

APLICAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS NA AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

DIGITAL IMAGES IN EVALUATING OF ASPHALT MIX FEATURES

Protasio Ferreira e Castro ¹, Cláudio Luiz Dias Leal ², Camila Ribeiro Viana de Almeida ³

Recebido em 11 de setembro de 2012; recebido para revisão em 28 de setembro de 2012; aceito em 04 de outubro de 2012; disponível on-line em 17 de outubro de 2012.



PALAVRAS CHAVES:

Segmentação de imagens;
Módulo de resiliência;
Tração por compressão diametral.

KEYWORDS:

Image segmentation
Image tool;
Resilient modulus;
Tensile strength.

RESUMO: Engenheiros têm confiado no módulo de resiliência para planejar, projetar e construir pavimentos asfálticos. A confiabilidade do módulo de resiliência veio como resultado da experiência adquirida no extensivo trabalho de desenvolvimento realizado durante o último século, em todo o mundo. No entanto, as misturas de asfalto colocadas no pavimento tem compactação diferente daquelas ensaiadas em laboratório. Portanto, quando o ensaio de módulo resiliente não é realizado em corpos de prova extraídos, o resultado de laboratório reflete um potencial de comportamento, mas não necessariamente o desempenho resiliente *in-situ*. Ensaios Não Destrutivos (END) foram desenvolvidos para controlar a produção e a mistura de concreto asfáltico na camada do pavimento durante a construção, bem como para fornecer dados de inspeção úteis para um eficiente projeto de reabilitação. O objetivo principal da pesquisa, aqui apresentada, foi explorar o potencial do ensaio de tomografia computadorizada para avaliar características de misturas asfálticas como distribuição de vazios, permeabilidade e orientação dos agregados na matriz. Os resultados dos ensaios mostraram ser a tomografia tão confiável como qualquer outro ensaio laboratorial na avaliação do teor de vazios e sua distribuição ao longo do corpo de prova. O programa “Uthsca Image Tool” foi usado para analisar as imagens das seções transversais obtidas.

ABSTRACT: Engineers have relied on resilient modulus for planning, designing and building asphalt pavement. The reliability on the resilient modulus came as a result of experience gained in extensive development work conducted during the last century throughout the world. However, asphalt mixtures placed in pavement has different compaction to that tested in laboratory. Hence, when resilient modulus test is not carried out on core the laboratory result reflects a behavior potential but not necessarily the *in-situ* resilient performance. Non-destructive-tests (END) have been developed to control mix production and asphalt concrete in pavement layer during construction, as well as to provide inspection data useful in the design of efficient rehabilitation. The main purpose of the research, here shown, was to explore the potential of computerized tomography test for assessing asphalt mixes characteristics as voids distributions, permeability and orientation of aggregates in the matrix. Test results showed tomography to be as reliable as any other laboratory test on evaluating voids content and its distribution along the specimen. The “Uthsca Image Tool” program was used for analyzing obtained cross-sectional images.

* Contato com os autores:

¹ e-mail : protasio.castro@pq.cnpq.br (P. F. e Castro)

PhD, Professor da Universidade Federal Fluminense – UFF.

² e-mail : cleal@iff.edu.br (C. L. D. Leal)

MSc, Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF.

³ e-mail : camilarva@yahoo.com.br (C. R. V. de Almeida)

Bolsista de Iniciação Científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF.

1. INTRODUÇÃO

Alguns ramos da engenharia têm explorado a tecnologia de imagens para investigação das características dos materiais. Segundo Zelelew *et al.* (2008), misturas asfálticas são essencialmente constituídas por materiais heterogêneos como agregados e masticues, além de vazios. Mastique é uma mistura de asfalto e finos, considerados como partículas passando na peneira de abertura 0,075 mm. A proporção, distribuição e interação dessas três fases definem o comportamento micro-mecânico do pavimento asfáltico. Portanto, uma representação realística da microestrutura das misturas asfálticas é necessária a fim de caracterizar diferentes propriedades dessas misturas.

