro *Feret*: diâmetro de um círculo tendo a mesma área medida para o objeto;
- Comprimento do maior eixo: comprimento da maior linha que pode ser traçada através do objeto;
- Ângulo do maior eixo: ângulo entre o eixo horizontal e o maior eixo;
- Comprimento do menor eixo: comprimento da maior linha que pode ser traçada através do objeto, perpendicular ao maior eixo;
- Ângulo do menor eixo: ângulo entre o eixo horizontal e o menor eixo;
- Centróide: o ponto central, ou centro de massa, do objeto, determinado como uma média das coordenadas x e y de todos os *pixels* do objeto.

A utilização dos 5 CPs produziu um total de 20 imagens por mistura uma vez que a serragem em 2 alturas fornece 4 imagens por CP. A Tabela 2 apresenta o total de agregados analisados para cada uma delas.

Tabela 2: Total de agregados analisados por mistura

| Misturas | Nº de agregados analisados | | | |
|---------------|----------------------------|-----|-----|---------------|
| | Peneiras | ½" | ¾" | Nº 4 Nº 10 |
| ARZ Marshall | | 49 | 105 | 335 462 |
| ARZ Superpave | | 70 | 78 | 287 451 |
| BRZ Marshall | | 25 | 123 | 310 719 |
| BRZ Superpave | | 46 | 85 | 315 818 |
| TRZ Marshall | | 34 | 83 | 350 872 |
| TRZ Superpave | | 40 | 65 | 356 954 |
| Total | | 264 | 539 | 1953 4276 |

É importante salientar que o número de partículas observadas para as peneiras ½" e ¾" é bem menor do que para as peneiras Nº 4 e Nº 10. Isto pode ser atribuído ao fato de que a quantidade de agregados destas peneiras é bem pequena na mistura (ver Figura 1) aliado ao processo de serragem dos corpos de prova de onde obtemos imagens bidimensionais dos

agregados onde os tamanhos não são os tamanhos plenos dos agregados tridimensionais.

As seções serradas não foram previamente tratadas de forma a aumentar o contraste entre os agregados e o asfalto, conforme adotado por Saadeh *et al.* (2002). Os agregados de origem granítica têm em geral uma coloração clara, o que facilita a captura desses agregados pelo programa adotado para processamento das imagens. No caso da utilização de agregados de coloração escura, especialmente aqueles ricos em ferro, é importante que se utilizem artifícios para melhorar a captura desses agregados.

3.5. Metodologia de Análise da Distribuição Radial das Partículas de Agregados

A análise da distribuição de agregados nos corpos de prova foi considerada em relação ao centro da seção transversal (distribuição radial). Esta análise foi realizada para os agregados retidos nas peneiras de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N° 4 e N° 10 individualmente. Como preparo dos dados para esta análise, os seguintes procedimentos foram seguidos:

- A partir das coordenadas x e y do centro de massa de cada agregado foi calculada sua distância radial ao centro do corpo de prova;
- Para cada peneira foi determinada a frequência absoluta de agregados para intervalos de raio de 10mm, definindo-se 5 setores no corpo de prova como ilustra a Figura 2;
- Foram calculados os valores de frequências relativas ponderadas por área para cada setor já que estas áreas setoriais são crescentes com o valor do raio como mostra a Figura 2.

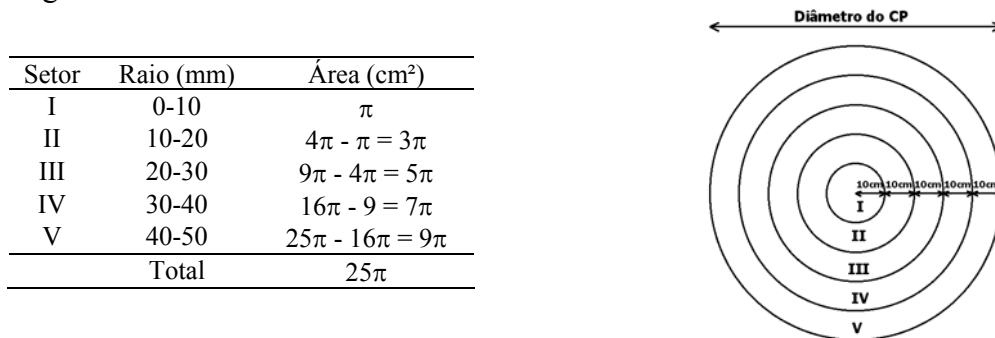


Figura 2: Setores radiais para cada CP

Foram realizados 2 tipos de análise para a caracterização da distribuição radial dos agregados para as diversas misturas:

- Análise qualitativa: foram observados gráficos de frequência relativa ponderada para cada peneira onde a incidência de agregados em cada setor foi observada. Com os histogramas construídos pretende-se ter uma idéia da distribuição de cada peneira nas misturas. A distribuição radial foi estudada comparando-se as diversas misturas de mesma composição granulométrica, mas com métodos de compactação diferentes (Marshall × Superpave). Também foram observadas algumas diferenças relevantes na distribuição dos agregados entre misturas com o mesmo método de compactação, mas granulometrias diferentes (ARZ × BRZ × TRZ);
- Análise quantitativa: foi traçada a curva de Lorenz para cada uma das 4 peneiras e calculado o Índice de concentração de Gini, sendo a definição destes parâmetros incluída adiante. A observação visual da curva aliada à análise quantitativa dos índices de Gini, permitirá o estudo comparativo entre os métodos de compactação Marshall e Superpave com relação à concentração espacial das partículas ao longo do raio do corpo de prova.

A curva de Lorenz é um recurso gráfico utilizado para medida de distribuição espacial que se baseia em grafar as percentagens cumulativas representadas em dois eixos ortogonais. Esta pode ser entendida como um gráfico de frequência relativa acumulada, que compara a distribuição empírica de uma variável com a distribuição uniforme. A distribuição uniforme em um gráfico de frequência relativa acumulada é representada por uma reta com ângulo de 45°. Quanto mais próxima for a curva de frequência relativa acumulada de uma variável em relação à reta diagonal que expressa a distribuição uniforme, mais equilibrada e uniforme será a distribuição analisada (Gerardi e Silva, 1981). Esta curva é tradicionalmente utilizada para mostrar a concentração de renda na população de uma região ou país (Matos, 2005). Podemos também aplicar o recurso da curva de Lorenz para estudo da concentração de um fenômeno ao longo do tempo, como é o caso de estudos de precipitação pluviométrica anual; ou ao longo de regiões espaciais, como índice de produção por setor agrícola (Gerardi e Silva, 1981).

A principal vantagem da utilização da curva de Lorenz é sua associação direta com índices quantitativos de concentração espacial da distribuição. O índice mais importante relacionado à medida de concentração é o Índice de Gini. Este índice é adotado pela Organização das Nações Unidas (ONU) como indicativo da concentração da riqueza de um país. O intervalo de resultados possíveis varia de 0 a 1. Um Índice de Gini igual a 0 representa o grau máximo de igualdade e só ocorrerá se todas as unidades apresentarem o mesmo valor para a variável. Por outro lado, quando o Índice for igual a 1, ele representará o grau máximo de desigualdade e só ocorrerá quando apenas uma unidade for responsável pela totalidade dos recursos, sendo as demais unidades representadas pelo valor 0. Os dois casos expostos nunca ocorrem na prática e servem apenas de forma hipotética para representar a máxima igualdade e a máxima concentração. A partir de dados reais, o Índice de Gini será sempre maior que 0 e menor que 1. Pode ser calculado pela equação 1:

$$\text{Índice de Gini} = 1 - 2A_{LZ} \quad (1)$$

em que:

A_{LZ} : área formada pela curva de Lorenz com o eixo horizontal.

3.6. Metodologia de Análise da Orientação das Partículas de Agregados

A orientação dos agregados foi quantificada para agregados maiores que 2,00mm (retidos na peneira N°10). Nestas análises os tamanhos dos agregados não foram distinguidos já que estudos anteriores demonstram a não variação das medidas angulares com o tamanho real da partícula (Tashman *et al.*, 2001).