O desenvolvimento da tomografia computadorizada de alta resolução mostra-se promissor para caracterização da microestrutura das misturas asfálticas. Alguns estudos demonstram a potencialidade de aplicação da tomografia para caracterizar diferentes propriedades das misturas asfálticas. Atualmente a tomografia é usada para determinar a distribuição dos vazios, orientação dos agregados, segregação e textura superficial (Masad *et al.*, 1998; Braz *et al.*, 1999; Masad *et al.*, 1999a, 1999b; Sashidhar, 1999; Masad *et al.*, 2001; Tashman *et al.*, 2002; Masad e Button, 2004; Wang *et al.*, 2004a, 2004b; Zelelew e Papagiannakis, 2007; Zelelew *et al.*, 2008). A tomografia computadorizada é uma importante ferramenta para análise da estrutura interna das misturas asfálticas. As imagens da tomografia permitem analisar a distribuição dos vazios, identificar o contato grão a grão e determinar a forma dos agregados (Masad, 2004).

As imagens de tomografia computadorizada são obtidas por meio da varredura do corpo de prova de concreto asfáltico com um mecanismo rotacional, gerando imagens a cada 0,5 mm da altura do corpo de prova. Essas imagens são capturadas em diversos níveis de cinza, cuja intensidade corresponde às diferentes densidades dos materiais que compõem o concreto asfáltico (Omari, 2004). Além disso, uma imagem em 3D pode ser obtida.

Portanto, a estrutura tridimensional interna do concreto asfáltico pode ser analisada com o emprego da tomografia computadorizada. A técnica vem sendo aperfeiçoada com uso de imagens de alta resolução, sistema de aquisição de dados para facilitar a compreensão e análise da estrutura interna do concreto asfáltico.

Castellano *et al.* (2010) relatam que as imagens

de tomografia computadorizada possuem muito mais informação do que as que o olho humano é capaz de perceber. A imagem digital pode ser definida como uma função de duas variáveis, $f(x,y)$, com x e y coordenadas planas do "pixel" e $f(x,y)$ o nível de cinza. Uma imagem digital é uma matriz bidimensional de "pixels", de tamanho $M \times N$, sendo M o número de linhas e N o número de colunas. Uma imagem digitalizada tem uma escala de 256 níveis de cinza, variando de 0 (preto) a 255 (branco), enquanto a imagem binária possui apenas dois níveis 0 (preto) e 1 (branco). Os agregados, de maior densidade, têm cor mais clara do que o ligante asfáltico, enquanto os vazios na imagem são identificados pela cor preta, "pixel" de intensidade 0 (OMARI, 2004).

A magnitude dos raios X aplicados ao corpo de prova deve ser cuidadosamente selecionada durante a tomografia. Se a intensidade dos raios aplicados a um material de baixa densidade for alta, a imagem obtida poderá ser de baixo contraste, sem identificar as diferentes regiões do corpo de prova. Portanto, antes da tomografia do corpo de prova, deve-se escolher a magnitude adequada dos raios X para obtenção de um melhor contraste (Omari, 2004).

O objetivo dessa pesquisa foi verificar o percentual e a distribuição dos vazios, compactação e orientação dos agregados em uma mistura asfáltica do tipo "Stone Matrix Asphalt" (SMA), usando para isso a técnica de imagens de tomografia computadorizada.

2. MATERIAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os agregados usados na pesquisa foram a brita e o pó de pedra de tamanho nominal máximo 12,5 e 4,8 mm, originados de rocha granítica. No programa experimental, aqui apresentado, utilizou-se cal como fíler.

O ligante usado nesse programa experimental foi o asfalto modificado por borracha moída de pneus ou asfalto-borracha.

As fibras normalmente usadas no SMA são as fibras de celulose, mineral ou de vidro. Por ter um custo inferior às outras a fibra de celulose é a mais empregada, sendo comercializada na forma de "pellets" impregnada com material asfáltico. Nessa pesquisa foi testado o bagaço de cana de açúcar, resíduo industrial geralmente queimado para produção de energia nas usinas de açúcar, como aditivo estabilizante. O bagaço de cana de açúcar foi seco e peneirado na peneira 1,2 mm (nº 16) para ser usado como aditivo estabilizante. A Figura 1 mostra aspectos do bagaço de cana de açúcar

processado para ser usado na mistura SMA.



Figura 1: Fibra do bagaço de cana de açúcar.

Vários fatores podem influenciar a composição química da cana de açúcar, destacando-se: clima, região de cultivo, solo, variedade da cana, adubação etc (Borlini, 2006). O bagaço de cana é constituído pelas frações: celulose, hemicelulose e lignina. Juntas, essas frações constituem mais de 90% da massa total do bagaço de cana (Pandey *et al.*, 2000; Canilha *et al.*, 2007). A composição química do bagaço de cana de açúcar pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1: Características do bagaço de cana de açúcar.

Componente	Resultado (%)
Celulose	46,9
Hemicelulose	27,5
Lignina	26,3
Cinzas	1,6
Extrativos	

Fonte: Canilha *et al.*, 2007.

2.1 RESUMO DO PROJETO DE SMA

O projeto de mistura SMA foi realizado seguindo os procedimentos e critérios propostos por Brown e Cooley (1999) e NAPA (2002). O primeiro passo foi promover a mistura dos agregados para levar a granulometria da mistura a enquadrar-se na faixa granulométrica adotada. Para garantir o contato grão a grão usou-se o procedimento do NAPA (2002), que afirma que a integridade do esqueleto pétreo é conseguida estabelecendo-se que o percentual de vazios do agregado graúdo da mistura SMA (VAG_{M_t}) é igual ou

menor que o percentual de vazios da fração graúda do agregado (VAG_{MUC}), determinada pelo ensaio de massa unitária no estado compactado seco. Corpos de prova foram moldados e submetidos aos ensaios de laboratório para determinação dos vazios do agregado graúdo da mistura, vazios do agregado mineral e porcentagem de vazios. Três graduações foram inicialmente testadas, uma graduação grossa, uma intermediária e uma fina, dentro da faixa granulométrica. Após a determinação dessas características foi escolhida a graduação ótima, que foi usada para determinação do teor de ligante. Foram moldados três corpos de prova para cada teor de ligante e uma amostra foi usada para determinação da densidade máxima medida. As características das misturas foram determinadas e o teor ótimo de asfalto foi determinado de acordo com os critérios estabelecidos por Brown e Cooley (2002). O traço obtido pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Características do bagaço de cana de açúcar.

Material	Traço dos agregados em massa (%)	Traço do SMA em massa (%)
Brita 0	78,3	72,8
Pó de pedra	14,5	13,5
Fíler	7,2	6,7
Fibra de bagaço de cana	-	0,3
CAPFLEX B	-	6,7

2.2 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA ASFÁLTICA SMA

As características da mistura SMA foram determinadas através dos ensaios de resistência à tração, desgaste Cantabro, módulo de resiliência, velocidade do pulso ultra-sônico, percentual de vazios e tomografia computadorizada.

2.2.1 Resistência à tração

Foi usado o método conhecido como Método Brasileiro, proposto por Lobo Carneiro, para determinação da resistência a tração por compressão

diametral. Os corpos de prova Marshall foram mantidos na temperatura de ensaio, 25 °C, por duas horas. Em seguida, os corpos de prova foram levados à prensa Marshall para rompimento. Foram colocados dois frisos metálicos ao longo das geratrizes dos corpos de prova para distribuição da carga. A carga foi aplicada com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s (DNIT ME 138/94).