A orientação foi medida através do ângulo entre o maior comprimento da partícula de agregado e a linha horizontal da imagem digitalizada. O maior comprimento da partícula é definido como a maior distância entre dois *pixels* dos limites de contorno do agregado, conforme reportado por Masad *et al.* (1999a).

Usando a orientação dos agregados individualmente, parâmetros estatísticos podem ser calculados para quantificar a distribuição direcional dos agregados. Os parâmetros adotados para quantificar a orientação foram os mesmos adotados por Curray (1956) (vetor magnitude, Δ), e por Masad (1998) (média dos ângulos de inclinação com a horizontal, θ). Os parâmetros são calculados conforme as equações 2 e 3.

$$\Delta = \frac{1}{N} \sqrt{(\sum \sin 2\theta_k)^2 + (\sum \cos 2\theta_k)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\sum |\theta_k|}{N} \quad (3)$$

em que:

θ_k : orientação de um agregado isoladamente, varia de -90° a $+90^\circ$;

N : número de agregados na imagem.

Os valores de Δ podem variar de 0 a 1, onde uma distribuição completamente randômica assume valor de 0, enquanto 1 é obtido no caso de todos os agregados da análise apresentarem a mesma orientação. O valor de θ representa o ângulo médio que as partículas de agregado fazem com a horizontal.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Análise Qualitativa da Distribuição Radial das Partículas de Agregados

Para a análise qualitativa da distribuição radial dos agregados foram construídos histogramas de frequência relativa para cada peneira de cada uma das misturas analisadas.

Peneiras $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ "

A Figura 3 apresenta os histogramas para a comparação das distribuições entre as 3 misturas de diferentes granulometrias para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ " e para ambos os métodos de dosagem. Com relação a diferença da distribuição entre os métodos de dosagem, observamos que houve uma menor variabilidade para as misturas do método Superpave. As partículas de $\frac{1}{2}$ " das misturas ARZ do método Marshall, apesar de uma forte concentração no primeiro setor do CP (0-10mm), mostraram-se a partir daí as mais uniformemente distribuídas. As misturas BRZ e TRZ não apresentaram observações nos 10mm iniciais do CP para o método Marshall além de apresentaram uma certa aleatoriedade nas distribuições de agregados com relação ao método de dosagem. Isto mostra que a análise qualitativa não é suficiente para conclusões sobre a distribuição espacial para este tamanho de partícula.

Os agregados da peneira de $\frac{3}{8}$ " se apresentam com comportamento semelhante com relação ao método de dosagem com uma melhor uniformidade para a dosagem Marshall. Apesar da mistura ARZ não ter tido observações de agregados até 10mm do centro dos seus corpos de prova para a metodologia Superpave, a distribuição destas partículas apresenta uma maior uniformidade entre as frequências observadas e mesmo comportamento entre os métodos Marshall e Superpave. Ainda para os agregados da peneira de $\frac{3}{8}$ ", as misturas BRZ e TRZ apresentam em torno de 1/3 de suas partículas localizadas no centro dos corpos de prova para ambos os métodos de compactação. Para estas misturas o setor II (10-20mm) foi o de menor incidência de agregados onde, a partir daí, a distribuição tende a uniformidade. Concluiu-se que existe uma relativa descontinuidade entre o setor central I e os setores III, IV e V, já que o setor II apresentou pouca distribuição de agregados.