2.2.2 Desgaste Cantabro

O ensaio de desgaste Cantabro (DNIT ME 383/99) foi usado para determinar a perda por abrasão de misturas asfálticas com asfalto modificado por polímero. Este ensaio procura simular o possível arrancamento da massa asfáltica, como resultado da interação pneu revestimento. O Centro de Estudios de Carreteras na Espanha desenvolveu este ensaio para avaliação de misturas asfálticas abertas, norma NLT 325/86 (Hirsh *et al.*, 2007). Corpos de prova tipo Marshall foram moldados e pesados. Depois os corpos de prova foram introduzidos na máquina de abrasão Los Angeles, sem nenhuma carga abrasiva e submetidos a 300 rotações, com 30 a 33 rotações por minuto. Após as 300 rotações os corpos de prova foram retirados do tambor, pesados e o percentual de desgaste da mistura asfáltica foi calculado.

2.2.3 Módulo de resiliência

De acordo com o DNIT ME 133/94, o módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável correspondente a tensão aplicada, numa determinada temperatura.

2.2.4 Velocidade do pulso ultra-sônico

A norma ABNT – NBR 8802 /94 estabelece o procedimento para determinação da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico. O ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico baseia-se na variação da velocidade de propagação da onda sonora através de um meio sólido. Pode-se assim determinar homogeneidade, vazios, fissuras, o módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson.

A primeira fase do ensaio é a calibração do aparelho com uma barra metálica, já aferida. A superfície do corpo de prova deve ser plana e isenta de poeira, uma camada de vaselina ou graxa deve ser aplicada aos transdutores, para funcionar como acoplante. Depois os transdutores são arranjados, numa das três formas: transmissão direta, transmissão indireta ou transmissão

semi-direta. Para cada corpo de prova foram feitas duas leituras, com transmissão direta, sendo a velocidade final a média das duas determinações.

2.2.5 Percentual de vazios

O percentual de vazios foi encontrado com aplicação do método Rice (ASTM D 2041) para determinação da densidade máxima medida e do método de peso do corpo de prova ao ar e imerso para densidade aparente.

A Tabela 3 apresenta as características da mistura SMA e a Figura 2 mostra aspectos dos ensaios realizados no programa experimental.

Tabela 3: Características da mistura SMA.

Ensaio	Resultado	Valor de referência
Resistência à Tração (MPa)	1,31	> 0,65
Desgaste Cantabro (%)	5,0	< 25
Módulo de Resiliência (MPa)	2468	-
Velocidade do pulso ultra-sônico (km/s)	6,95	-
Densidade máxima medida	2,420	-

2.2.6 Processamento digital das imagens

Segundo Zelelew *et al.* (2008), geralmente usam-se métodos como equalização de histograma ou limiarização para melhorar a qualidade da imagem original. Isso consiste em ajustar os níveis de cinza dos “pixels” para produzir mais equilíbrio na sua distribuição na imagem. Filtros médios são os mais usados para remoção de ruídos das imagens. Na filtragem média, o nível de cinza de cada “pixel” é substituído pelo nível médio de cinza da vizinhança.

As imagens de tomografia foram produzidas em fatias de 0,5 mm, no formato “Digital Imaging and Communications in Medicine” (DICOM). O programa “Onis 2.2 Free Edition” transformou as imagens do formato DICOM para “Joint Photographic Experts Group” (JPG), além de produzir imagem 3D do corpo de prova. O processamento das imagens digitais envolveu o realce de contraste, limiarização, remoção de ruídos, detecção de bordas e segmentação. As imagens digitais foram processadas com o auxílio do programa “Uthsca Image Tool”, programa livre de processamento digital de

imagens para Windows, desenvolvido pelo Departamento de Odontologia do “University of Texas Health Science Center, San Antonio, Texas”. Detalhes dos programas usados no processamento das imagens são apresentados na Figura 3.



Figura 2: Métodos usados: (a) Tração, (b) Desgaste Cantabro, (c) Módulo de resiliência, (d) Velocidade do pulso ultra-sônico.

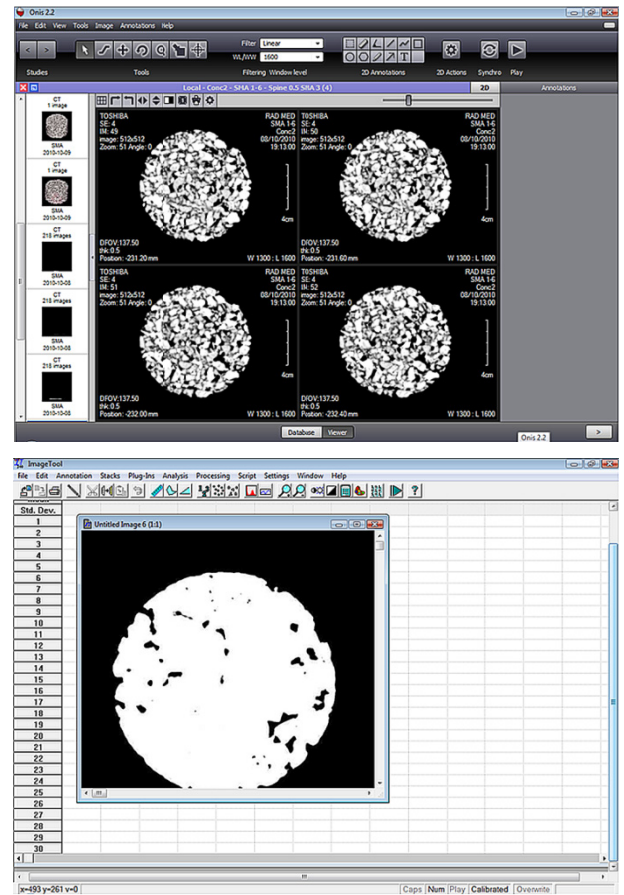


Figura 3: Telas dos programas Onis 2.2 Free Edition e Uthsrsa Image Tool.

As imagens foram processadas para realçar os objetos de interesse, nesse caso os vazios. A área total de cada fatia do corpo de prova (A_t) foi determinada, assim como a área de vazios de cada fatia e o percentual de vazios encontrado com a equação:

$$\%v = \frac{A_v}{A_t} \times 100 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

$\%v$ = porcentagem de vazios (%);

A_v = área de vazios (%);

A_t = área da seção do tanque de sedimentação (m^2).

A Figura 4 mostra o processamento de uma fatia de corpo de prova e sua imagem em 3D. A imagem na forma “Red, Green, and Blue” (RGB) foi convertida em tons de cinza, aplicou-se o filtro médio 3X3 para remoção de ruídos, o contraste foi ajustado para realce dos vazios, foi feita a detecção de bordas e por fim foi determinada a área do vazio (preto).