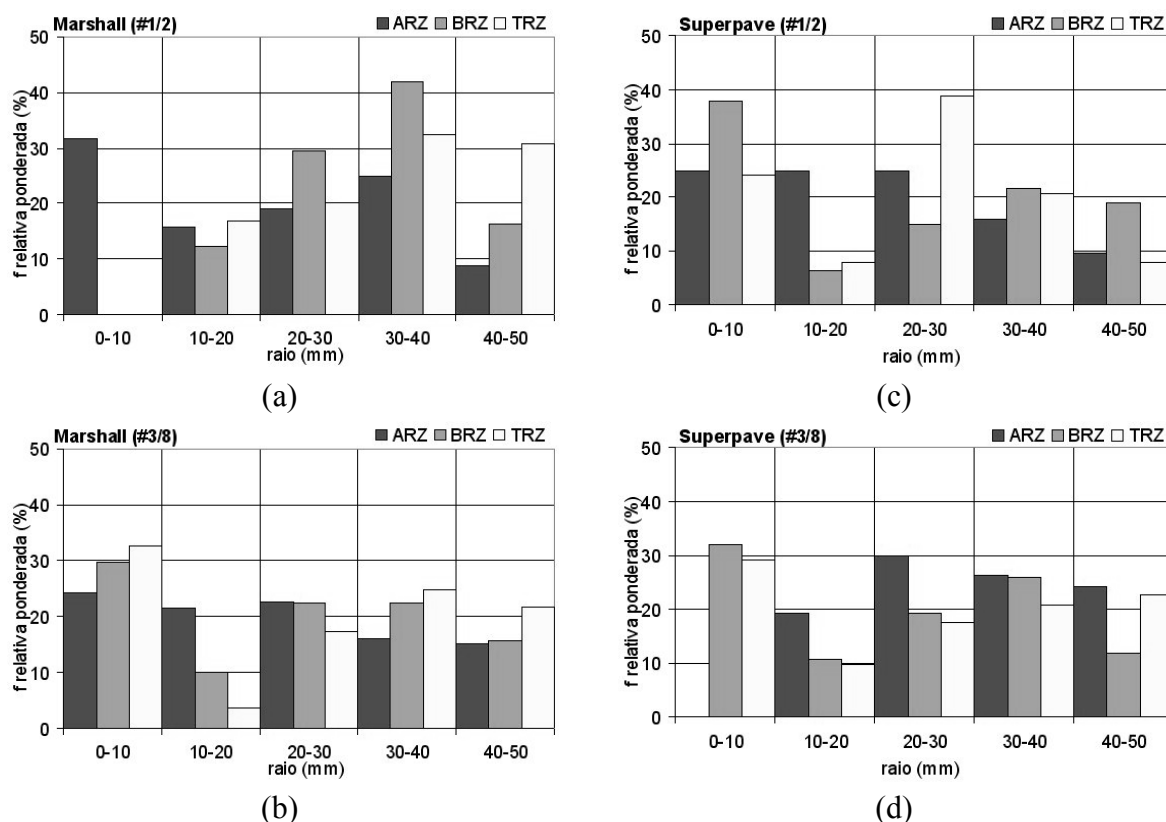


Figura 3: Histogramas das freqüências relativas da localização dos agregados de acordo com o método de compactação para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ "

Peneiras N° 4 e N° 10

Os histogramas mostraram que as partículas de tamanhos menores (peneiras N° 4 e N° 10) estão bem mais uniformemente distribuídas que as partículas maiores (peneiras $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ "). É também notório que ambas as dosagens apresentam-se mais semelhantes à medida que o tamanho das partículas diminui. Não havendo diferença relevante entre as distribuições destas peneiras, os histogramas referentes a elas não são aqui exibidos. De forma qualitativa, os histogramas mostraram que para todas as misturas as distribuições de agregados geradas pelas duas dosagens são semelhantes e tendem a uma uniformidade na distribuição. As misturas TRZ (gradação intermediária dos agregados das peneiras N° 4 e N° 10) apresentam a forma mais uniforme de distribuição e as misturas BRZ (maior gradação destas peneiras na mistura) apresentam uma freqüência maior de agregados nos setores II e III (valores radiais entre 10 e 30mm) do CP.

4.2. Análise Quantitativa da Distribuição Radial das Partículas de Agregados

Como fundamento da análise quantitativa, a Figura 4 apresenta as curvas de Lorenz para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ " das misturas analisadas onde, em cada gráfico, é possível comparar as misturas em cada processo de dosagem. Conforme mencionado anteriormente, as curvas de Lorenz permitem visualizar a concentração espacial na distribuição. Para cada porcentagem de valor de raio percorrido (eixo horizontal) temos o percentual das partículas distribuídas (eixo vertical). Também foram calculados os Índices de Gini de cada peneira para todas as misturas. Estes valores são apresentados de forma gráfica na Figura 5 e numérica na Tabela 3.

Peneiras $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ "

A partir da Figura 4, pode-se perceber visualmente a variação das concentrações entre as diversas misturas para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ ". Ao observarmos a Figura 4(a), vemos que com 40% de raio percorrido (20mm) a mistura ARZ possui 23% das partículas de $\frac{1}{2}$ " distribuídas, enquanto que as misturas BRZ e TRZ distribuíram 14% e 18%, respectivamente. Com relação as partículas de $\frac{3}{8}$ ", vemos que, para todas as misturas, elas se apresentaram bem mais uniformes em sua distribuição do que as de $\frac{1}{2}$ " (aproximação das curvas de Lorenz em relação a diagonal). Para estas partículas os métodos de compactação mostraram comportamento semelhante.

Com a Tabela 3 podemos ver a razão dos Índices de Gini entre as curvas dos 2 métodos de dosagem. Com isto, podemos saber quantas vezes a curva de distribuição Superpave é menos uniforme que a Marshall. Para agregados de $\frac{1}{2}$ ", as misturas ARZ e BRZ apresentaram valor da razão em torno de 0,70, evidenciando uma maior uniformidade de distribuição das partículas pela metodologia Superpave. No caso da mistura TRZ, os 2 métodos apresentaram valores semelhantes. Este comportamento foi observado contrário ao analisarmos as partículas de tamanho $\frac{3}{8}$ ", onde a dosagem Superpave concentrou mais a distribuição para as misturas ARZ e BRZ e distribuiu melhor para a mistura TRZ. É importante notar que ao observar pela Tabela 3, o valor absoluto do Índice de Gini para as 3 misturas e os 2 métodos de dosagem, a mistura ARZ apresentou, em geral, menor concentração de partículas para ambos os métodos de compactação.