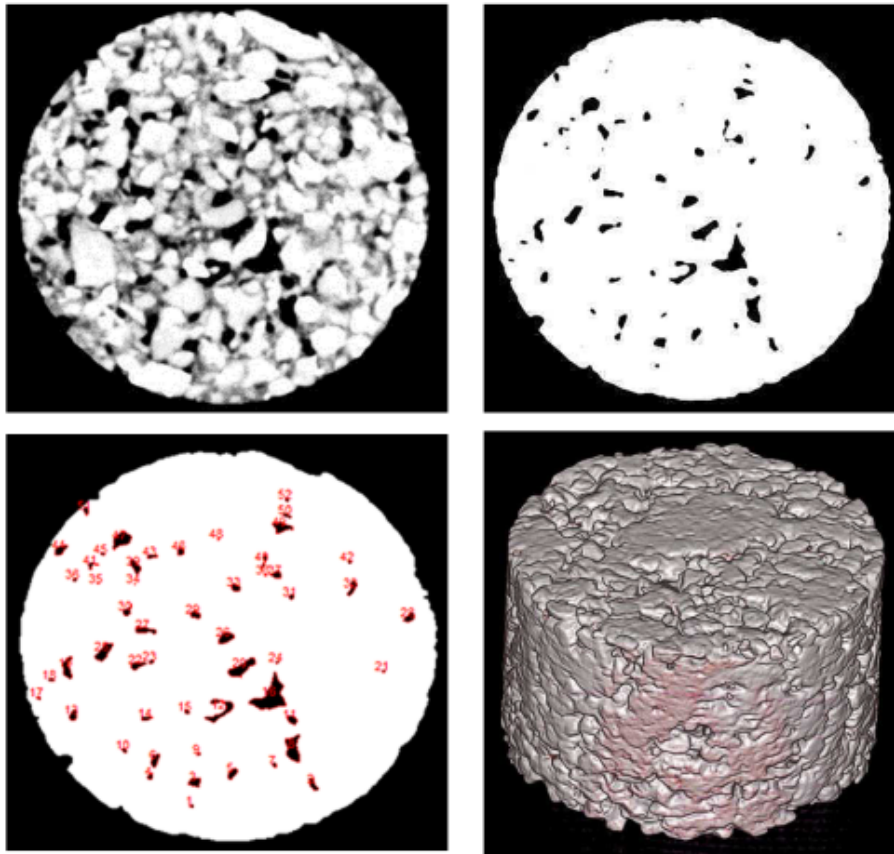


Figura 4: Processamento de uma fatia de corpo de prova e uma imagem do mesmo corpo de prova em 3D.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram processadas doze fatias de cada um dos seis corpos de prova estudados, sendo quatro fatias de cada extremidade e quatro fatias do meio do corpo de prova. Os dados obtidos com o programa “Uthsca Image Tool” foram usados em uma planilha Excel® para cálculo dos percentuais de vazios. Resultados do percentual de vazios pelo método convencional e pelo método da tomografia são apresentados na Tabela 3.

Foram aplicados dois testes estatísticos de hipóteses aos resultados da Tabela 3. O nível de significância $\alpha = 0,05$ foi adotado para os dois testes.

O primeiro teste utilizou a distribuição de Fischer ($F_{\text{crítico}}$ igual a 4,964) para verificar se as técnicas de ensaio exerciam influência sobre as médias dos resultados obtidos. Obteve-se $F_{\text{calculado}}$ igual a 0,363, logo $F_{\text{calculado}}$ foi menor que $F_{\text{crítico}}$, indicando que a hipótese nula (H_0) foi aceita, isto é, não existe influência significativa da técnica sobre a média obtida.

O segundo teste de hipótese utilizou a distribuição de Student ($t_{\text{crítico}}$ igual a 2,228) para verificar se as médias obtidas são estatisticamente diferentes. Obteve-se $t_{\text{calculado}}$ igual a 1,738, logo $t_{\text{calculado}}$ foi menor

Tabela 3: Percentual de vazios Características da mistura SMA.

Método	Tomografia		Convencional	
	Posição da Fatia	Vazios (%)	Média (%)	Vazios (%)
1	Extremidade A	3,92	3,14	4,62
	Centro	1,68		
	Extremidade B	3,81		
2	Extremidade A	2,50	4,34	4,39
	Centro	3,88		
	Extremidade B	6,65		
3	Extremidade A	3,87	4,36	4,81
	Centro	3,43		
	Extremidade B	5,80		
4	Extremidade A	4,96	3,04	4,96
	Centro	1,47		
	Extremidade B	2,68		
5	Extremidade A	5,82	4,67	4,40
	Centro	2,29		
	Extremidade B	5,89		
6	Extremidade A	6,76	4,75	4,51
	Centro	2,75		
	Extremidade B	4,73		

que $t_{\text{crítico}}$, indicando que a hipótese nula (H_0) foi aceita, isto é, não existe diferença entre as duas médias obtidas.