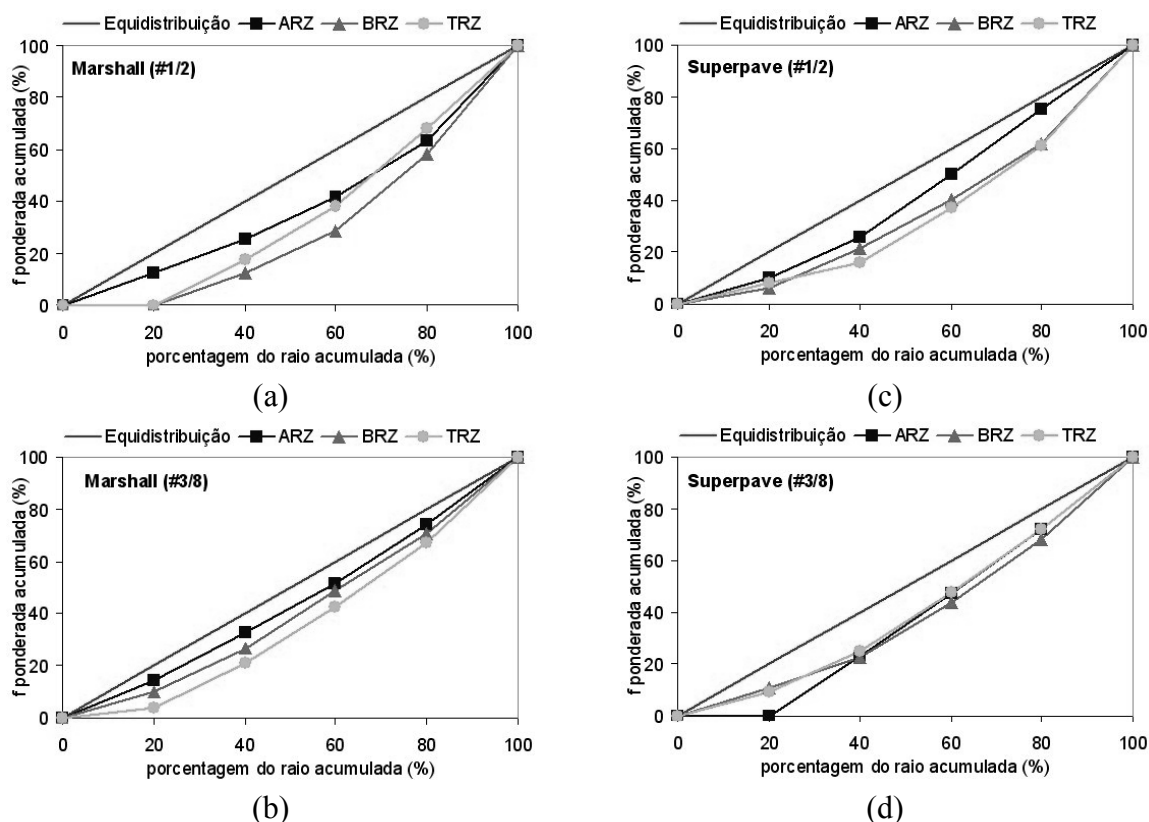


Figura 4: Curvas de Lorenz para as frequências relativas da localização dos agregados de acordo com o método de compactação para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ "

Peneiras N° 4 e N° 10

As curvas de Lorenz para as peneiras N° 4 e N° 10 não são apresentadas já que estas evidenciam a análise qualitativa de que estão mais uniformemente distribuídas que as partículas maiores (peneiras 1/2" e 3/8"). A análise do Índice de Gini também permite dizer que, para estas peneiras o índice apresenta valores bem pequenos ($<0,1$), evidenciando a boa uniformidade da distribuição destas partículas no corpo de prova. Podemos também ver que o método Marshall concentrou menos a distribuição destas partículas para todas as misturas. Apesar de variações entre os métodos, estas não tem muita representatividade tendo em vista os baixos valores do Índice de Gini como apresenta a Tabela 3.

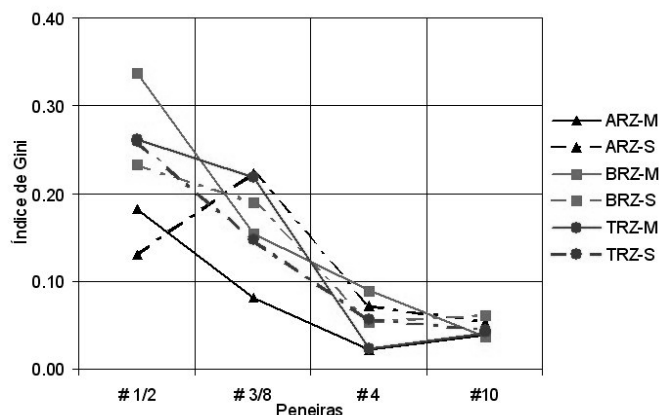


Figura 5: Índices de Gini

Tabela 3: Índices de Gini calculados para as misturas Superpave e Marshall

| | ARZ | | | | BRZ | | | | TRZ | | | |
|-------------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | # 1/2 | #3/8 | # 4 | # 10 | # 1/2 | #3/8 | # 4 | # 10 | # 1/2 | #3/8 | # 4 | # 10 |
| Marshall | 0.18 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.34 | 0.15 | 0.09 | 0.04 | 0.26 | 0.22 | 0.02 | 0.04 |
| Superpave | 0.13 | 0.22 | 0.07 | 0.05 | 0.23 | 0.19 | 0.05 | 0.06 | 0.26 | 0.15 | 0.06 | 0.04 |
| Razão (S/M) | 0.72 | 2.75 | 3.29 | 1.37 | 0.69 | 1.23 | 0.60 | 1.71 | 0.99 | 0.68 | 2.44 | 1.05 |

4.3. Análise da Orientação das Partículas de Agregados

Conforme abordado no item 3.6, a orientação dos agregados foi quantificada através da média dos ângulos com a horizontal (θ) e do vetor magnitude (Δ). A Tabela 4 ilustra os resultados obtidos para as 6 misturas analisadas, bem como a razão entre o vetor magnitude obtido através da compactação giratória e por impacto.

Tabela 4: Vetor magnitude e ângulo médio

| | ARZ | | BRZ | | TRZ | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Δ | θ | Δ | θ | Δ | θ |
| Marshall | 0,18 | 45 | 0,15 | 45 | 0,12 | 44 |
| Superpave | 0,18 | 46 | 0,16 | 46 | 0,14 | 43 |
| Razão (S/M) | 1,03 | - | 1,08 | - | 1,18 | - |

O resultado do vetor magnitude mostrou-se superior para a compactação giratória em relação à compactação por impacto, caracterizando misturas com distribuição mais randômicas para a compactação Marshall. O percentual entre os resultados Superpave e Marshall variou de 3 a 18% para as misturas ARZ e TRZ, respectivamente. No trabalho realizado por Yue *et al.* (1995) também foi encontrado que as amostras obtidas por compactação giratória (Superpave)

apresentaram distribuição de agregados mais homogênea que as amostras obtidas por compactação por impacto (Marshall).

Da Tabela acima observa-se que a média dos ângulos foi similar para todas as misturas, não sendo influenciada pela forma de compactação. Porém, como o vetor magnitude das misturas Superpave foi superior, acredita-se que o desvio padrão dos resultados para essas misturas tenha sido superior.

5. CONCLUSÕES

As análises realizadas mostraram que à medida que se diminui o tamanho dos agregados, a distribuição destes tende a ser bem mais uniforme, não existindo diferença entre os métodos de dosagem Marshall e Superpave. Desta forma o que determina alguma concentração de distribuição e uma conseqüente anisotropia das misturas é a distribuição de partículas maiores que $\frac{3}{8}$ ". A análise qualitativa (observação dos histogramas de frequências) mostrou-se ineficaz ao tentar conclusões sobre algum padrão da distribuição destas partículas. Sendo necessária, portanto, uma análise quantitativa com o uso do Índice de Gini para uma melhor compreensão desta distribuição. Este índice demonstrou facilidade e eficiência na determinação quantitativa da uniformidade de misturas da distribuição de agregados nas misturas asfálticas.

De uma forma geral, o método de dosagem Marshall distribuiu mais uniformemente os agregados das diversas peneiras analisadas. Ao analisarmos as misturas de diferentes granulometrias, a mistura ARZ (maior gradação para as peneiras de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{3}{8}$ ") apresentou menor concentração de partículas para ambos os métodos de compactação. O caso crítico de análise de tendência de distribuição foi para os agregados da peneira de $\frac{1}{2}$ " onde não foi observado nenhum padrão de comportamento notório quando da comparação dos métodos de dosagem. Talvez isso se deva ao fato de que esta peneira tenha uma distribuição aleatória sem tendência de localização em setores radiais específicos. Também pode se relacionar tal fenômeno à pequena quantidade destas partículas capturadas. Isto se deve ao fato de que estes agregados estão em uma fração mínima (entre 6% e 8%) dentro das misturas, além do fato de que o processo de serragem também secciona os agregados, muitas vezes não revelando nas imagens seu tamanho pleno.

As análises da orientação dos agregados na mistura revelaram que ambos os processos de compactação geram misturas com agregados aleatoriamente orientados. É importante lembrar que a metodologia de análises de orientações aqui descrita considera o ângulo do eixo maior da partícula com a horizontal. Este tipo de consideração pode não ser sensível à orientação dos agregados com relação a direção radial do corpo de prova exigindo uma análise em relação a esta direção.

A vantagem da abordagem aqui descrita é que a partir de métodos automáticos de processamento de imagens pode-se conhecer melhor a estrutura interna das misturas asfálticas, abrindo espaço para comparações entre os diversos tipos de compactação de laboratório e até mesmo de campo. Além disso, o conhecimento da microestrutura permite um melhor conhecimento da anisotropia das misturas asfálticas. Observe-se que em todas as situações de projeto estas são assumidas isotrópicas, o que este estudo revelou que, apesar de não localizado, há existência de concentração espacial para as partículas de granulometria maior.