A Figura 5 mostra o teor de vazios em função da posição da fatia no corpo de prova. Nessa figura nota-se que as fatias do meio do corpo de prova apresentam

tendência de menor percentual de vazios.

A Figura 6 apresenta percentuais de vazios obtidos pelo método convencional e método da tomografia computadorizada. Pode-se observar, através da Figura 6, que os resultados obtidos são semelhantes.

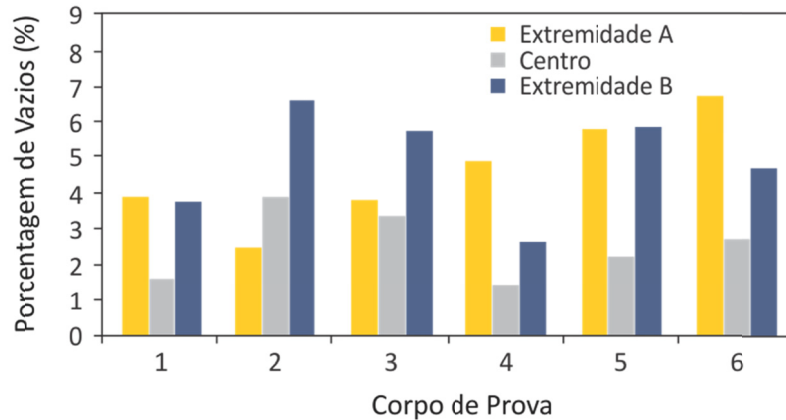


Figura 5: Tomografia - Teor de vazios e posição da fatia.