O presente estudo também permite o direcionamento para análises micromecânicas onde se podem desenvolver geradores de geometrias nos quais o posicionamento das diversas partículas pode ser gerado a partir de distribuições probabilísticas baseadas nos dados observados das frequências de incidência de cada partícula nos diversos setores do corpo de prova.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC, e à ANP, CAPES e CNPq pelas respectivas bolsas concedidas e ao professor Lucas Tadeu Barroso de Melo – Ph.D. por sua contribuição ao presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Button, J.W.; Little, D.N.; Jagadam, V.; Pendleton, O.J. (1994) Correlation of Selected Laboratory Compaction Methods with Field Compaction. *Transportation Research Record 1454*, TRB, National Research Council, Washington, DC, p. 193-201.
- Consuegra, A.; Little, D.N.; Von Quintos, H.; Burati, J. (1989) Comparative Evaluation of Laboratory Compaction Devices Based on Their Ability to Produce Mixtures with Engineering Properties Similar to Those Produced in the Field. *Transportation Research Record 1228*, TRB, National Research Council, Washington, DC, p. 80-87.
- Curry, J.R. (1956) Analysis of Two Dimensional Orientation Data. *Journal of Geology*, v. 64, p. 117-131.
- Gerardi, L.H.O.; Silva, B.C.N. (1981) Quantificação em Geografia. 1ª edição, Editora Difel, São Paulo.
- Harvey, J.; Monismith, C.L. (1993) Effects of Laboratory Asphalt Concrete Specimens Preparation Variables on Fatigue and Permanent Deformation Test Results Using Highway Research Program A-003A Proposed Testing Equipment. *Transportation Research Record 1417*, TRB, National Research Council, Washington, DC, p. 38-57.
- Masad, E. (1998) Permeability Simulation of Reconstructed Anisotropic Soil Medium. PhD Dissertation, Washington State University, Pullman, WA.
- Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T. (1998) Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. *Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineering*, v.85, p. 69-80.
- Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T. (1999a) Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 13, N°2, April.
- Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T. (1999b) Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete. *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Masad, E.; Sivakumar, K. (2004) Advances in the Characterizing and Modeling of Civil Engineering Materials Using Imaging Techniques. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Editorial, January.
- Matos, J.D. (2005) Distribuição de Renda: Fatores Condicionantes entre as Regiões Metropolitanas Pesquisadas pela PED. Relatório da Secretaria de Coordenação e Planejamento. Fundação de Economia e Estatística.
- Saadeh, S.; Tashman, L.; Masad, E.; Mogawer, W. (2002) Spatial and Directional Distribution of Aggregates in Asphalt Mixes. *Journal of Testing and Evaluation*, v.30, p. 483-491.
- Tashman, L. (2000) *Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyratory Compaction to Field Conditions*. Ms. Thesis, Washington State University, Pullman.
- Tashman, L.; Masad, E.; Peterson, B.; Saleh, H. (2001) Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyratory to Field Conditions. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, p. 605-655.
- Vasconcelos, K.L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometria*. Dissertação de M.Sc., PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.
- Yue, Z.Q.; Bekking, W.; Morin, I. (1995) Application of Digital Image Processing to Quantitative Study of Asphalt Concrete Microstructure. *Transportation Research Record 1492*, TRB, National Research Council, Washington, DC, p. 53-60.
- Yue, Z.Q.; Morin, I. (1996) Digital Image Processing for Aggregate Orientation in Asphalt Concrete Mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.23, p. 480-489.

¹Texas A&M University
Texas Transportation Institute
Materials & Pavement Division
501 J, CE/TTI building
College Station, TX 77840-3135
email: kamilla@ttimail.tamu.edu

²Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703 s/n
Fortaleza, CE 60455-760
email: fejr@det.ufc.br
jsoares@det.ufc.br