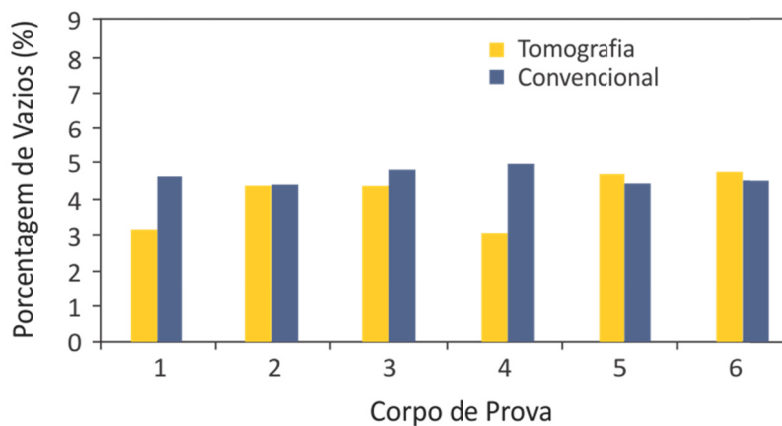


Figura 6: Percentual de vazios e método usado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- Os percentuais de vazios obtidos com as imagens de tomografia computadorizada são semelhantes aos obtidos através do método convencional;
- O percentual de vazios varia ao longo da espessura do corpo de prova;
- A imagem da tomografia computadorizada permite a observação da distribuição dos vazios na mistura asfáltica;
- No caso das misturas SMA, a imagem da tomografia computadorizada permite observar a textura superficial e o contato grão a grão dos agregados graúdos;
- No caso das misturas SMA, a imagem da tomografia computadorizada permite observar a textura superficial e o contato grão a grão dos agregados graúdos;
- Como vantagem da tomografia em relação aos métodos tradicionais pode-se citar: a visualização da distribuição dos vazios, observação da orientação dos agregados na mistura;
- A principal desvantagem da tomografia para determinação das características das misturas asfálticas é o custo do equipamento de tomografia;
- Outra desvantagem da tomografia é sua limitação de emprego ao ambiente laboratorial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal Fluminense (IFF), à Universidade Federal Fluminense (UFF) e à FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo apoio à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. D 2041. West Conshohocken, 2000.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8802. **Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-Sônica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1994.
- Borlini, M. C. **Incorporação de Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar em Massa Cerâmica Argilosa**. Campos dos Goytacazes, 2006. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2006.
- Braz, D. *et al.* **Computed Tomography in the Fatigue Test Analysis of an Asphalt Mixture**. Applied Radiation and Isotopes, 50(4), pp. 661-671. 1998.
- Brown e Cooley, E. RAY, L.A.. **Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. Part 1: Summary of Research Results, Part 2: Mixture Design Method, Construction Guidelines, and Quality Control/Quality Assurance Procedures**. NCHRP Report 425. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, 1999.
- Canilha, L. *et al.* **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol**. Congresso Brasileiro de Química, 47., 2007. Associação Brasileira de Química. Natal, 2007.
- Castellano, G. *et al.* **Técnicas de Processamento de Imagens de Tomografia Computadorizada**. Com Ciência – Revista Eletrônica de Jornalismo Científico. Disponível em: <http://www.comciencia.br/comciencia/>. Acesso em: 11/10/2010.
- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT). **Materiais Betuminosos. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro**. Método de Ensaio, DNIT ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999.
- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT). **Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. Método de Ensaio, DNIT ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994.
- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT). **Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência**. Método de Ensaio, DNIT ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994.
- Hirsh *et al.*, F. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes**. Reunião Anual de Pavimentação, 38., 2007. Associação Brasileira de Pavimentação. Manaus, 2007.
- Masad *et al.*, E. **Aggregate orientation and segregation in asphalt concrete**. ASCE Geotech. Special Pub., 85, 69-80. 1998.
- Masad *et al.*, E. **Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis**. Journal of Computing in Civil Engineering, 13(2), 88-95. 1999a.
- Masad *et al.*, E. **Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete**. Transportation Research Record 1681, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 179-185. 1999b.
- Masad *et al.*, E. **Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes**. Journal of Transportation Engineering, 127(6), 477-485. 2001.
- Masad, E. **X-Ray Computed Tomography of Aggregates and Asphalt Mixes**. Materials Evaluations Journal, Vol. 62, Nº. 7. 2004.
- Masad E., Button J.. **Implications of experimental measurements and analysis of the internal structure of Hot-Mix asphalt**. Transportation Research Record 1891, Transportation Research Board, Washington D.C., 212-220. 2004.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). **Design and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice**. Quality Improvement Series 122. Lanham, 2002.
- Omari, A. A. M. A. **Analysis of HMA Permeability Through Microstructure Characterization and Simulation of Fluid Flow in X-Ray CT Images**. College Station, 2004. Dissertation (Doctor of Philosophy). Texas A&M University. College Station, 2004.
- PANDEY *et al.*, A. **Biotechnological potential of agro-industrial residues: sugarcane bagasse**. Bioresource Technology, 74: 69-80. 2000.
- Shashidhar N. **X-ray tomography of asphalt concrete**. Transportation Research Record 1681, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 186-192. 1999.
- Tashman *et al.*, L. **X-ray tomography to characterize air void distribution in Superpave gyratory compacted specimens**. International Journal of Pavement Engineering, 3(1), 19-28. 2002
- Wang *et al.*, L. B. **Characterization of aggregates and asphalt concrete using x-ray computerized tomography: A state-of-the-art report**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 73, 467- 500. 2004a.
- Wang *et al.*, L. B. **Three-dimensional digital representation of granular material microstructure from x-ray tomography imaging**. Journal of Computing in Civil Engineering, 18(1), 28-35. 2004b.

Zeleeuw H.M., Papagiannakis A.T.. **A Volumetric thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images.** International Journal of Pavement Engineering (In-review). 2007.

Zeleeuw, H. M. *et al.* **Application of Digital Image Processing Techniques for Asphalt Concrete Mixture Images.** The International Conference, 12., 2008. International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, 2008.